



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de Presidente Prudente

GUILHERME ANTONIO GOMES DO NASCIMENTO

**VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE DE DADOS OBTIDOS POR
SISTEMA LASER BATIMÉTRICO AEROTRANSPORTADO À
CARTOGRAFIA NÁUTICA**



PRESIDENTE PRUDENTE
2019

GUILHERME ANTONIO GOMES DO NASCIMENTO

**VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE DE DADOS OBTIDOS POR
SISTEMA LASER BATIMÉTRICO AEROTRANSPORTADO À
CARTOGRAFIA NÁUTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas da FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP – Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. **Maurício Galo**

PRESIDENTE PRUDENTE
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

N244v Nascimento, Guilherme Antonio Gomes do
Verificação da Aplicabilidade de Dados Obtidos por Sistema LASER
Batimétrico Aerotransportado à Cartografia Náutica / Guilherme
Antonio Gomes do Nascimento. -- Presidente Prudente, 2019
110 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente
Orientador: Mauricio Galo

1. Light Detection And Ranging (LiDAR). 2. Airbone LASER
Bathymetry (ALB). 3. Multibeam Echosounder (MBES). 4. Incerteza
Vertical. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

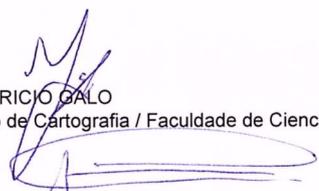
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Verificação da aplicabilidade de dados obtidos por sistema LASER Batimétrico Aerotransportado à Cartografia Náutica

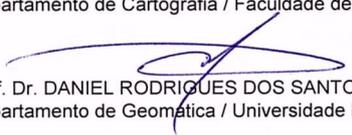
AUTOR: GUILHERME ANTONIO GOMES DO NASCIMENTO

ORIENTADOR: MAURICIO GALO

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


Prof. Dr. MAURICIO GALO
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

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


Prof. Dr. DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS
Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná

Presidente Prudente, 21 de fevereiro de 2019

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Sonia e Hércules, ao meu irmão Rodrigo,
à minha sogra, D. Tania e à minha esposa, Ana.*

AGRADECIMENTOS

À Marinha do Brasil, em especial nas pessoas do CF Rodrigo Carvalho, CMG Sebastião e CMG Muthz, pelo incentivo durante o pleito ao curso e pelo apoio logístico para que esse trabalho se tornasse possível.

À CPRM, na pessoa da pesquisadora Dra. Hortência Assis, pela receptividade e pelo empenho em possibilitar o acesso aos dados utilizados nesse trabalho. Ponho-me disponível desde já, para contribuir em futuros passos para o aprofundamento dos conhecimentos adquiridos.

Ao Professor Dr. Mauricio Galo, meu orientador, por todos os ensinamentos, paciência e compreensão. Sua disposição e capacidade técnica, aliadas a uma humildade ímpar, ficarão guardadas como um exemplo no prosseguir da minha caminhada. Serei sempre grato por acreditar no trabalho que ora terminamos.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Daniel Rodrigues dos Santos e Dr. Aluir Profírio Dal Poz, pelos apontamentos no Exame de Qualificação e nesta Dissertação.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), pelo conhecimento a mim passado no transcorrer do curso.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa em Fotogrametria, especialmente, Lara, Gabi, Mari Campos, Marcela e Lucas, pela dedicação de parte de seus tempos para me auxiliarem a superar as mais diversas dificuldades. A importância disso indica a saudade que sentirei de vocês.

Ao amigo Rorai, “forasteiro” como eu, pela amizade, paciência e companheirismo durante esses dois anos. É uma prova indelével de confiança abrir as portas de sua casa a um amigo. Serei para sempre grato.

Aos amigos Vitor e Christopher, pelo sincero apoio e troca de experiências, mesmo que à distância. Vocês são exemplos de correção naquilo a que se propõem.

Ao meu irmão, pelo amor que nos une desde os meus primeiros passos e que nos manteve juntos também nessa empreitada. Obrigado por sempre me empurrar avante!

Aos meus pais, por sempre crerem na minha capacidade. Meu esforço em fazê-los orgulhosos nunca será suficiente para agradecer os sacrifícios que dispenderam por mim.

À companheira da minha vida, Ana. Digo-lhe que não me lançaria em mais esse desafio se não tivesse o seu incondicional apoio. A certeza do seu alicerce não me permitiu esmorecer frente aos sacrifícios pessoais e materiais aos quais nos impusemos. Sua experiência acadêmica foi uma fonte de consulta e acalento nos momentos de dúvida e angústia. Você será sempre a minha fortaleza. Admiro mais a cada dia sua coragem e determinação!

*Em meio a riscos diversos, superando todos
os percalços, trilhamos nosso caminho...*

Eneida, de Virgílio

Resumo

Um Levantamento Hidrográfico (LH) tem como principal meta a obtenção de dados para a edição e atualização de documentos náuticos, estes, voltados à segurança das atividades de navegação. Objetivando padronizar parâmetros de incerteza das cartas náuticas, a Organização Hidrográfica Internacional (OHI) define níveis mínimos de confiança para diferentes ordens. A sugestão dessas especificações foi internalizada pela Marinha do Brasil, responsável pela produção das cartas náuticas brasileiras, na NORMAM-25. Um desses parâmetros é a Incerteza Vertical Total máxima permitida, um indicador de qualidade da medição da profundidade. A informação de profundidade influencia no calado máximo permitido a uma embarcação para transitar em uma região com segurança, o que pode impactar inclusive nas limitações de transações comerciais em terminais portuários, uma vez que as profundidades estimadas com acurácia potencializam os parâmetros de operação dos portos. Por se tratar de um ambiente dinâmico, seja por ação da própria natureza ou devido a atividades antrópicas, a atualização de uma carta náutica deve ser uma preocupação constante. Como complemento à tradicional técnica de levantamento por meio de um ecobatímetro acoplado a embarcações, há a opção de se realizar um LH com o emprego da tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) a partir de aeronaves, por meio de um aerolevante batimétrico por LiDAR (ALB – *Airborne LASER Bathymetry*), que operam com pulsos LASER na região verde do espectro eletromagnético. Considerando este contexto, este trabalho analisou as diferenças entre informações obtidas por estas duas técnicas, com vistas à avaliação do potencial de aplicação da ALB na atualização de cartas náuticas. Foram utilizados dados levantados no Arquipélago de Fernando de Noronha – PE coletados em 2011, sendo empregadas como referência, informações obtidas no mesmo ano por ecobatímetro multifeixe, estes, constantes no Banco Nacional de Dados Oceanográficos, da DHN. As análises realizadas permitiram estimar o comportamento das discrepâncias de profundidades entre os dois sistemas em diferentes profundidades, relevo e tipos de fundo marinho da região de interesse.

Palavras-chave: *Light Detection And Ranging* (LiDAR), *Airborne LASER Bathymetry* (ALB), *Multibeam Echosounder* (MBES), Incerteza Vertical.

Abstract

A Hydrographic Survey (HS) has as main goal to obtain data for editing and updating nautical documents, these, focused on the safety of navigation. In order to establish a standard of uncertainty parameters for nautical charts, the International Hydrographic Organization (IHO) defines minimum levels of confidence for different orders. The suggestion of these specifications was acknowledged by the Brazilian Navy, institution responsible to produce Brazilian nautical charts, as described in NORMAM-25. One such parameter is the maximum allowed Total Vertical Uncertainty, a quality indicator of the depth measurement. Depth information influences the maximum operational draft for a vessel to safely travel in a region, causing impact on port operations and limiting the commercial transactions. Accurately estimated depths enhance the operational parameters of the ports. Due to the aim of representing a dynamic environment, whether as consequence of the action of nature itself or because of anthropic activities, updating a nautical chart must be a constant concern. As a complement to the traditional survey technique conducted with a boat-coupled echosounder, there is the option of performing a HS using LiDAR (Light Detection And Ranging) technology from aircraft, through LiDAR aerial bathymetry (ALB - Airborne LASER Bathymetry), which operate with LASER pulses in the green region of the electromagnetic spectrum. Considering these points, this work analyzed the differences between the information obtained by these two techniques, with an aim to evaluate the ALB's potential of application to update nautical charts. Data were acquired in the Archipelago de Fernando de Noronha in 2011, while the reference dataset was obtained in the same year by a multibeam echosounder campaign, which is stored in a Brazilian Navy's oceanographic database. The evaluations allowed to estimate the dynamic of the depth discrepancies between the two systems in different depths, relief and seafloor composition in the area of interest.

Key-words: Light Detection And Ranging (LiDAR), Airborne LASER Bathymetry (ALB), Multibeam Echosounder (MBES), Vertical Uncertainty.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacidades de levantamento de um sistema ALB.	17
Figura 2 – Conceito geral da operação de um sistema ALB.	20
Figura 3 - Onda de retorno do pulso verde.	23
Figura 4 – Forma da onda de retorno.	24
Figura 5 – Geometria da Correção da Refração na Interface Ar/Água	26
Figura 6 – Dados de uma ficha da Estação maregráfica da Baía de Santo Antônio, Arquipélago de Fernando de Noronha.	30
Figura 7 – Referencias verticais em um aerolevanteamento batimétrico.	31
Figura 8 – Diagrama de referenciais verticais em um aerolevanteamento LiDAR.	33
Figura 9 - Varredura de um MBES a cada emissão de pulso.	34
Figura 10 - Geometria dos pulsos transmitido e recebido e da área ensonificada por um ecobatímetro multifeixe.	35
Figura 11 – Forma de onda de retorno para um feixe nadiral e outro deslocado de θ graus do nadir. É possível notar o volume de resposta mais espalhado do feixe lateral.	36
Figura 12 - Canal receptor subdividido para a detecção do fundo por medida de fase.	37
Figura 13 – Comparação da detecção por fase e amplitude de feixes no nadir e lateral.	38
Figura 14 – Comparação da eficiência de cobertura do solo marinho entre um sistema LiDAR e um MBES.	41
Figura 15 – Área do Levantamento Topobatimétrico LiDAR no Arquipélago de Fernando de Noronha.	49
Figura 16 – Principais componentes do sistema SHOALS-1000T.	50
Figura 17 – Aeronave empregada no aerolevanteamento LiDAR.	52
Figura 18 – Extrato da carta náutica com a região da Enseada de Santo Antônio (profundidades em metros e décimos de metros).	52
Figura 19 – Visualização do posicionador (a), marco-testemunho (b) e localização no Arquipélago (c) da estação em terra ocupada.	53
Figura 20 – Área planejada para o levantamento MBES.	54
Figura 21– Ficha da Estação Maregráfica com posicionamento da régua utilizada em 2011.	55
Figura 22 – Superfície de Interpolação dos Dados LiDAR com células de 4 m.	58
Figura 23 – Superfície interpolada com a presença das embarcações no momento do aerolevanteamento (a). Em (b) e (c), nota-se barcos pesqueiros e de esporte e recreio próximos ao quebra-mar.	59

Figura 24 – Visualização do cálculo analítico da incerteza vertical amostral dos pontos LiDAR em um dado intervalo de profundidades.....	63
Figura 25 – Nuvem de pontos LiDAR e TIN com dados MBES correspondentes (a) e pontos LiDAR e TIN projetados sobre o plano XY (b).	64
Figura 26 – Extrato de superfície TIN com exemplo de vetor normal ao plano de um determinado triângulo.....	65
Figura 27 – Projeção do vetor V no plano XY e sua inclinação ϕ em relação ao eixo vertical.	66
Figura 28 – Trechos de sobreposição lateral de varreduras.	67
Figura 29 – Exemplo de feriados (células sem dados) circulados em preto, no trecho 1	67
Figura 30 – Áreas dos trechos 1 e 5, conforme Tabela 3, destacadas em vermelho.	68
Figura 31 – Área dos trechos 19, 21 e 24, conforme Tabela 3, destacada em vermelho.	69
Figura 32 – Visualização de trecho com sobreposição de duas (a) e de quatro faixas (b).	70
Figura 33 – Histograma das discrepâncias verticais.....	72
Figura 34 – Distribuição dos trechos de pior cobertura do solo (a) e dos pontos com discrepância maiores que 1 m e menores que -1 m, em laranja (b).	74
Figura 35 – Variogramas das variâncias médias de 1 a 25 m de profundidade.	75
Figura 36 – Variogramas das variâncias médias de 25 a 48,59 m de profundidade.	76
Figura 37 – Regiões com correlação moderada compreendendo pontos de discrepâncias maiores que 1 m (a) e porções analisadas (circuladas em verde) (b).	80
Figura A.1 – Linhas de voo planejadas.....	91
Figura A. 2 – Detalhe das linhas de voo planejadas (em vermelho) paralelamente às isobatimétricas na enseada de Santo Antônio.....	92
Figura A. 3 – Imagem mostrando o coeficiente de atenuação difusa, para $\lambda = 490$ nm (K490) na região de Fernando de Noronha.....	93
Figura A. 4 – Fluxo do processamento dos dados SHOALS.	96
Figura A. 5 – Exemplo de disposição das linhas de sondagem MBES executadas.	98
Figura A. 6 – Crescimento da incerteza com aumento do raio de influência.....	101
Figura A. 7 – Critério de corte baseada na distância à sondagem.	101
Figura A. 8 – Análises das sondagens com manutenção da hipótese inicial (a) ou geração de uma nova hipótese (b).	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de Classificação de Levantamentos Hidrográficos.....	39
Tabela 2 – Características técnicas nominais do sistema SHOALS-1000T.....	51
Tabela 3 – Trechos de sobreposição com maiores ocorrências de feriados.....	68
Tabela 4 – Percentual de células sem dados em trechos com sobreposição de duas faixas.....	70
Tabela 5 – Percentual individual de feriados em trechos em que houve sobreposição, para toda a área de trabalho.....	71
Tabela 6 – Análise das diferenças com todos os dados, incluindo os pontos espúrios.....	72
Tabela 7 – Análise das diferenças sem os pontos espúrios ($\mu \pm 1,96\sigma$).....	73
Tabela 8 – Avaliação das incertezas amostrais calculadas para os dados LiDAR.....	77
Tabela 9 – Coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre as discrepâncias verticais e o gradiente do solo.....	79
Tabela 10 – Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre discrepância vertical e gradiente do fundo em trechos com discrepâncias maiores que 1 m.....	81
Tabela A. 1 – Informações pós- processamento do Sistema SHOALS-1000T em ASCII.....	96

SIGLAS

ADCP	– <i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
ALB	– <i>Airborne LASER Bathymetry</i>
BNDO	– Banco Nacional de Dados Oceanográficos
CASI	– <i>Compact Airborne Spectrographic Imager</i>
CGVD	– <i>Canadian Geodetic Vertical Datum</i>
CNUDM	– Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar
CPRM	– Companhia de Pesquisa de Recursos Mineralógicos
CUBE	– <i>Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator</i>
DAViS	– <i>Download, Autoprocessing, and Visualization Software</i>
DGPS	– <i>Differential Global Positioning System</i>
DHN	– Diretoria de Hidrografia e Navegação
DOA	– <i>Direction of Arrival</i>
FFT	– <i>Fast Fourier Transform</i>
FOV	– <i>Field-of-View</i>
FPI	– Fugro Pelagos Inc
GCS	– <i>Ground Control System</i>
GNSS	– <i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GWR	– <i>Geographically Weighted Regression</i>
HAPS	– <i>Hydrographer Accessible Parameters</i>
IGS	– <i>International GNSS Service</i>
IHT	– Incerteza Horizontal Total
IVT	– Incerteza Vertical Total
IMU	– <i>Inertial Measurement Unit</i>
IPT	– Incerteza Propagada Total
IR	– Infravermelho
ITRF	– <i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS	– <i>International Terrestrial Reference System</i>
KED-LN	– <i>Kriging with an External Drift – Local Neighbourhood</i>
KGPS	– <i>Kinematic Global Positioning System</i>
LH	– Levantamento Hidrográfico
LASER	– <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LiDAR	– <i>Light Detection And Ranging</i>

MBES	– <i>Multibeam Echosounder</i>
MAPS	– <i>Management and Planning Software</i>
MDT	– <i>Modelo Digital do Terreno</i>
MODIS	– <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	– <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NAVOCEANO	– <i>Naval Oceanographic Office</i>
NOAA	– <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NORMAM	– <i>Normas da Autoridade Marítima</i>
NR	– <i>Nível de Redução</i>
OHI	– <i>Organização Hidrográfica Internacional</i>
OTF KGPS	– <i>On-the-Fly Kinematic Global Positioning System</i>
ONU	– <i>Organização das Nações Unidas</i>
PEPS	– <i>Project Environmental Parameters</i>
PMT	– <i>Photomultiplier Tubes</i>
PPK	– <i>Post Processed Kinematic</i>
RN	– <i>Referência de Nível</i>
RTK	– <i>Real Time Kinematic</i>
SBET	– <i>Smoothed Best Estimate of Trajectory</i>
SD	– <i>Secchi Depth</i>
SHOALS	– <i>Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey</i>
SVLA	– <i>Sistema de Varredura a LASER Aerotransportado</i>
TIN	– <i>Rede Irregular de Triângulos</i>
TOA	– <i>Time of Arrival</i>
TPU	– <i>Total Propagated Uncertainty</i>
UTM	– <i>Universal Transversa de Mercator</i>
VDOP	– <i>Vertical Dilution of Precision</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	16
1.3 OBJETIVOS	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 SISTEMA DE VARREDURA A LASER BATIMÉTRICO	19
2.2 HISTÓRICO DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO POR LiDAR.....	20
2.3 DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE EM UM SISTEMA ALB	21
2.3.1 <i>Localização da Superfície da Água</i>	21
2.3.2 <i>O Efeito da Refração</i>	25
2.3.3 <i>Influências do Ambiente Aquático</i>	27
2.3.4 <i>Referenciais Verticais</i>	28
2.3.5 <i>Posicionamento KGPS com Solução On-the-fly</i>	31
2.4 ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE	33
2.4.1 <i>Aspectos de um Sistema Acústico Multifeixe</i>	33
2.4.2 <i>Detecção do Fundo</i>	36
2.4.3 <i>Incerteza Propagada Total em Sondagens Multifeixe</i>	38
2.4.4 <i>Capacidades e Limitações de um MBES</i>	40
2.5 SISTEMAS DE LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO PASSIVOS	41
2.6 APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA ALB EM LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS.....	44
2.7 OUTRAS CONTRIBUIÇÕES DE SISTEMAS LASER BATIMÉTRICOS AEROTRANSPORTADOS	46
3 MATERIAIS E METODOLOGIA.....	49
3.1 <i>Aerolevanteamento Topobatimétrico LiDAR</i>	49
3.1.1 <i>Especificações do Sistema SHOALS-1000T</i>	50
3.1.2 <i>Aquisição dos Dados LiDAR</i>	51
3.2 LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO POR MBES	54
3.3 METODOLOGIA EMPREGADA.....	56
3.3.1 <i>Análise da Cobertura do Aerolevanteamento LiDAR</i>	57
3.3.2 <i>Verificação da Incerteza Vertical das Amostras com Exclusão de Outliers</i>	58
3.3.3 <i>Correlação das Discrepâncias Verticais com o Relevo Marinho</i>	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1 ANÁLISE DA COBERTURA DO AEROLEVANTEAMENTO LiDAR	67
4.2 VERIFICAÇÃO DA INCERTEZA VERTICAL DAS AMOSTRAS COM EXCLUSÃO DE <i>OUTLIERS</i> .	71
4.3 CORRELAÇÃO DAS DISCREPÂNCIAS VERTICAIS COM O RELEVO MARINHO.....	78
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	82

REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE A - ETAPAS DE LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS LIDAR E MBES	90
A.1 PLANEJAMENTO DO AEROLEVANTAMENTO LIDAR.....	90
A.2 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA SHOALS	93
A.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS LIDAR.....	95
A.4 PLANEJAMENTO DO LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO POR MBES.....	97
A.5 DADOS ADQUIRIDOS POR MBES.....	98
A.6 PROCESSAMENTO DAS INFORMAÇÕES MBES	99
APÊNDICE B – PROGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DO GRADIENTE DO TERRENO PARA AS COORDENADAS DOS PONTOS ALB COM BASE EM DADOS MBES DE REFERÊNCIA.....	104

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Conforme definido por Miguens (1996), assim como um mapa, uma carta se trata de um documento representativo da superfície. Todavia, uma carta pode ser usada como ferramenta para a obtenção de informações nas quais as medições de ângulos e distâncias ou a determinação de um ponto por coordenadas possuem papel central. Nas atividades de navegação aquaviária, os documentos cartográficos oficiais empregados são denominados cartas náuticas (DHN, 2017).

Produzidas com o objetivo de prover primordialmente segurança às atividades de navegação, as cartas náuticas são um dos produtos de um Levantamento Hidrográfico (LH). A qualidade das informações constantes em uma carta dependerá preponderantemente do quão preciso foi o LH que a balizou.

A confiança na utilização de uma carta náutica influencia a derrota de navios, tornando suas jornadas maiores, ou mais curtas, na medida que afetam decisões como na de qual porto será demandado pela embarcação. Associada a esse fator, a acurácia na definição da profundidade da região a ser transitada impactará no risco associado ao carregamento de mercadorias e, por conseguinte, no custeio do transporte das cargas. Soma-se também a importância dos documentos náuticos no gerenciamento de zonas costeiras, como na definição da construção de novos terminais portuários, na realização de obras de dragagens, controle de erosões e em atividades relacionadas à sustentabilidade da atividade econômica da região próxima à costa (OHI, 2010).

Tomando-se como base dados coletados sob a mesma sistemática, nações costeiras obtiveram pareceres favoráveis ao reclamarem direitos econômicos sobre a plataforma continental além das 200 milhas náuticas junto à Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM) (OHI, 2016). Deste modo, a possibilidade de explorar os recursos marinhos de tais extensões garante grandes potenciais de desenvolvimento econômico a um país.

Afora os aspectos da sociedade civil citados, encontra-se a relevância na defesa marítima. Documentos náuticos confiáveis são de extrema importância para o cumprimento de operações navais, como no transporte de cargas sensíveis, avaliação das capacidades de manobra e na negação de espaços a forças inimigas, tanto em ambiente acima, quanto abaixo da superfície d'água.

1.2 Contextualização do Problema

De acordo com o que é definido pelas Normas da Autoridade Marítima-25 (NORMAM-25), publicada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), um LH é composto por diversas atividades e visa a obtenção de informações de variada natureza. Estão entre elas dados batimétricos, geológicos, maregráficos, fluviométricos, topo-geodésicos, oceanográficos e geofísicos, que podem ser coletadas em áreas marítimas, fluviais, lacustres e em canais naturais ou artificiais, navegáveis ou não, que não tenham como finalidade a pesquisa pura e a investigação científica.

Por ser um dos produtos de um LH e visar oferecer a devida segurança ao navegante, uma carta náutica deve informar de maneira acurada a extensão e magnitude dos perigos à navegação. A avaliação do quão acurado e preciso é um determinado produto depende da execução de algumas tarefas envolvidas em um LH, as quais devem seguir o que é instituído pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI). A OHI possui dentre os seus objetivos, o de estabelecer uniformidade de parâmetros às informações, produtos, serviços e técnicas relacionadas às atividades de hidrografia (OHI, 2016).

Por meio da publicação S-44, são sugeridos pela OHI os índices mínimos de incerteza, recobrimento de áreas e identificação de feições. Tais índices são considerados para a classificação de levantamentos hidrográficos nas ordens Especial, 1A, 1B e 2. A sugestão dessas especificações é então internalizada pelos serviços hidrográficos de cada país de forma discricionária. No caso da Marinha do Brasil, instituição responsável pela produção das cartas náuticas brasileiras por meio do seu serviço hidrográfico, a DHN, os parâmetros adotados se encontram descritos na NORMAM-25.

Dentre essas especificações, encontra-se a Incerteza Vertical Total (IVT), a qual corresponde à confiança da definição da profundidade de um local a ser considerada pelo navegante. Item de grande importância em uma carta náutica, a informação de profundidade afeta diretamente no calado máximo permitido a uma embarcação para transitar em uma determinada região com segurança.

Por retratarem um ambiente em constante modificação por ação da própria natureza ou devido a atividades antrópicas, a atualização das informações de uma carta náutica deve ser uma preocupação constante. Da mesma forma, a tecnologia envolvida na coleta dos dados tem evoluído de maneira a tornar a realização de um LH cada vez mais eficiente. A forma mais disseminada de aquisição de informações batimétricas para a atualização cartográfica náutica é aquela com emprego de ecobatímetros acoplados a embarcações (OHI, 2010). Esse tipo de

operação oferece importantes desafios às equipes de campo. Dentre eles, está a navegação em áreas de locomoção restrita, sujeita a perigos como a proximidade de pedras submersas, faixas de arrebentação e por muitas vezes, o deslocamento em regiões ainda não cartografadas. Ademais, é possível citar a menor eficiência desse modal de coleta em regiões de baixa profundidade, onde o alcance lateral da varredura de um ecobatímetro multifeixe decresce sensivelmente (LAROCQUE e WEST, 1999).

De maneira a complementar as capacidades de pesquisa de um ecobatímetro, há a opção de se realizar um levantamento batimétrico com emprego da tecnologia LiDAR (*Light Detection And Ranging*) a partir de aeronaves. Com suas específicas limitações de operação, o aerolevanteamento batimétrico por LiDAR (ALB – *Airborne LASER Bathymetry*), pode gerar dados de profundidade de largas áreas em menor tempo e realizar o mapeamento de regiões críticas, não alcançáveis por um ecobatímetro instalado em uma embarcação. Há sistemas também capazes de efetuar o mapeamento simultâneo tanto sob água, como acima da superfície e assim, de gerar mapas topobatimétricos, como pode-se ver na Figura 1, extraída de Banic e Cunningham (1998).

Figura 1 – Capacidades de levantamento de um sistema ALB.



Fonte: Banic e Cunningham (1998) .

Além de cartas náuticas, podem ser citados como produtos da ALB, o monitoramento de estruturas submersas por parte da engenharia civil, a evolução do fundo arenoso, conhecida como *sandwaves*, e o manejo e exploração de recursos marinhos (GUENTHER, 2007).

1.3 Objetivos

Em razão do dinamismo do ambiente retratado por uma carta náutica, seja ele causado pela ação humana ou por ocorrências naturais, a busca por tecnologias eficazes que mantenham esses documentos atualizados é uma constante. A capacidade da ALB de cobrir largas áreas em menor tempo e alcançar regiões perigosas ao acesso por embarcações oferece considerável eficiência à condução de um LH. Dessa forma, a aplicação de informações adquiridas por um sistema LiDAR dessa natureza na produção de cartas náuticas pode conferir maior celeridade à edição de documentos náuticos seguros aos navegantes.

O foco principal desse trabalho consiste em investigar o potencial de aplicação da tecnologia LiDAR para a atualização de cartas náuticas à luz de parâmetros internacionais de qualidade. Serão tomados como base, um aerolevanteamento LiDAR topobatimétrico e um levantamento hidrográfico por ecobatímetro multifeixe realizados no Arquipélago de Fernando de Noronha – PE.

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Analisar a capacidade de cobertura do solo marinho por meio de dados obtidos por um sistema LiDAR batimétrico, conforme especificações *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA);
- Verificar a acurácia vertical dos dados LiDAR comparando-os a sondagens realizadas por ecobatímetro multifeixe;
- Analisar a precisão relativa das informações LiDAR de profundidade; e
- Verificar a existência ou não de correlação entre a acurácia vertical obtida e o gradiente do solo marinho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sistema de Varredura a LASER Batimétrico

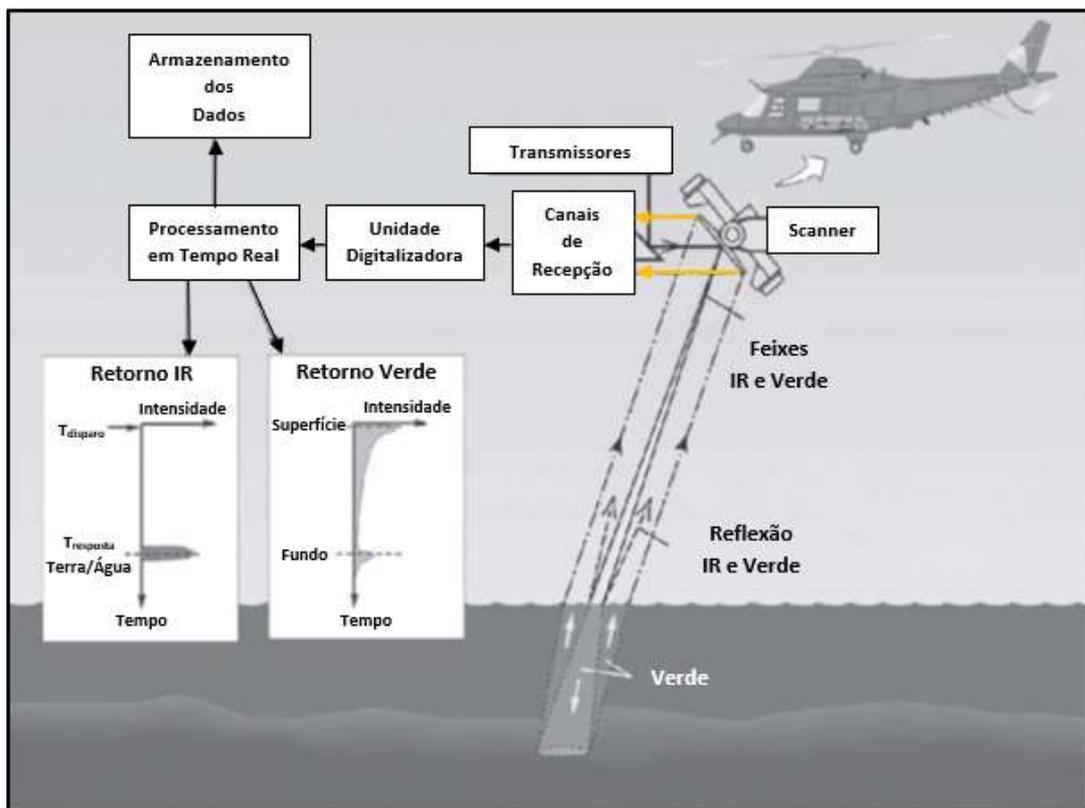
Assim como nos sistemas acústicos, em um Sistema de Varredura a LASER, a energia emitida é gerada pelo próprio sistema, o que permite classificá-lo como um sistema ativo. Um levantamento realizado por LiDAR se pauta no princípio de medições de distâncias com base na contagem do tempo compreendido entre a emissão de um pulso e a recepção do seu retorno.

O princípio de funcionamento da ALB é análogo aos sistemas de varredura a LASER aerotransportados (SVLA) convencionais, aplicados em levantamentos topográficos. Conforme descrito por Toth e Shan (2008), um SVLA se trata de um sistema de coleta dotado de uma unidade de varredura a LASER, sistema de posicionamento e orientação e uma unidade de controle e processamento de dados. O conjunto de varredura é composto por uma unidade emissora de pulsos LASER, de um espelho de varredura, um receptor e um contador de tempo. O posicionamento é feito com uso de um DGPS (*Differential Global Positioning System* - Sistema de Posicionamento Global Diferencial) que atua de modo sincronizado com uma unidade de medida inercial (IMU – *Inertial Measurement Unit*), esta, capaz de estimar os ângulos de atitude da aeronave, além de contribuir reciprocamente para a correção dos erros do DGPS.

Guenther (2007) define ALB como uma técnica de medição de profundidades em águas moderadamente claras, próximas à costa ou lagos a partir de pulsos LASER emitidos de uma plataforma aerotransportada. A principal diferença do ALB em relação ao SVLA reside na emissão de pulsos em diferentes frequências. De acordo com Guenther *et al.* (2000), em um sistema ALB, são emitidos feixes nas faixas do infravermelho (1064 nm) e do verde (532 nm).

A emissão do pulso verde permite que ocorra a penetração do feixe na água, uma vez que esse comprimento de onda é o que sofre a menor atenuação ao ser retroespalhado ao longo da coluna d'água (JERLOV, 1976). Já o LASER na faixa do infravermelho (IR) possui muito pouca penetração na água e é utilizado para auxiliar na determinação da localização da superfície da água. Na Figura 2, pode-se observar um exemplo do conceito geral de operação de um sistema ALB.

Figura 2 – Conceito geral da operação de um sistema ALB.



Fonte: Adaptado de Toth e Shan (2008).

2.2 Histórico do Levantamento Batimétrico por LiDAR

O uso da tecnologia LASER para a obtenção de dados abaixo d'água teve início na década de 1960 (HICKMAN e HOGG, 1969). Inicialmente com propósito militar, foi utilizada com o objetivo de localizar embarcações submarinas (GUENTHER *et al.*, 2000). No início da década seguinte, passou-se a testar esse tipo de operação aplicada ao mapeamento costeiro, especialmente nos Estados-Unidos, Canadá e Austrália. Paralelamente, houve o emprego de sistemas LiDAR por parte da União Soviética (IVANOV, 1972) e também no Canadá (CARSWELL e SIZGORIC, 1973), onde foram usadas embarcações como plataformas de coleta.

Nos anos 1980, tornaram-se operacionais os primeiros sistemas construídos para levantamentos hidrográficos. Nessa época, houve o desenvolvimento e aplicação de sistemas com apoio de programas governamentais das nações pioneiras, agora também com pesquisas feitas pela Suécia.

A década de 1990 experimentou um avanço para a operação de sistemas LASER a partir de aeronaves de asa fixa e não mais somente de helicópteros (IRISH e LILLYCROP, 1999). A

frequência de repetição de pulso foi aumentada, gerando maior densidade de dados. O uso do posicionamento cinemático passou a permitir o mapeamento topográfico em conjunto com o batimétrico, sendo observado o aumento na demanda de levantamentos dessa natureza por diversos países.

A partir de 2000, houve uma diversificação dos produtos gerados a partir da batimetria LiDAR. O foco em pesquisas sobre as influências do ambiente de operação sobre a atenuação dos feixes permitiu um maior entendimento do efeito da coluna d'água no alcance máximo dos sistemas (PE'ERI *et al.*, 2011). Foram estudados também parâmetros para a classificação da natureza do fundo marinho utilizando a intensidade da resposta obtida após a detecção do solo abaixo da água (WANG e PHILPOT, 2007).

O progresso recente dos sistemas dessa natureza permitiu o aumento da densidade das informações geradas. Com isso, a ALB passou a não mais se limitar a áreas costeiras, mas também ao mapeamento de regiões lacustres, topografia de rios e outros corpos d'água interiores (PFENNIGBAUER, 2011; STEINBACHER e PFENNIGBAUER, 2010). Nos últimos anos, pesquisas tem se dedicado a avaliar a conveniência do uso exclusivo da resposta do feixe verde para a determinação da superfície da água (MANDLBURGER *et al.*, 2013).

2.3 Determinação da Profundidade em um Sistema ALB

A capacidade de detectar o fundo marinho por si só, não torna um sistema ALB hábil a definir corretamente a profundidade de um ponto. Além da acurácia inerente ao sistema, a qual depende de diferentes componentes (unidade LASER, receptor GNSS e IMU), também é relevante considerar os parâmetros ambientais que influenciam a acurácia da informação. Dessa forma, são de crucial importância a localização da interface ar/água, com a identificação da detecção da superfície d'água na forma da onda de retorno; o devido efeito da refração nas mudanças do meio de propagação dos feixes; e as características presentes na coluna d'água. Por fim, a informação da elevação colhida deve ser ligada a um referencial vertical, determinado de acordo com os objetivos a que se destina o levantamento.

2.3.1 Localização da Superfície da Água

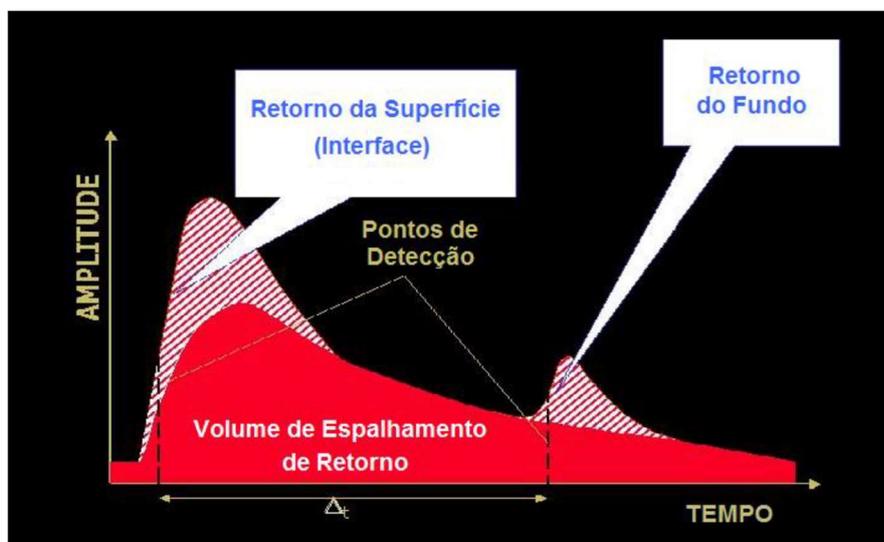
Para a determinação da profundidade de um local, faz-se necessária a localização da superfície da água em relação à aeronave no momento da emissão do feixe. Para calcular essa distância, um sistema ALB faz uso das propriedades de reflexão e espalhamento dos

comprimentos de onda dos pulsos emitidos. A superfície pode ser percebida pelo receptor de diferentes maneiras em relação à frequência do pulso que a atinge.

Por possuir a capacidade de penetrar na coluna d'água, cerca de 2% da energia na frequência do canal verde incidente na superfície da água pode ser detectada como retorno pelo canal receptor (GUENTHER, 1985). Para que esse sinal seja significativo, é necessário um mínimo regime de ventos ao nível da superfície. Essa intensidade de ventos permite a dissipação da névoa que pode se estabilizar sobre a lâmina d'água e gera ondas capilares, provendo aos feixes fora do nadir uma perpendicularidade com a superfície ao atingi-la. Na ocorrência de ventos excessivos, são provocadas perturbações na água com geração de espumas, borrifos e suspensão de vapor d'água em função de ondas (GUENTHER *et al.*, 1994), fatores que dificultarão a definição da posição da interface ar/água. Essa agitação da água aumenta também a suspensão de sedimentos e gera turbidez na coluna d'água. Em um ambiente mais turvo, é dificultada a propagação do feixe e, conseqüentemente, a detecção do fundo.

Uma outra possibilidade de definição da superfície é a detecção do volume de retorno do pulso verde ao ser retroespalhado pelas partículas presentes na coluna d'água. Um ajuste temporal entre o volume de retorno da coluna e o sinal de detecção da superfície poder ser utilizado na localização da interface ar/água. Todavia, a própria largura de pulso do LASER (5 a 7 ns) causaria ambigüidades e um erro inaceitável no cálculo da profundidade local. Dessa forma, o primeiro retorno do feixe verde pode conter dados da superfície da água, mas também de parcela da porção submersa (MANDLBURGER *et. al*, 2013). Correções da distribuição estatística do modelo da superfície definido pelo comprimento de onda verde em águas calmas e claras podem aproximá-lo daquele gerado pelo infravermelho. Todavia, essas comparações sofreriam sensível alteração se feitas em um ambiente com ondulações e com maior turbidez (ZHAO, 2017), como o observado em águas costeiras. Na Figura 3, é exibida a amplitude da onda de retorno do pulso verde ao longo do tempo. Pode-se notar o instante da resposta referente à superfície (pico de maior amplitude), bem como o sinal de retorno da coluna d'água e o do fundo. A ambigüidade está presente na definição da origem do sinal de retorno, o que dificulta o posicionamento da superfície da água.

Figura 3 - Onda de retorno do pulso verde.

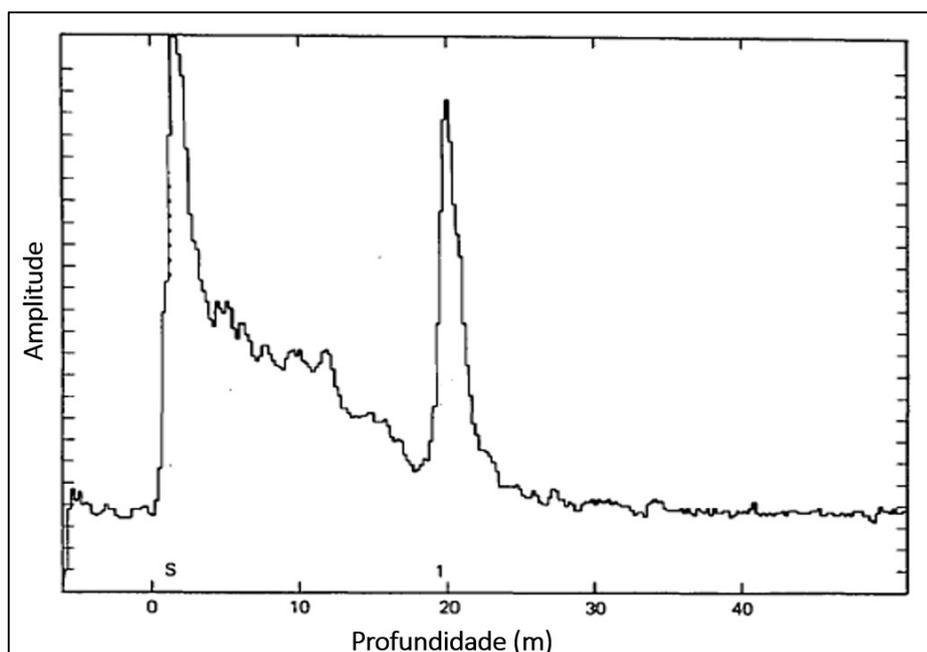


Fonte: CPRM (2014) adaptado de Guenther (2000)

Pelo fato de possuir uma atenuação na água de 50 a 100 vezes maior do que o feixe na faixa do verde (TYLER e PREISENDORFER, 1962), o pulso em IR não gera sinais referentes ao volume da coluna d'água. Com isso, o posicionamento da interface ar/água com emprego do sinal IR é feito considerando-se somente a resposta proveniente da reflexão de superfície, o que evita a ambiguidade possível de ocorrer no retorno do feixe verde.

Na Figura 4, encontra-se um sinal de resposta onde é facilmente detectado o instante da determinação da superfície (reta que passa por “s”) e, por conseguinte, da detecção do fundo (reta que passa por “1”). O sinal apresentado na ilustração considera um ganho constante por parte do fotomultiplicador do sistema.

Figura 4 – Forma da onda de retorno.



Fonte: Adaptado de Billard e Wilsen (1986).

Como última alternativa para a definição da altura da superfície, há a utilização da resposta do canal Raman. Este canal faz uso do retorno produzido pelo espalhamento inelástico da onda verde ao longo da coluna d'água. Ao ultrapassar o limiar ar/água, a onda interage com as moléculas presentes na água e passa a ter uma parcela retransmitida em uma nova frequência do espectro, na faixa do vermelho (647 nm). Com o ajuste temporal da resposta percebida pelo receptor Raman, é possível determinar a ocorrência do retorno referente somente à coluna d'água. Este procedimento possui, portanto, a vantagem de não gerar ambiguidades, como por exemplo, pela presença de névoa sobre a água ou borrifos gerados pela ondulação. Tampouco há a incerteza em função da largura de pulso do feixe (GUENTHER *et. al*, 1994). Todavia, por ser um canal de sensibilidade ao volume do espalhamento sob a superfície, sofre grande influência das condições de turbidez e de partículas em suspensão na água.

Conforme destacam Guenther *et. al* (2000), há sistemas de ALB que fazem uso dos três canais de recepção, estabelecendo uma ordem prioritária para a detecção do sinal da superfície. Caso a intensidade percebida por um determinado canal receptor não seja atingida, a resposta detectada pelo próximo canal, caso suficiente, será a considerada.

2.3.2 O Efeito da Refração

Durante a medição da profundidade de um local, a energia eletromagnética gerada pelo sistema ALB se propaga pelo ar e ao longo da coluna d'água, meios nos quais um feixe luminoso é transmitido com distintas características. Em virtude disto, erros sistemáticos decorrentes da mudança do índice de refração presente na interface ar/água devem ser compensados, tal qual se observa na fotogrametria digital de superfícies submersas (BUTLER *et al.*, 2002).

De acordo com a Lei de Snell, os índices de refração (n_w e n_a) na passagem de uma onda de um meio (a) para o meio (w), se relacionam com os ângulos de incidência (θ_a) e o ângulo refratado (θ_w), de acordo com a Equação 1.

$$\frac{n_w}{n_a} = \frac{\text{sen}\theta_a}{\text{sen}\theta_w} \quad (1)$$

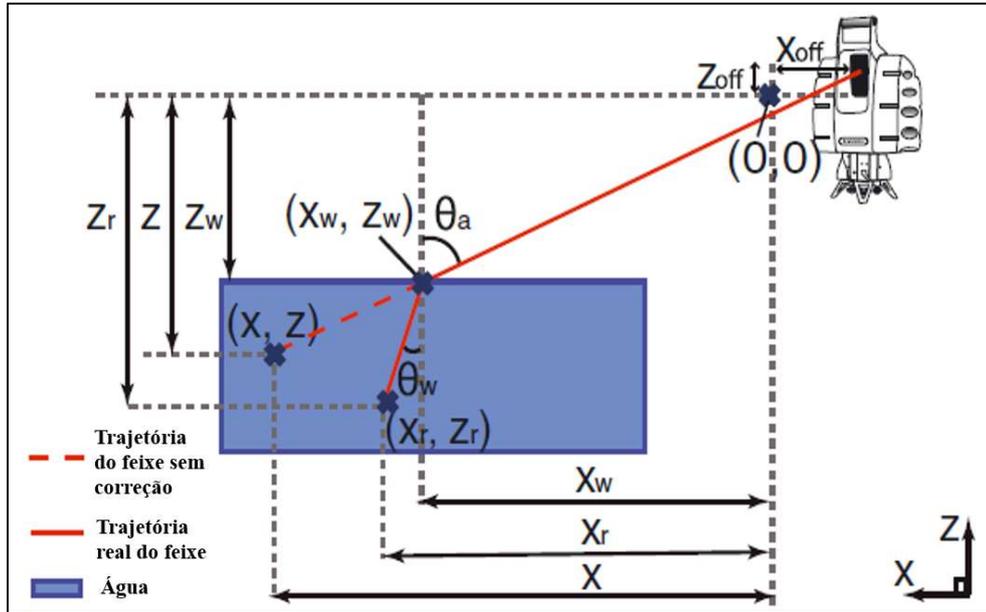
A consideração do efeito da refração se mostra importante na ALB devido à característica da varredura realizada, com ângulos de incidência dos feixes LASER tipicamente oblíquos à superfície do mar. Daimon e Masumura (2007) com uso de uma célula em prisma contendo água destilada, mediram o índice de refração da luz na passagem do ar para água em diferentes temperaturas, atingindo para uma onda de 532 nm, um valor de $n = 1,33538$. Tal valor, sofre alteração menor que 1% para uma extensa faixa de variação de temperatura e salinidade (JERLOV, 1976).

A desconsideração dos efeitos refrativos introduz erros de magnitude semelhante à profundidade informada (MILAN *et al.*, 2007), causando efeitos que devem ser corrigidos individualmente a cada feixe que atinge a superfície da água. Descrita por (SMITH *et al.*, 2012), a Figura 5 ilustra tal efeito. De maneira a simplificar os cálculos, são utilizadas coordenadas polares, com a origem do sistema arbitrário (0,0) deslocada em relação ao ponto de emissão do feixe (X_{off} e Z_{off}). A posição aparente (X,Z) é considerada como aquela onde o solo seria detectado sem a aplicação de qualquer correção à trajetória do feixe.

Ainda conforme Smith *et al.* (2012), o efeito da refração, decorrente da transição entre os meios ar e água e vice-versa (retorno do sinal), provoca o deslocamento do ponto aparente em duas componentes. Há o afastamento em relação à origem em razão da alteração do tempo de viagem do feixe no novo meio, e ainda, um acréscimo de elevação à coordenada em função da desconsideração do desvio do eixo de propagação. Assim, a medição errônea informa uma

posição mais elevada e mais distante do emissor em comparação ao ponto de fato detectado (X_r, Z_r) .

Figura 5 – Geometria da Correção da Refração na Interface Ar/Água



Fonte: Adaptado de Smith *et al.* (2012)

Considerando-se (X_w, Z_w) as coordenadas do ponto de contato com o feixe na superfície, θ_a como o ângulo de incidência na interface, θ_w , o de refração durante a propagação na água e n o índice de refração dado pela relação descrita na Equação 1, pode-se calcular, de acordo com Smith *et al.* (2012) as reais coordenadas do ponto detectado no fundo por meio das Equações 2 e 3.

$$X_r = \frac{X - X_w}{n^2} + X_w \quad (2)$$

$$Z_r = \frac{\cos\theta_w(X - X_w)}{n \sin\theta_a} + Z_w \quad (3)$$

2.3.3 Influências do Ambiente Aquático

Dentre os fatores ambientais que limitam a profundidade de detecção do fundo, a maior influência ocorre por parte da claridade da água (GUENTHER e GOODMAN, 1978).

Uma técnica muito difundida de medição da transparência da água é o emprego do Disco de Secchi e a determinação a Profundidade de Secchi (SD ou Z_{SD})¹. De forma geral, espera-se que um sistema ALB consiga medir o solo marinho a duas ou três profundidades de Secchi (GUENTHER, 2007). Essa faixa de variação existe pelo fato de o Disco de Secchi não medir os parâmetros que afetam a capacidade de penetração do LASER verde, sendo eles, a reflexão e o espalhamento (HILLDALE e RAFF, 2008).

Um parâmetro de estimação da claridade da água é o coeficiente de atenuação difusa (K). Trata-se de um fator exponencial da perda de energia de uma onda em uma determinada frequência com o aumento da profundidade (GORDON *et al.*, 1975). O nível de pico da onda de retorno sofre uma diminuição de maneira ligeiramente mais intensa em função do aumento da profundidade do que devido à compressão do pulso causada pelo retroespalhamento (GUENTHER, 1985). Os valores de K se encontram em uma escala que varia entre $0,1 \text{ m}^{-1}$, correspondente à água clara, até 10 m^{-1} , referente à água turva.

Outro indicador das condições do ambiente de propagação do sinal no comprimento de onda do verde é o coeficiente de atenuação do feixe (c). Definido como o somatório dos índices de absorção e espalhamento da coluna d'água, é usado para estimar a massa ou volume da concentração de partículas em um ambiente aquático (BAKE e LAVELLE, 1984).

Conforme (TIMOFEYEVA e GOROBETS, 1967), a relação K/c para o LASER na faixa do verde se situa entre 1/6 e 1/2 para águas costeiras, a depender da relação de espalhamento/absorção da área levantada. Quando a energia que retorna ao sensor for suficiente para que seja integrada pelo sistema, a atenuação observada se aproximará do valor de K (STEINVALL *et al.*, 1993). Já em situações em que isso não ocorrer, o indicador tenderá para c (GORDON, 1982). Isso pode ser alterado em função do campo de visada do sensor (*field-of-view* - FOV²) utilizado. Um FOV estreito, capaz de melhor diferenciar objetos submersos, terá uma profundidade máxima de levantamento menor do que outro de maior abrangência.

Considerando-se os conceitos supracitados, a máxima profundidade esperada em ALB se baseará na relação n/K , onde n é um valor constante. Esse valor de n para um levantamento

¹ Profundidade máxima em que o olho humano pode identificar o Disco de Secchi. Pode ser usada como unidade de claridade da água.

² FOV é o campo de visada que projeta sobre a superfície mapeada, a dimensão mínima detectada na posição em questão.

LiDAR será de 3 ou 4 para operações diurnas e 5 para noturnas (GUENTHER, 1985). Essa diferença ocorre em razão de ruídos provocados pela luz solar.

Dessa maneira, em um planejamento de aerolevanteamento usando um sistema ALB, deve-se realizar um estudo das condições de K da região durante diferentes épocas do ano, contabilizando regimes de marés, descargas fluviais, ocorrência de fenômenos meteorológicos rotineiros, entre outros fatores. Tal procedimento apontará a época do ano mais propícia para uma melhor propagação dos feixes LASER sob a água.

2.3.4 Referenciais Verticais

Conforme definição da OHI (1994) um *datum* geodésico é especificado por meio de um conjunto de parâmetros que determinam uma superfície ou sistema de coordenadas de referência. Estas referências são utilizadas como base para o cálculo de coordenadas de pontos sobre a Terra e são descritos como horizontais e verticais. Os últimos se dividem em três tipos: maregráfico, geodésico e elipsoidal (DODD e MILLS, 2014). A superfície elipsoidal neste caso se refere à superfície matemática e as demais, às físicas.

Nas cartas náuticas publicadas pela DHN, o referencial vertical adotado para a determinação das profundidades é o Nível de Redução (NR) local (FRANCO, 2009 e DHN, 2017). Para a determinação do NR, são utilizados dados de altura da maré registrados ininterruptamente por uma estação maregráfica. Tal estação é composta de marégrafo, régua de altura e de marcos, chamados de referências de nível (RN). Dentre os tipos de marégrafos, há os que registram as alturas de maré com uso de um mecanismo de polia contadora e um conjunto boia e contrapeso, armazenando as variações. Existem ainda marégrafos que operam sem o contato com a água, com uso de um sistema RADAR.

O NR se aproxima do nível médio das menores baixamars³ de sizígia⁴ (FRANCO, 2009) e a altitude do NR determinada em relação ao nível médio do mar é obtida após a expansão em série de Fourier da onda correspondente às alturas de maré observadas. Para essa definição, a DHN estabelece três possíveis métodos (DHN, 2017):

- a) Análise harmônica da maré a partir de observações de uma estação maregráfica nova, por no mínimo 32 dias consecutivos;

³ Baixamar corresponde ao ponto mínimo do nível do mar ao longo de um dia.

⁴ Sizígia é o termo utilizado para se referir ao período de lua cheia ou nova, quando as amplitudes da variação do nível do mar são as maiores.

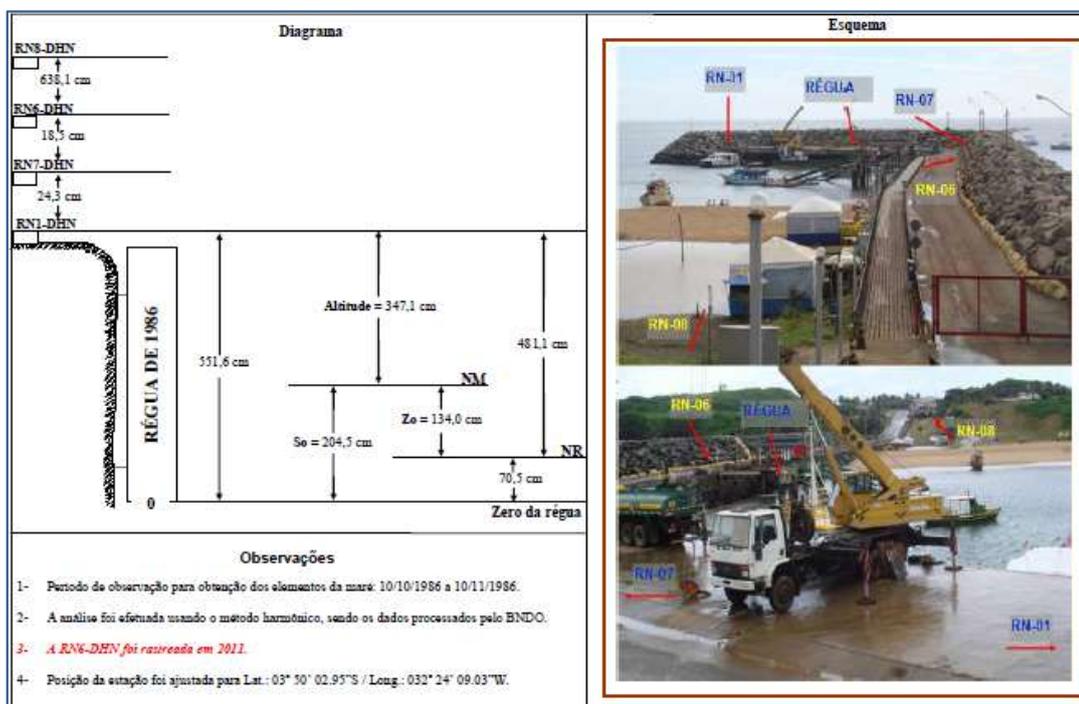
- b) Análise cruzada, com os registros simultâneos em uma estação principal ocupada por no mínimo um ano e outra secundária com características da onda de maré similares (FRANCO, 2009), por um período de 10 dias; ou
- c) Transporte de NR, determinado em uma nova estação a partir de uma principal, com medições por 3 dias em período de sizígia. Este método é aplicável somente para ondas de maré semidiurna⁵ sem desigualdades diárias.

De acordo com Resolução Técnica da OHI, no estabelecimento de uma estação maregráfica, deve-se determinar a elevação elipsoidal de marcos usados nas estações, preferencialmente com base no ITRS (*International Terrestrial Reference System*) ou em outro sistema geodésico com ele coincidente (OHI, 2017). Como definido pela DHN (2017), o rastreamento estático deve ser efetuado sobre a RN mais próxima da posição da régua graduada de medição das alturas de maré. Como passo posterior, um nivelamento geométrico permite determinar o desnível entre as RN e o topo da régua.

Após a análise harmônica da onda de maré, é possível referenciar o NR aos marcos em terra e gerar o diagrama da estação, conforme no exemplo mostrado na Figura 6. Nela, são exibidos o diagrama e referências para localização das RN da ficha da estação maregráfica da Baía de Santo Antônio, Arquipélago de Fernando de Noronha – PE. As fichas das estações maregráficas são publicadas pela DHN, no sítio da internet do Centro de Hidrografia da Marinha.

⁵ Onda de maré que apresenta dois pontos máximos de altura e dois pontos mínimos em um período de 24 horas (FRANCO, 2009).

Figura 6 – Dados de uma ficha da Estação maregráfica da Baía de Santo Antônio, Arquipélago de Fernando de Noronha.



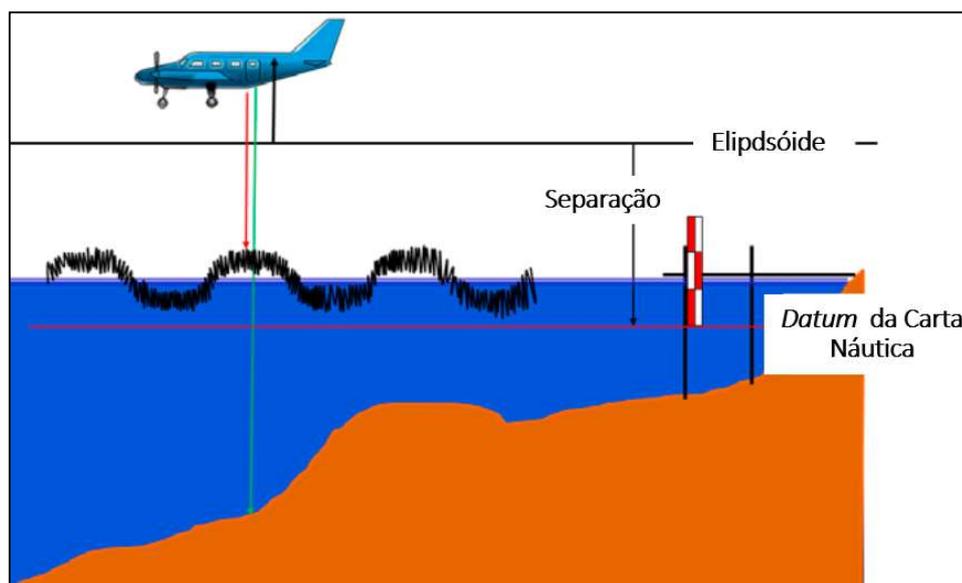
Fonte: DHN (2011)

Dentre os objetivos de aerolevantamentos LiDAR topobatimétricos⁶, pode ser exigida a integração de informações com diferentes *datum*. Coletas por ALB com base no elipsoide possuem a vantagem de relacionar simultaneamente informações topográficas e batimétricas a um mesmo referencial (GUENTHER, 2000).

Dodd e Mills (2014) afirmam que com dados de elevação GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), informações de alturas de maré passam a ser desnecessárias para a redução das profundidades adquiridas. De toda forma, a transposição para o *datum* usado em cartas náuticas exige o conhecimento do modelo de separação entre as superfícies do elipsoide e o do referencial das cartas. Todavia, o emprego de mareógrafos ainda encontra uso na validação desse modelo de diferenças, no controle de qualidade dessas informações e ainda como redundância em eventuais perdas de dados GNSS. A Figura 7 ilustra uma hipotética localização de referenciais durante um aerolevantamento.

⁶ Tipo de levantamento no qual são adquiridas informações topográficas e batimétricas pelo mesmo sistema.

Figura 7 – Referências verticais em um aerolevanteamento batimétrico.



Fonte: Adaptado de Dodd e Mills (2014).

2.3.5 Posicionamento KGPS com Solução *On-the-fly*

Como forma de oferecer uma alternativa à aquisição de dados de maré simultaneamente aos topobatimétricos, tarefa que envolve considerável complexidade logística, há a possibilidade do emprego do processamento KGPS (*Kinematic Global Positioning System*) com solução de ambiguidade de fase. Dentre os sistemas que utilizam essa metodologia, está o SHOALS (*Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey*), versão 1000T, desenvolvido pela empresa Optech e empregado na obtenção dos dados analisados por este trabalho.

O sistema SHOALS possui a possibilidade de gerar soluções de posicionamento em modo cinemático, com uso do GPS e de soluções de ambiguidade de fase *on-the-fly* (OTF KGPS) (GUENTHER *et al.*, 2000).

De acordo com Frodge *et al.* (1994), o uso da solução OTF KGPS permite resolver ambiguidades em até 15 segundos sem a necessidade de inicialização estática e provê acurácia subdecimétrica em tempo real, sendo um método bastante utilizado para posicionamento de aeronaves (KRABILL e MARTIN, 1987). Ao possibilitar a medição de distâncias ao emissor LASER referenciadas ao elipsoide, o uso dessa técnica permite ao SHOALS realizar levantamentos sob a água sem a necessidade de correções de pequenas variações da altura da superfície d'água, pois a medição de profundidades ponto a ponto não necessita da estimação da altura das ondas (CPRM, 2014) e dispensa a aquisição simultânea de informações de maré

(GUENTHER, 2000). Essa capacidade elimina o inconveniente que ocorre quando não é possível dispor de um número de marégrafos suficiente para compor o zoneamento da maré local⁷. Contudo, faz-se necessário um modelo que descreva as diferenças entre o elipsoide e o *datum* vertical utilizado para a produção da carta náutica da região.

Na operação do sistema SHOALS com o OTF KGPS, são necessárias pelo menos duas estações em terra de coordenadas geodésicas conhecidas, com receptores GPS rastreando simultaneamente à aquisição de dados. A comparação dos *time stamps* OTF da aeronave com os das estações-base gera informações de distâncias entre os receptores de terra e o instalado a bordo. A partir da consideração desses vetores, as distâncias LASER coletadas podem gerar valores de elevação elipsoidal do terreno.

De forma a quantificar o nível de confiança da solução OTF, o sistema gera índices de 0 a 99 baseados no valor de σ_z , sendo este, o erro estimado da altitude. O cálculo de σ_z é definido conforme a Equação 4 para um número de satélites menor ou igual a 5 e de acordo com a Equação 5 na presença de mais de 5 satélites.

$$\sigma_z = VDOP \cdot \sqrt{\sigma^2 + \sigma_{DIST}^2} \quad (4)$$

$$\sigma_z = (VDOP)/\sqrt{n} \cdot \sqrt{\Sigma(\sigma_{rms,i}^2)} \quad (5)$$

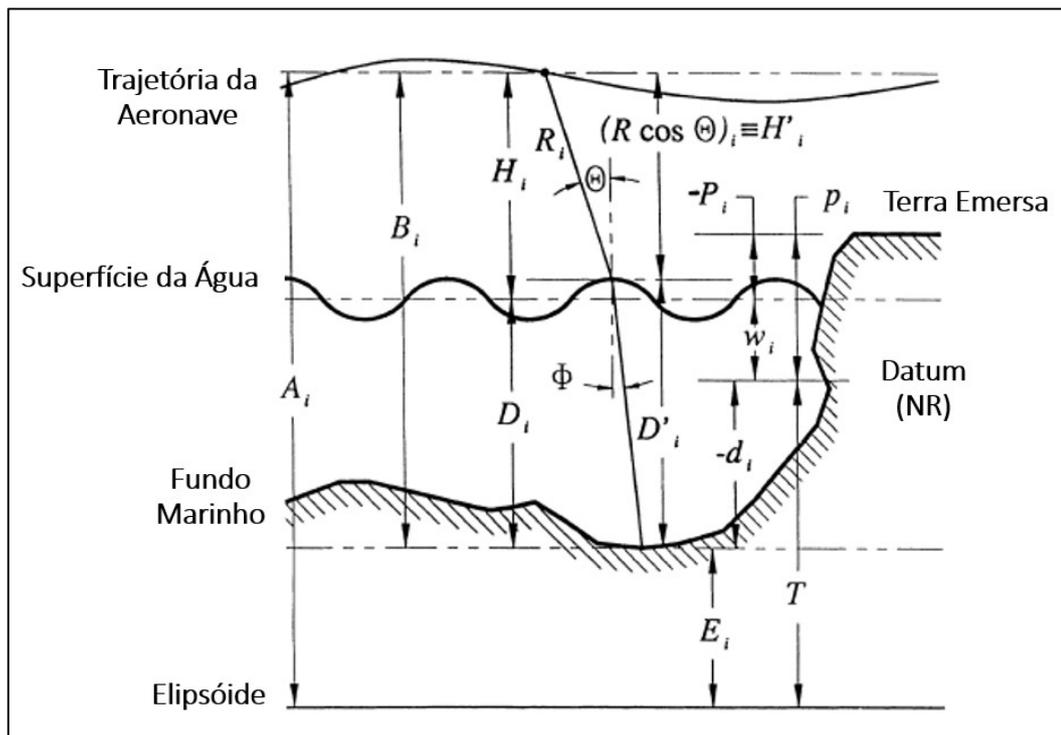
sendo VDOP a diluição vertical da posição e σ , o erro decorrente de ruídos e multicaminhamento, estimado em 1,5 cm e $\sigma_{DIST} = 0,2$ (cm/km) x distância média entre a estação em terra e a posição da aeronave. Na Equação 5, n é o número de satélites e $\Sigma(\sigma_{rms,i}^2)$ é o somatório da dupla diferença residual da portadora da fase para cada um dos satélites (GUENTHER, 2000).

Para documentos como as cartas náuticas brasileiras, por exemplo, o *datum* vertical utilizado é o Nível de Redução local (DHN, 2017 e MIGUENS, 1996), correspondente a aproximadamente a média das menores baixamares de sizígia (FRANCO, 2009). Dessa forma, pode-se ter como objetivo da aplicação da técnica OTF KGPS, a obtenção de valores de elevações inicialmente referenciadas ao elipsoide e então reduzidas ao devido *datum*

⁷ Zoneamento de maré é a extrapolação ou interpolação de características da onda de maré a partir de um ponto onde ela pode ser medida para um outro ponto da área de levantamento (CISTERNELLI *et al.*, 2007). A variação espacial do nível médio do mar gera diferenças ao longo da região mapeada. A presença de marégrafos em extremos da área de interesse permite que essa transferência de diferenças contenha menores discrepâncias.

(GUENTHER, 2000). Na Figura 8, adaptada de Guenther (2000), são mostrados diferentes elementos associados ao problema, onde pode-se observar a elevação elipsoidal da antena da aeronave no momento da coleta representada pela soma dos vetores H_i , D_i e E_i . De maneira a referenciar a elevação do ponto no fundo marinho ao *datum* local, deve-se subtrair de D_i , a altura w_i da superfície da água em relação ao NR no mesmo instante. Com isso, obtém-se a profundidade reduzida ao *datum* - d_i .

Figura 8 – Diagrama de referenciais verticais em um aerolevante LiDAR



Fonte: Adaptado de Guenther (2000).

2.4 Ecobatímetro Multifeixe

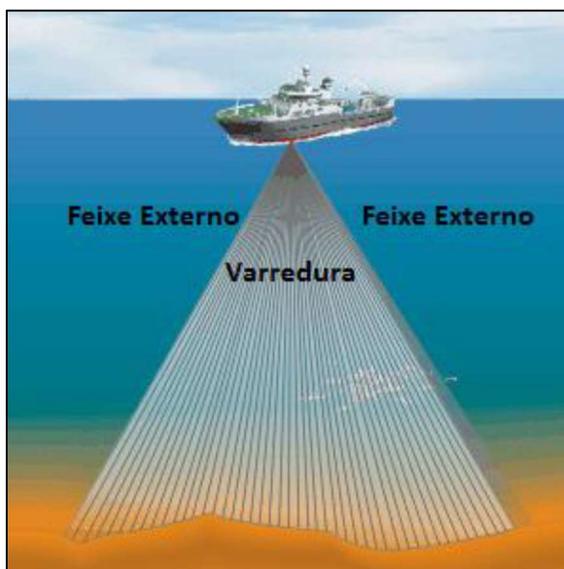
2.4.1 Aspectos de um Sistema Acústico Multifeixe

O sistema de levantamento batimétrico com uso de ecobatímetro é do tipo ativo, com os feixes acústicos gerados pelo próprio equipamento. A medição de profundidades se baseia na medida do intervalo de tempo entre o instante da emissão do pulso sonoro e o momento da detecção do seu retorno por parte do receptor.

Um ecobatímetro multifeixe (MBES) fixado a uma embarcação, realiza a varredura acústica do solo marinho por meio de um conjunto de feixes gerado a cada pulso emitido. A

varredura, conforme ilustrado na Figura 9, é delimitada pela área compreendida entre os feixes mais externos, localizados ortogonalmente à linha proa-popa da embarcação (DHN, 2017).

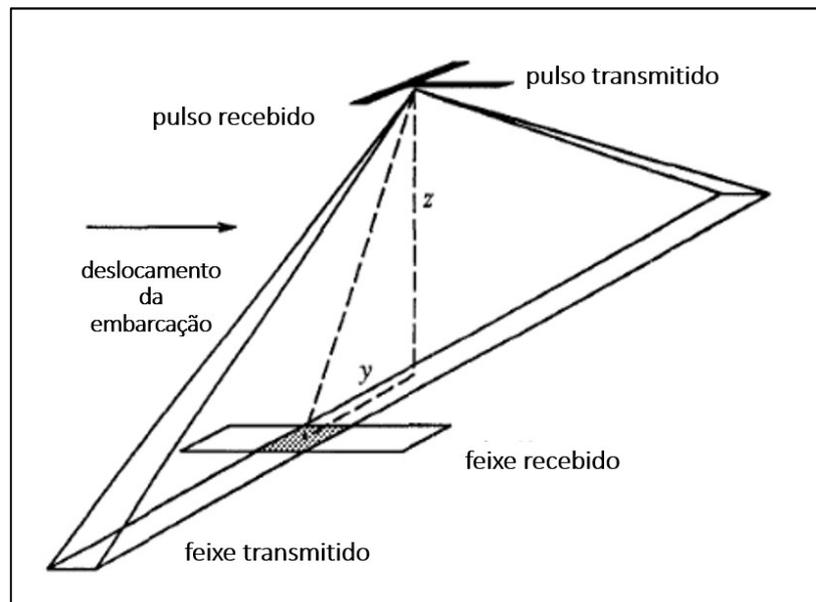
Figura 9 - Varredura de um MBES a cada emissão de pulso.



Fonte: DHN (2017).

O sinal transmitido possui formato alargado transversalmente à linha proa-popa da embarcação e estreito longitudinalmente. O feixe de resposta por sua vez, é alargado no eixo proa-popa. A interseção desses dois sinais sobre o solo define a área ensonificada (OHI, 2010). Uma vez considerada a posição e os efeitos de atitude da plataforma de coleta, o tempo e o ângulo de incidência dessa resposta podem ser relacionados à profundidade (z) e a distância lateral à derrota da embarcação (y), conforme pode ser visto na Figura 10 (YANG e TAXT, 1997).

Figura 10 - Geometria dos pulsos transmitido e recebido e da área ensonificada por um ecobatímetro multifeixe.



Fonte: Adaptado de Yang e Taxt (1997).

Um sistema de ecobatímetro multifeixe é composto de (KONGSBERG, 2009 e OHI, 2010):

- Dois transdutores, um para a emissão dos pulsos e outros para detectar os sinais de resposta;
- Um sistema de posicionamento, no qual pode-se empregar o método diferencial (DGPS) ou relativo cinemático (PPK ou RTK);
- Uma unidade de medida inercial, responsável por medir e corrigir os movimentos de atitude da embarcação de sondagem;
- Unidade *transceiver*, a qual realiza a interface entre os sistemas coletores de informação de posição, profundidade e atitude, além de realizar a sincronização dos relógios e a transformação do pulso elétrico em sinal acústico e vice-versa;
- Perfilador da velocidade do som na água, define o comportamento da velocidade de propagação do som ao longo da coluna d'água; e
- Estação de trabalho para comando e gerenciamento da aquisição e armazenamento dos dados.

2.4.2 Detecção do Fundo

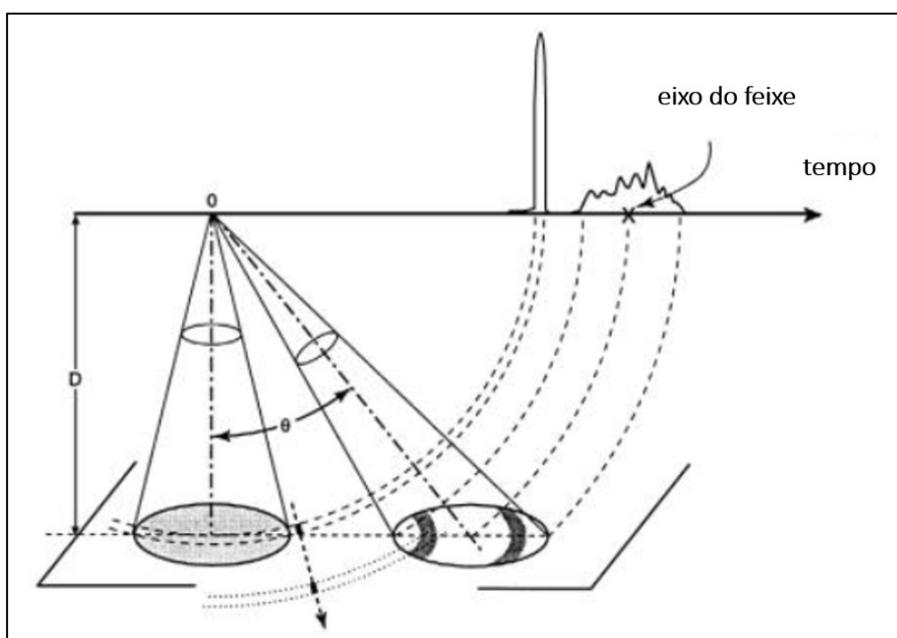
A detecção do fundo por um MBES pode se dar de duas maneiras: por amplitude ou por fase, cada uma com seus respectivos métodos.

a) Detecção por Amplitude

Em um MBES, a definição da direção de incidência DOA (*direction of arrival*) dos feixes do sinal de retorno é feita eletronicamente. Para isso, é necessário determinar o instante TOA (*time of arrival*) da onda de resposta correspondente à detecção do fundo marinho.

O ponto de maior amplitude da resposta, a princípio, seria considerado como o instante de detecção do fundo. Todavia, essa indicação pode na verdade apontar uma mudança de características do *footprint* (trecho do fundo ensonificado) do feixe em questão. Para dirimir possíveis ambiguidades, considera-se como TOA, o instante correspondente ao centro de massa do sinal de resposta (PEREIRA, 2015). Quanto menor for o ângulo de incidência do sinal no solo, menor será o *footprint*, concentrando o volume de resposta em um menor intervalo de tempo e assim, facilitando a definição do centro de massa. Quando o feixe atinge o fundo em maiores ângulos em relação ao nadir, o *footprint* aumenta e dificulta a definição do centro de massa do sinal, conforme pode ser visto na Figura 11 (DE MOUSTIER, 1998). Isso gera restrições à detecção do fundo pela amplitude aos feixes não nadirais (OHI, 2010).

Figura 11 – Forma de onda de retorno para um feixe nadiral e outro deslocado de θ graus do nadir. É possível notar o volume de resposta mais espalhado do feixe lateral.



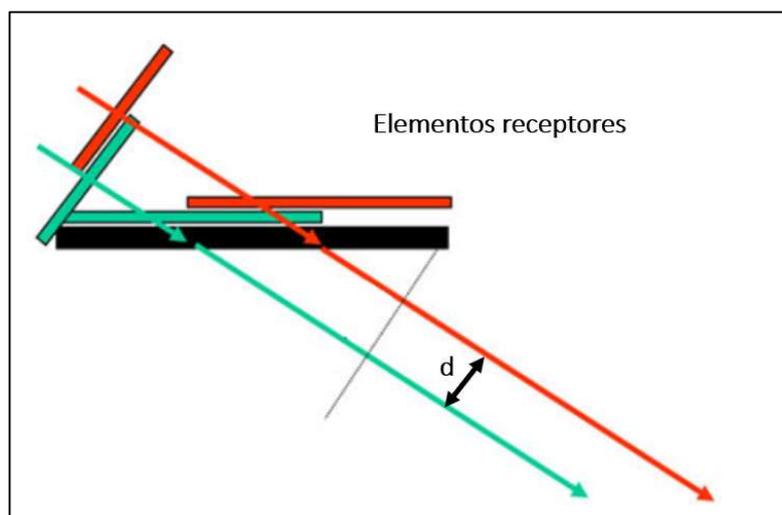
Fonte: Adaptado de De Moustier (1998).

b) Detecção por Fase

Nos feixes externos, a amplitude diminui com o aumento do tempo de retorno que eles utilizam, além disso, um número maior de ecos atinge o receptor por vez. Tais fatores podem ser intensificados em situações em que o fundo possui grande declividade e rugosidade, dificultando as diferenciações de tempo e direção pela amplitude (OHI, 2010). Como solução, a definição do TOA a partir de uma DOA é feita pela diferenciação de fase do sinal de retorno.

Nesse método, cada elemento receptor de uma determinada direção terá seus canais subdivididos em dois, com os seus centros espaçados por um múltiplo inteiro do comprimento de onda do sinal, conforme mostrado nos elementos verde e vermelho e da distância (d) da Figura 12 (PEREIRA, 2015).

Figura 12 - Canal receptor subdividido para a detecção do fundo por medida de fase.

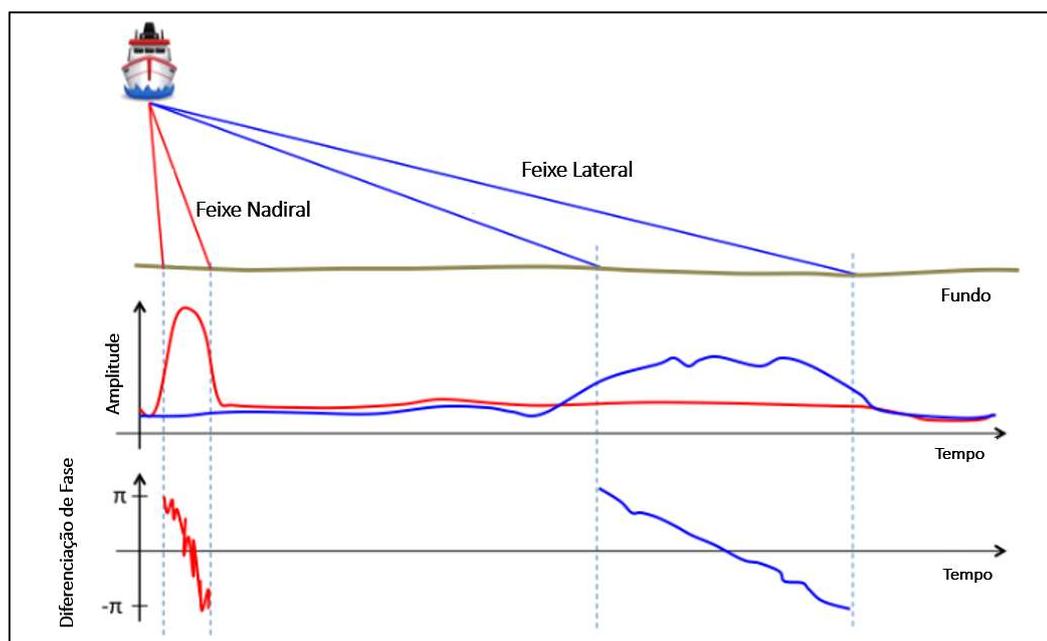


Fonte: Adaptado de Pereira (2015).

Após a comparação das fases dos ecos de resposta, o momento em que a diferença de fase é nula (*zero crossing*), é definido como TOA da direção em questão (OHI, 2010). Em feixes externos, a diferenciação do ponto *zero crossing* é feita de maneira mais clara do que nos ecos no nadir, uma vez que a extração da fase do retorno se dá com menor nível de ruídos.

A Figura 13, como apresentado por Pereira (2015), ilustra os princípios dos métodos utilizados para a detecção do fundo em feixes próximos ao nadir (amplitude) e nos laterais (diferenciação de fase).

Figura 13 – Comparação da detecção por fase e amplitude de feixes no nadir e lateral.



Fonte: Adaptado de Pereira (2015).

2.4.3 Incerteza Propagada Total em Sondagens Multifeixe

O desenvolvimento de sistemas acústicos multifeixe tornou capaz a coleta de até 10.000 informações de profundidade a cada segundo (USACE, 2013), o que fornece um detalhamento do solo marítimo ainda não atingido por outras técnicas de levantamento hidrográfico. Tal resolução gera uma redundância de dados que permite a estimativa realística de incertezas a cada profundidade medida (HARE *et al.*, 2011).

Por ser o resultado de um complexo processo de medições de diversificada natureza, a determinação da profundidade por um MBES deve, conforme Hare (2011), levar em conta as incertezas atribuídas às medições feitas por todos os sensores empregados, sendo elas:

- Estimativa da profundidade por parte do ecobatímetro;
- Correção da velocidade de propagação do som na água;
- Determinação das variações de calado da embarcação;
- Cálculos dos efeitos de arfagem (*heave*), balanço (*roll*), e caturro (*pitch*) da embarcação;
- Definição das alturas de maré;
- Determinação das coordenadas planimétricas;
- Medição dos *lever-arms*; e
- Cálculos de latência.

A partir da contribuição de cada uma delas, incluindo-se ainda as incertezas das medições físicas da embarcação e das observações de maré, torna-se possível estimar a Incerteza Propagada Total (IPT) dos dados finais.

Apesar de possuir em seu nome a nomenclatura “Propagada”, advinda da expressão do Caris HIPS and SIPS “*Total Propagated Uncertainty – TPU*”, a incerteza final não é calculada como um todo (PEREIRA, 2016). São dadas como resultado, a incerteza da posição, ou Incerteza Horizontal Total (IHT) e a incerteza da profundidade, ou Incerteza Vertical Total (IVT). Ambas são informadas dentro de um intervalo de $\pm 1,96\sigma$ em uma distribuição normal.

Cabe ressaltar a diferenciação entre a IPT e a incerteza amostral. Ao se tratar da incerteza amostral, deve-se considerar que mesmo sobrepondo-se diversas linhas de varredura, não é possível garantir que serão efetuadas várias medições exatamente sobre uma mesma feição do fundo. Por sua vez, a IPT considera a contribuição das várias fontes de erros envolvidas na obtenção das profundidades (PEREIRA, 2016).

Os sensores mais largamente utilizados atualmente em atividades hidrográficas possuem seus erros modelados pela University of New Hampshire e listados no sítio da internet disponibilizado pela Teledyne Caris, fabricante do *software* Caris (CARIS, 2017).

Uma vez definidas a IHT e a IVT, torna-se possível atribuir a ordem em que se adequa um dado LH à luz das especificações da OHI. Na Tabela 1, encontra-se um extrato dessa lista, com parâmetros acerca das incertezas, densidade das informações e capacidade de diferenciar obstáculos submersos (OHI, 2008 e DHN, 2017).

Tabela 1 – Parâmetros de Classificação de Levantamentos Hidrográficos.

Ordem	Especial	1A	1B	2
IVT máxima permitida (nível de confiança 95%)	a = 0,25m b = 0,0075	a = 0,5m b = 0,013	a = 0,5m b = 0,013	a = 1,0m b = 0,023
IHT máxima permitida. (nível de confiança 95%)	2 m	5 m + 5% da profundidade	5 m + 5% da profundidade	20 m + 10% da profundidade
Levantamento Completo do Solo Marítimo	Requerido	Requerido	Não requerido	Não requerido
Deteção de feições	Feições cúbicas > 1m	Feições cúbicas > 2m, em profundidades (d) até 40m; 10% de d, quando d > 40m	Não aplicável	Não aplicável

Fonte: Adaptado de OHI (2008).

Os valores de IVT tolerados para cada ordem são definidos com base na Equação 6, composta por um fator que independe da profundidade (a), por uma parcela que se modifica com a profundidade (b) e da profundidade medida em questão (d).

$$IVT = \pm \sqrt{a^2 + (b \cdot d)^2} \quad (6)$$

2.4.4 Capacidades e Limitações de um MBES

Apesar de não ser possível garantir realmente a totalidade do cobrimento do solo abaixo d'água (OHI, 2008), um MBES capaz de identificar feições com 1 m³ em levantamentos de Ordem Especial ou com 2 m³ cúbicos nos de Ordem 1A até 40 m de profundidade, é considerado um sensor que efetua o levantamento completo do fundo marítimo (DHN, 2017). Esta capacidade é exigida em trabalhos que visam a atualização de cartas náuticas de regiões onde a folga abaixo da quilha é crítica, como canais de acesso a terminais portuários.

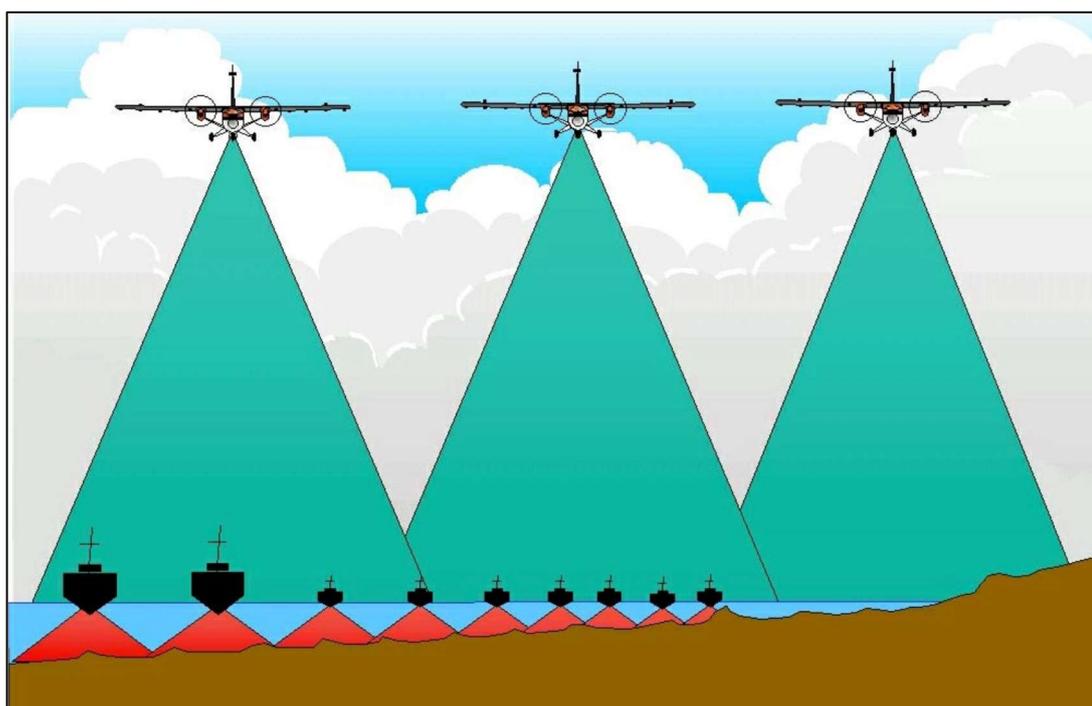
Diferentemente do sistema LiDAR batimétrico, um ecobatímetro emite feixes a partir do próprio ambiente abaixo da superfície d'água, o que elimina a necessidade de se considerar a refração devido à mudança de meio. Todavia, face às mudanças de temperatura e composição da água ao longo da coluna d'água, é necessário considerar alterações de direção e velocidade de propagação do som nesse meio. Em função disso, deve-se determinar o perfil da velocidade do som na água com a variação da profundidade de forma a corrigir a trajetória dos feixes. Embora haja sensores capazes de realizar esse perfilamento concomitantemente à sondagem multifeixe, a periodicidade da mediação da velocidade do som deve ficar a critério do operador do sistema. Ele deve acompanhar as características dos feixes gerados em tempo real e, ao identificar uma formação anômala em função da consideração errônea da velocidade do som, adquirir um novo perfil da coluna d'água. Além do emprego desse perfilador, é também utilizado um sensor de velocidade do som localizado junto aos transdutores. Ao medir continuamente a velocidade do som próximo a estes sensores, ele fornece a informação necessária para o correto direcionamento dos feixes (DHN, 2017).

Em termos comparativos aos mapeamentos por ALB, um levantamento batimétrico por MBES, conduzido em uma embarcação, é realizado em uma velocidade média inferior àquela de um aerolevanteamento LiDAR. Entretanto, a taxa de aquisição de um ecobatímetro multifeixe é largamente superior. Um típico MBES é capaz de gerar 256 feixes coletando dados a uma

taxa de 40 Hz (USACE, 2013) e com isso, atingir uma densidade de dados superior à dos sistemas a LASER.

A despeito da maior densidade de dados que adquire, um sistema MBES possui menor eficiência em áreas de baixa profundidade. A geometria de seus feixes realiza uma menor varredura do solo quanto mais raso for o local mapeado. Isto exige um maior número de linhas de sondagem a serem cumpridas (GUENTHER, 2000). Outro fator a ser considerado em um levantamento com MBES é a dificuldade de acesso a áreas de navegação perigosa. Regiões de arrebentação, próximas a rochedos ou de manobra restrita ao tamanho da embarcação de sondagem devem ser evitadas para a preservação do material e pessoal empregados. Tais dificuldades são comumente superadas com uso da ALB. A Figura 14 fornece uma comparação visual desses aspectos.

Figura 14 – Comparação da eficiência de cobertura do solo marinho entre um sistema LiDAR e um MBES.



Fonte: Guenther (2000).

2.5 Sistemas de Levantamento Batimétrico Passivos

Além da medição da profundidade a partir de sensores ativos, onde há a ação de um emissor de ondas, também é possível mapear o fundo marinho com o uso de equipamentos passivos, nos quais o sinal percebido pelo receptor não foi gerado a partir da reflexão de uma onda produzida pelo próprio sistema. O alcance e o detalhamento das informações serão

influenciados pela maneira com que a metodologia empregada lidará com as características do meio de operação.

Conforme Monteys *et al.*, (2015), o método passivo de levantamento batimétrico mais difundido é o que utiliza imagens multiespectrais de satélites. Isso ocorre pela capacidade da radiação eletromagnética de penetrar a coluna d'água até variadas profundidades e de claramente definir a interface ar-água. A informação de profundidade pode ser calculada com uso de métodos analíticos ou empíricos, os quais se balizam na relação estatística entre os valores de profundidade de referência e os valores dos pixels das imagens. Essas técnicas são mais precisas para profundidades de até 20 m, diminuindo a qualidade dos dados em águas mais profundas (GAO, 2014).

Uma das mais conhecidas abordagens para a estimação da profundidade a partir de sensores remotos foi desenvolvida por Lyzenga (1978). Nesse estudo, identificou-se que a reflectância do fundo marinho é uma função da profundidade e do tipo do solo mapeado.

Stumpf *et al.* (2003) sugeriram um algoritmo baseado na razão de reflectância entre duas bandas para extrair a informação de profundidade a partir de imagens espectrais. Como as bandas verde e azul sofrem absorção na coluna d'água de forma diversa uma da outra, a reflectância daquela que apresentar maior absorção (verde) sofrerá um decréscimo proporcionalmente mais rápido com o aumento da profundidade. Enquanto a alteração do tipo de fundo afeta as bandas de forma similar (PHILPOT, 1989), o mesmo não ocorre com a profundidade. Assim sendo, a razão logarítmica entre as reflectâncias dessas duas bandas ($R_w(\lambda_i)$ e $R_w(\lambda_j)$) foi estabelecida para estimar a profundidade (Z) de acordo com a Equação 7:

$$Z = m_1 \frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))} - m_0 \quad (7)$$

na qual m_1 é um fator de escala, n é uma constante definida para garantir um valor positivo para a razão, dado um valor qualquer de reflectância e m_0 , um degrau estabelecido para a situação em que a profundidade for zero. Para a sua aplicação, faz-se necessária a calibração com dados batimétricos de referência. Este modelo é utilizado na estimação de profundidades do software ENVI (MONTEYS *et al.*, 2015).

Monteys *et al.* (2015) utilizaram esse algoritmo para estimar a batimetria em uma área da Baía de Dublin, Irlanda. Nessa pesquisa, foram comparados resultados a partir de 5 modelos de regressão para imagens do satélite RapidEye. A confrontação com a batimetria MBES demonstrou menor consistência para o modelo de regressão geograficamente ponderado GWR (*Geographically Weighted Regression*), com RMSE de 1,312 m. Os melhores resultados se

deram para a krigagem com desvio externo e calibrado com a vizinhança local KED-LN (*Kriging with an External Drift – Local Neighbourhood*), com RMSE de 0,470 m. Todavia, a resolução espacial de 5 m ainda se mostra um desafio, sobretudo quando comparado ao espaçamento de dados alcançado por um MBES.

Jawak e Luis (2015) utilizaram a mesma razão linear para combinações de 8 bandas de imagens do satélite Worldview-2 (WV-2). As imagens foram obtidas na região dos Montes Larsemann, Antártica e avaliadas com dados de profundidade de ecobatímetro multifeixe. As análises que resultaram na maior correlação com as informações de referência ($r = 0,81$) foram as combinações das bandas amarelo/verde e amarelo/azul, com um RMSE de 1,25 m.

Segundo Vogelzang *et al.* (1994), outras metodologias podem ser aplicadas, como a medição da profundidade com base na reflexão do brilho da luz solar e o mapeamento por RADAR a partir de ondas longas. Ambas possuem funcionamentos próximos, baseando-se na estimulação de um sistema de interseções de ondas para o imageamento. As variações da corrente à superfície, causadas pela interação entre vento, corrente de maré e a topografia do fundo, possibilitam a modulação do espectro de ondas. Essas modulações se manifestam como zonas de diferente intensidade e direção de resposta a partir de informações do RADAR e de imagens ópticas. Cabe ressaltar o significativo impacto do regime de ventos à superfície na qualidade desses dados. Os autores concluíram que a identificação de *sandwaves* não foi possível em regimes de ventos a partir de 7m/s. Já em situações de ventos entre 2 e 4m/s, pode-se identificar formações com posição e magnitude compatíveis com os modelos de previsão.

Já a associação de imagens orbitais a aerovantamentos LiDAR, este, um sensor ativo, pode oferecer significativas contribuições. Como exemplo, pode-se aprimorar a classificação de dados multiespectrais ao se considerar elevações LiDAR como uma banda adicional. A associação de respostas espectrais a medições de distâncias geométricas oferece uma complementação aos dados (PARK *et al.*, 2001). Dessa forma, pode-se reduzir a taxa de falsos positivos na classificação de imagens e melhorar a separação de elementos espectralmente similares.

Esta metodologia foi empregada por Lee e Shan (2003), quando propuseram o mapeamento costeiro com imagens IKONOS e dados LiDAR como uma banda extra das imagens multiespectrais. Neste caso, os autores incorporaram as informações LiDAR no procedimento de classificação de imagens. Trechos ambíguos ao canal do infravermelho próximo (NIR), como áreas pantanosas e águas costeiras, ou telhados e rodovias, puderam ser corretamente avaliados. Ao final do estudo, o aumento da acurácia na inclusão dos dados entre as categorias definidas foi de 30%, já a confiança da classificação dos pixels, foi melhorada em

50%. Com isso, a aplicação das elevações LiDAR gerou uma distribuição mais homogênea e factível das feições identificadas.

Já para melhor identificar os tipos de substratos e organismos bentônicos existentes abaixo da linha d'água, há a alternativa do emprego do sensor Imageador Espectrográfico Compacto para Aeronaves (*Compact Airborne Spectrographic Imager – CASI*). O CASI é um sensor com altas resoluções espacial e espectral, capaz de diferenciar as distintas assinaturas de bentos e componentes que podem existir em uma pequena amostra de corais, por exemplo. Esses sensores hiperespectrais podem gerar informação radiométrica de largas áreas, de forma a obter as características ópticas da coluna d'água, monitorar interações costeiras e classificar comunidades bentônicas (LESSER e MOBLEY, 2007). A análise de suas imagens também pode auxiliar na construção de mapas batimétricos.

Um exemplo de sua aplicação foi o mapeamento de bentos, substratos e batimetria em uma região de corais feito por Leiper *et al.* (2014). Neste estudo, foram comparadas imagens com pixels de 1 m obtidas por um sensor CASI-2 com informações de assinaturas espectrais coletadas *in situ*. As informações de profundidade foram validadas a partir de um levantamento realizado com um ecobatímetro monofeixe⁸. O mapa batimétrico gerado a partir do CASI-2 mostrou correlação com os dados acústicos, com coincidência das zonas de feições geomorfológicas. A profundidade máxima alcançada foi de 10 m, limite imposto, todavia, pela ausência de dados mais profundos na biblioteca espectral usada.

2.6 Aplicações da Tecnologia ALB em Levantamentos Hidrográficos

O caráter mais eficiente e a capacidade de atingir áreas inóspitas à uma embarcação de sondagem, tornam a ALB uma atividade requisitada como elemento complementar de um levantamento batimétrico. Há um menor tempo gasto pela batimetria LiDAR para cobrir uma mesma área em relação ao uso de MBES embarcado. Todavia, essa vantagem contrasta com uma densidade de dados sensivelmente menor apresentada pela ALB, o que prejudica a identificação de objetos submersos.

Para que um sistema capaz de detectar o fundo marinho possa ser aplicado às atividades hidrográficas, faz-se necessário o atendimento a requisitos de qualidade largamente adotados pelos serviços hidrográficos. Um extrato desses parâmetros, estabelecidos pela OHI para a classificação de levantamentos e considerados pela DHN, é mostrado na Tabela 1.

⁸ Sonar que realiza a medida da profundidade a partir do tempo entre a emissão de um feixe acústico singelo e sua resposta única após atingir o fundo marinho.

Comparações entre esses ALB e MBES para o mapeamento marinho foram feitas por (COSTA *et al.*, 2009). Seus resultados demonstraram um menor custo financeiro para o uso da ALB. As análises concluíram que os métodos foram igualmente capazes de identificar a topografia marinha local, embora a superfície obtida pelo sistema LiDAR tenha se mostrado consistentemente mais rasa do que a MBES. Com a interpolação em uma grade com amostras espacialmente independentes, pode-se observar uma correlação entre as superfícies batimétricas dos dois sensores, o que já não ocorreu na comparação com as de intensidade. Quanto à descrição do terreno, as informações de MBES, com maior densidade, permitiram a melhor separação entre os tipos de sedimentos e superior detalhamento do relevo marinho.

Niemeyer e Soergel (2013) descreveram uma investigação sobre as capacidades de alcance, detecção de obstáculos e acurácia apresentadas em área do Mar Báltico. As coletas foram cumpridas com três diferentes campanhas: uma com o sistema Riegl VQ-820-G, com taxa de aquisição de 149 KHz e altura de voo de 500 m; e as demais com o sensor Chiroptera AB, a taxas de 200 KHz (infravermelho) e 35 KHz (verde). Diferentes condições de visibilidade da água impuseram um alcance máximo de 5 m no primeiro levantamento (Riegl) e de 10 m e 7 m nos seguintes (Chiroptera). A densidade de pontos do sensor Riegl diminuiu drasticamente com o aumento da profundidade, indo de aproximadamente 3,5 pontos/m² para próximo de 0 pontos/m² no primeiro valor de profundidade de Secchi do local. As duas campanhas com uso do Chiroptera AB resultaram em uma densidade próxima de 2,4 pontos/m² no trecho de maior profundidade. A acurácia vertical foi analisada por meio de comparação das células das superfícies de profundidades interpoladas das campanhas com àquelas mais próximas extraídas de dados MBES de referência. Nesta comparação, 92,5 % do total de pontos ALB resultaram em discrepâncias de até $\pm 0,5$ m. Apenas as campanhas do Chiroptera AB atingiram Ordem 1 de acurácia vertical em parte das profundidades, sobretudo as maiores que 4 m.

Hilldale e Raff (2008) avaliaram a precisão de levantamento com sistema LiDAR batimétrico para rios, comparando seus dados aos de um conjunto de sensores formado por ecobatímetro monofeixe, *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP⁹) e com o posicionamento por *Real Time Kinematic Global Positioning Satellite* (RTK GPS). Foram encontradas discrepâncias nas profundidades menores que 0,20 m, com desvio-padrão sempre menor do que 0,50 m. Uma análise mais profunda sobre a influência do gradiente da topografia do leito do rio investigado foi feita. Nessa análise, verificou-se que em regiões onde a variação da elevação do

⁹ Perfilador Acústico, normalmente utilizado fixo ao fundo do mar/rio ou sob o casco de embarcações ou boias. Realiza a medição de propriedades da água próxima aos seus sensores, tais como profundidade, intensidade da corrente local, direção e altura de ondas

terreno era menor que 10%, o erro vertical médio foi de 0,04 m, saltando para 0,52 m nas áreas com gradiente acima de 20%.

Serviços hidrográficos de diversos países empregam a ALB com o objetivo de atualizar suas publicações náuticas. Dentre eles, o *Naval Oceanographic Office* (NAVOCEANO), órgão do Departamento de Defesa dos Estados-Unidos da América, que possui a responsabilidade de gerar informações sobre os oceanos ao governo daquele país. Desde 1996, o NAVOCEANO utiliza o LiDAR batimétrico para auxílio à produção de cartas náuticas. Seus levantamentos batimétricos coletam dados com espaçamento de 3 x 3 m, sendo as áreas de interesse cobertas por duas (2) passagens (cobertura de 200%), como destacam Wozencraft e Millar (2005).

Outra instituição estadunidense, esta responsável por produzir documentos náuticos para a segurança da navegação comercial e que também realiza levantamentos Lidar batimétricos, é o *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Este órgão, cujas publicações de procedimentos-padrão são utilizadas como referência por diversos serviços hidrográficos, realizou seu primeiro levantamento utilizando em conjunto ALB e MBES em 2004 (MOYLES, 2005). Conforme detalhado por (Moyles *et al.*, 2005), esse levantamento ocorreu no Alaska (EUA), em região de navegação restrita, com uma linha de costa irregular e recortada por ilhas, rochas e áreas com fundo sujo¹⁰ e incluiu profundidades de até 15 m. Dados batimétricos foram obtidos por ALB a 1 KHz com espaçamento de 4 x 4 m em faixas de voo em duas (2) passagens (cobertura de 200%) na área de interesse. A principal contribuição das informações obtidas pelo sistema LiDAR se deu na definição dos trechos mais rasos e, em conjunto com as ortofotos, das linhas de costa. A combinação dos dois sistemas, com distintas capacidades e limitações, demonstrou que a integração dessas informações torna mais eficiente um levantamento de grandes áreas, mesmo na presença de perigos à navegação da embarcação de sondagem ou obstruções à coleta com LiDAR.

2.7 Outras Contribuições de Sistemas LASER Batimétricos Aerotransportados

À parte de sua aplicação em um levantamento hidrográfico como uma fonte de informações batimétricas complementar aos ecobatímetros, a batimetria LiDAR possui distintas possibilidades de utilização. Suas características e capacidades lhe proveem um caráter de múltipla aplicabilidade.

¹⁰ Área com fundo não perigoso à navegação, mas que deve ser evitada para fundeio, pesca de arrasto ou atividades que demandem manejo do solo marinho (DHN, 2014).

Um exemplo dessa multiplicidade é o seu uso na geração de modelos de previsão de inundações e impactos de mudanças climáticas em áreas costeiras. Como na aplicação por Webster *et al.*, (2004), que realizaram um aerolevante LiDAR como parte de um projeto de mapeamento de riscos associados a inundações em uma região litorânea. Nesse estudo, verificou-se a importância da obtenção de dados de alta densidade na geração de modelos digitais de terreno (MDT). O MDT foi ajustado ao *datum* vertical da carta náutica, o que possibilitou gerar um modelo de previsão da abrangência de inundações com simulações de eventos já ocorridos na região. Os vetores que descrevem a linha de avanço de enchentes foram projetados no mapeamento urbano sobre propriedades e assentamentos.

Entre outros aspectos desse trabalho, foi atestada a importância da validação das elevações obtidas com dados de terreno e de marégrafos. Observou-se que havia uma discrepância entre a determinação da superfície geoidal, baseada no *datum* vertical CGVD28¹¹, e a definição do geoide com base nas medições de maré. Essa discrepância se mostrou próxima daquela obtida com as rotinas de calibração do LiDAR. A fim de confirmar a ocorrência do degrau vertical, uma campanha GPS foi feita. As altitudes elipsoidais GPS foram convertidas para o geoide com uso do mesmo modelo de separação aplicado ao LiDAR. A adoção desses pontos de controle e da diferença vertical observada levou a uma nova discrepância média de 0,04 m entre as superfícies de referência do LiDAR e do marégrafo. A correta calibração e a verificação dos dados obtidos permitiram que as simulações de eventos passados pudessem ser aplicadas ao modelo. Assim, a amplitude da inundação obtida pode ser comparada ao que de fato aconteceu em situações passadas

O mapeamento sem o contato direto com o terreno como o feito por ALB, possibilita a realização de estudos logo após a ocorrência de fenômenos meteorológicos, como tornados e furacões. Ao se utilizar desse potencial, Houser *et al.*, (2008) analisaram, a relação estatística da morfologia de dunas em uma ilha, com a dinâmica de retração da linha de costa (histórica e estimulada por tempestades) e com características batimétricas costeiras. A aquisição de informações logo após a passagem de um furacão permitiu gerar informações de seus impactos imediatos. Análises com uso da Função Ortogonal Empírica identificaram padrões recorrentes na geometria costeira da ilha e na batimetria, relacionando a presença de barreiras de dunas na costa com a localização de formações de cumes abaixo d'água. Em áreas onde essas barreiras

¹¹ Canadian Geodetic Vertical Datum of 1928 – *Datum* vertical canadense, definido em 1928.

eram menores ou ausentes, foram notados efeitos mais intensos por parte do furacão, com a ocorrência de *overwash*¹².

Dados LiDAR batimétricos são uma ferramenta útil ao gerenciamento dos recursos naturais de áreas costeiras. Suas informações permitem a identificação e o acompanhamento de características do solo marinho tais como sua inclinação, rugosidade e cobertura vegetal. Uma fonte desses parâmetros é o estudo da intensidade do sinal de resposta percebido. Conforme Wang e Philpot (2007), a intensidade de cada feixe pode ser descrita pelo modelo de transferência, expresso na Equação 8. Nessa expressão, P_R se refere à potência recebida pelo sensor, P_T é a potência transmitida, W corresponde ao coeficiente de atenuação da água, ρ é a reflectância bentônica, K_{SYS} reúne os fatores causadores de atenuação do sinal por parte do sistema e D é a profundidade local.

$$\ln(P_R) = \ln(P_T W \rho) - 2K_{SYS} D \quad (8)$$

Considerando $\ln(P_T W \rho)$ uma constante, o valor de $\ln(P_R)$ é uma função linear da atenuação da coluna d'água. Em um ambiente onde o valor de K também é homogêneo, diferentes tipos de fundo gerarão um gráfico de resposta composto por retas paralelas com eixos cartesianos em $\ln(P_R)$ e D . Assim sendo, a capacidade de diferenciação de fundos dependerá da precisão na medição da profundidade e da incerteza do coeficiente de atenuação estimado.

Em um levantamento conduzido no sudeste da Espanha, Velasco *et al.* (2014) utilizaram-se desses conceitos para gerar um diagrama de dispersão das variáveis de intensidade do sinal de retorno e dos valores de profundidades com a aplicação do agrupamento por k-médias. Seus resultados mostraram uma dispersão homogênea e realística de 15 diferentes tipos de solo marinho. A coerência das informações foi observada em uma comparação com amostras de fundo da região de estudo.

¹² Processo de transporte de sedimentos a partir do litoral, ultrapassando a região de dunas, para a região interior à costa. Essa transposição é feita por ventos e inundações decorrentes de furacões e tempestades tropicais e provoca significativas alterações no terreno local (DONNELLY *et al.*, 2006).

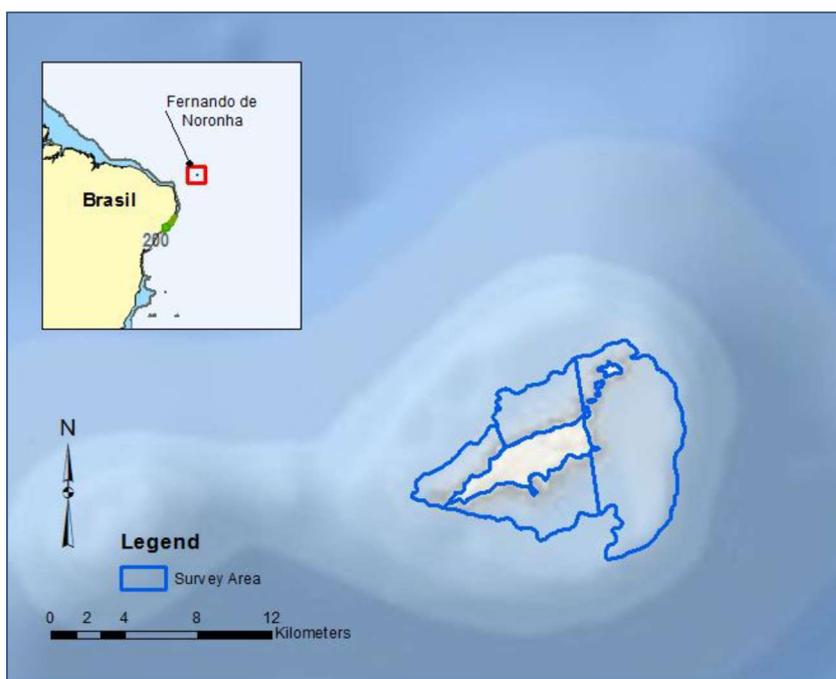
3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Foram utilizados nesse trabalho, dados LiDAR provenientes de um aerolevanteamento topobatimétrico realizado sobre o Arquipélago de Fernando de Noronha – PE, pela empresa Fugro Pelagos Inc. (FPI) em nome da empresa Fugro Airborne Surveys - Lasa Prospecções S/A, contratada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Mineralógicos (CPRM). Esse levantamento teve como propósito central, gerar um modelo digital do terreno num referencial elipsoidal, de forma a fornecer um imageamento do fundo marinho à CPRM. Como informações batimétricas de referência foram empregadas profundidades adquiridas em um levantamento hidrográfico da enseada de Santo Antônio, no mesmo Arquipélago, adquiridas por meio de um sistema de batimetria multifeixe e disponibilizadas pelo Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO). As análises comparativas foram realizadas sobre uma área comum aos dois levantamentos.

3.1 Aerolevanteamento Topobatimétrico LiDAR

As informações LiDAR topográficas e batimétricas foram coletadas em uma área de aproximadamente 112 km², sobre o Arquipélago de Fernando de Noronha, incluindo-se a área costeira submersa até a profundidade aproximada de 55 m, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Área do Levantamento Topobatimétrico LiDAR no Arquipélago de Fernando de Noronha.



Fonte: Fonte: CPRM (2014)

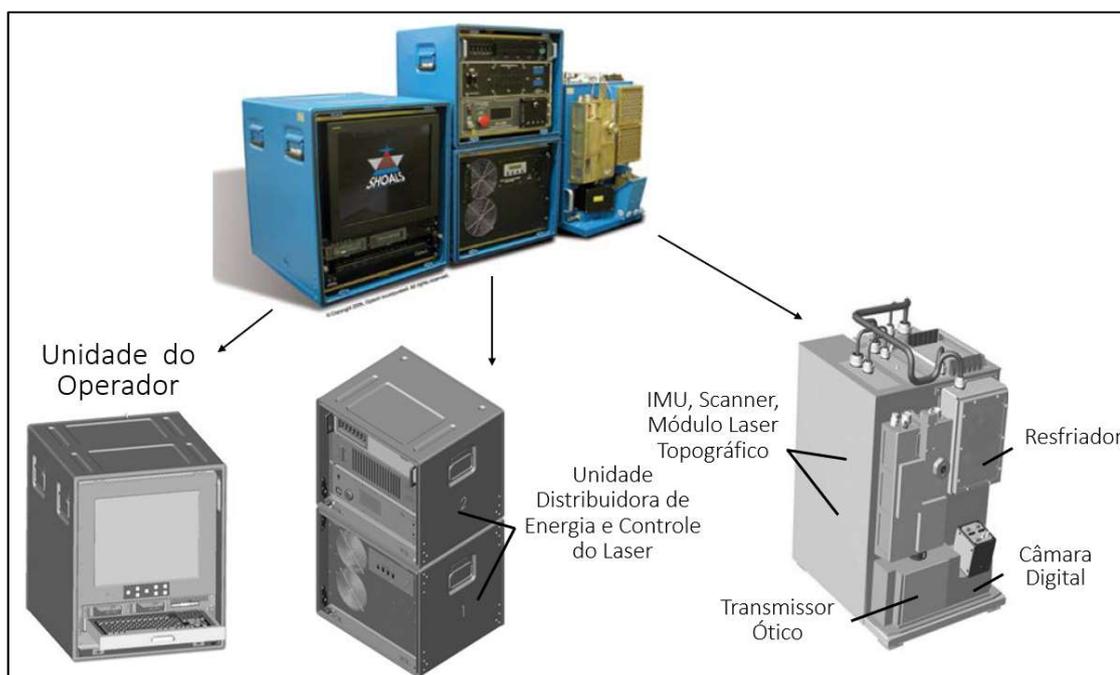
Para a aquisição dos dados LiDAR foi empregado o sistema SHOALS-1000T durante os dias 27 e 29 de janeiro de 2011. As observáveis GPS de dupla frequência foram coletadas em estações de referência, sendo o processamento das informações efetuado pela empresa Fugro Pelagos Inc., conforme etapas apresentadas no Apêndice A.

3.1.1 Especificações do Sistema SHOALS-1000T

Desenvolvido pela Optech Integrated, o sistema SHOALS (*Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey*) na sua versão 1000T tem capacidades de mapeamento topográfico e batimétrico (LAROCQUE *et al.*, 2004).

O SHOALS-1000T possui três principais componentes, sendo eles: o sensor LiDAR, o compartimento do laser em conjunto com seu resfriador e o console do operador. Nesse console, o operador do sistema pode acompanhar a aquisição e armazenamento dos dados LiDAR, ter uma visão da área levantada por meio do *frame* da câmara digital acoplada e o controle das informações coletadas tanto pela IMU (unidade de medida inercial) quanto pelos receptores GPS. Esses módulos podem ser vistos na Figura 16.

Figura 16 – Principais componentes do sistema SHOALS-1000T.



Fonte: Adaptado de LaRocque (2004) e Optech (2006).

A Tabela 2 apresenta algumas características técnicas de operação do sistema no modo hidrográfico de operação (OPTECH, 2006).

Tabela 2 – Características técnicas nominais do sistema SHOALS-1000T

SHOALS-1000T Modo Hidrográfico	
Taxa de aquisição	1000 Hz
Frequências de operação	infravermelho (1064 nm) e verde (532 nm)
Altura de voo de operação	200 a 400 m
Acurácia vertical nominal	25 cm, 1 σ
Faixa de profundidades detectáveis	0,2 a 50 m
Densidades de amostra	2x2, 3x3, 4x4, 5x5 m
Largura da varredura	variável, indo até 0,58 x altura de voo
Velocidade de deslocamento	125 a 180 nós (231 a 333 km/h)

Fonte: Optech (2003)

A compensação dos ângulos de atitude da plataforma de coleta é feita pela IMU, instalada no mesmo módulo do LASER. Medições feitas no corpo da aeronave definem a sua distância ao ponto comum de referência e deste à antena GPS levada a bordo. A solução da posição adquirida e da atitude do avião é obtida pelo sistema Applanix POS AV 410, sem a necessidade de aerotriangulação (OPTECH, 2006 e APPLANIX, 2017).

O posicionamento da aeronave é feito com uma antena NovAtel 512 L1/L2, própria para uso aéreo (NOVATEL, 1999). Correções diferenciais podem ser adicionadas ao posicionador. As estações de controle de terra realizam a aquisição de dados GPS em dupla frequência por meio do posicionador NovAtel DL-V3.

3.1.2 Aquisição dos Dados LiDAR

O sistema de aquisição foi instalado em uma aeronave Beechcraft King Air A90, mostrada na Figura 17, a qual se deslocou durante a aquisição a uma altura de 400 m e velocidade média de 160 nós (296 km/h). O levantamento foi planejado de modo a ter o recobrimento de 100% da área de interesse, com sobreposição lateral de 30 m entre as faixas. O espaçamento dos dados previsto foi de 5 x 5 m. A taxa de aquisição tanto no modo topográfico quanto no hidrográfico foi de 1 kHz. As emissões LASER se deram nas frequências de 1064 nm (infravermelho) e 532 nm (verde). O sistema SHOALS também utilizou a recepção do sinal resultante do espalhamento inelástico dos pulsos emitidos. Essa onda de retorno, com comprimento de 645 nm (vermelho), pode ser detectado pelo canal Raman (CPRM, 2014).

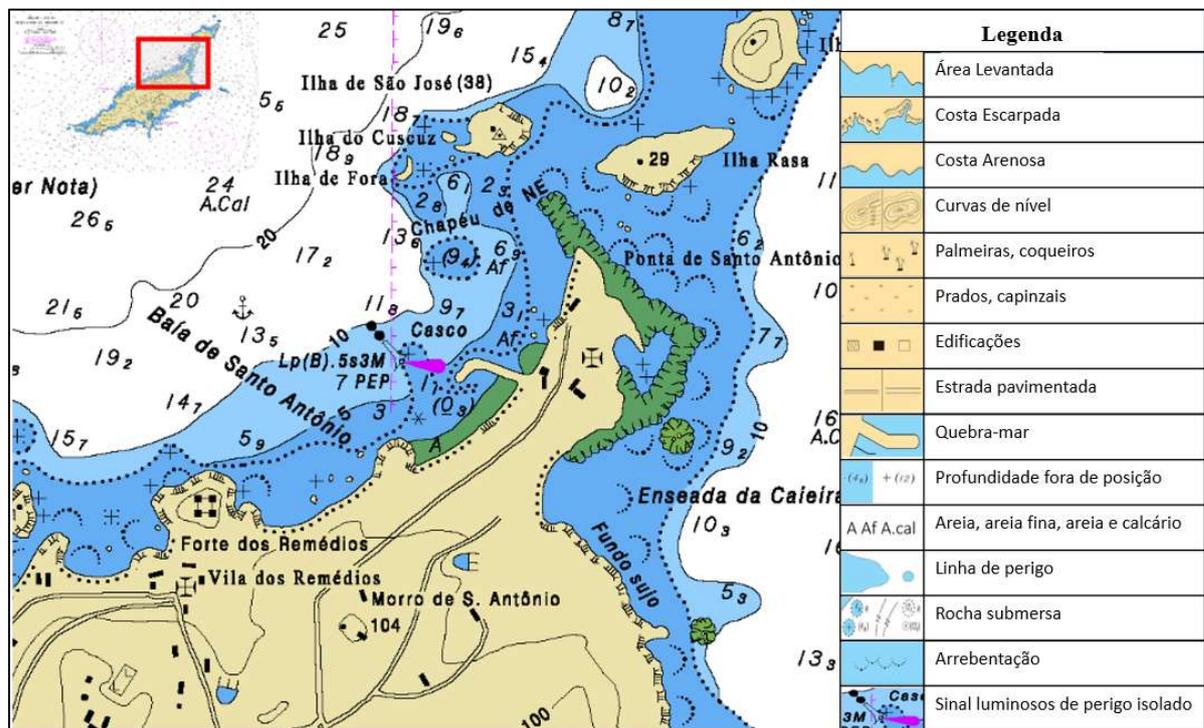
Figura 17 – Aeronave empregada no aerolevantamento LiDAR



Fonte: CPRM (2014)

A área pesquisada abrange todo o Arquipélago de Fernando de Noronha, extrapolando a área de interesse deste trabalho, a qual se limita à região de aproximação à enseada de Santo Antônio, exibida na Figura 18. Ressalta-se que o objetivo inicial da coleta foi o de gerar profundidades elipsoidais. A posterior aplicação do *datum* da carta náutica gerou informações de profundidades referenciadas ao Nível de Redução.

Figura 18 – Extrato da carta náutica com a região da Enseada de Santo Antônio (profundidades em metros e décimos de metros).



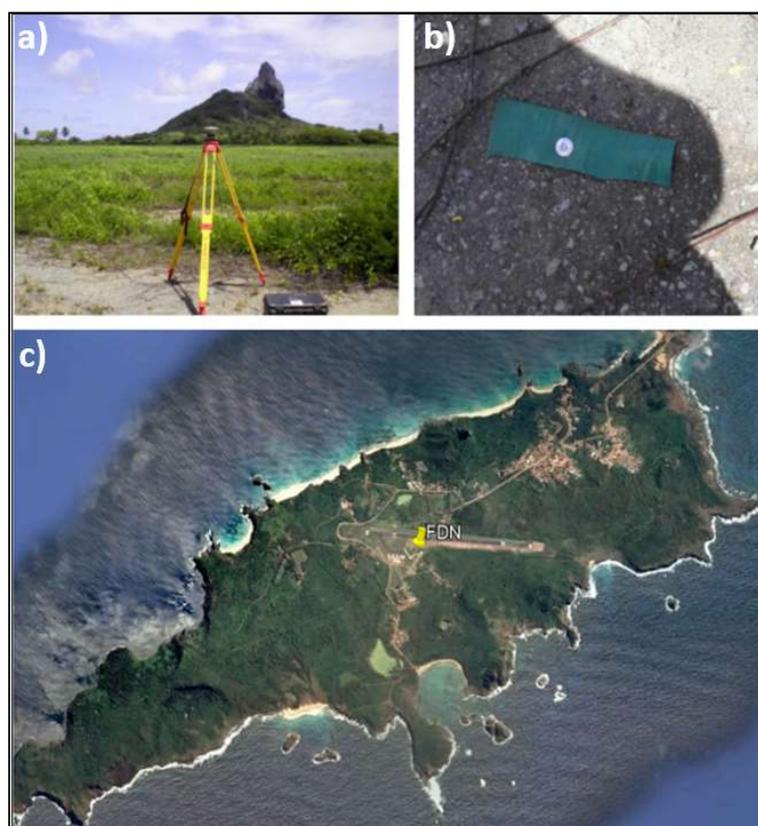
Fonte: Adaptado de DHN (2011).

O posicionamento em tempo real foi feito em referência ao ITRF05 (*International Terrestrial Reference Frame*), com coordenadas geodésicas empregando o elipsoide GRS-80. O processamento dos dados usou como referência o sistema geodésico WGS-84 e coordenadas

baseadas no sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), em sua zona 25 Sul (25S). Com a proximidade entre os esferóides empregados, não foram necessárias transformações de coordenadas geodésicas.

Quanto aos rastreios de controle de terra, foi ocupada uma estação próxima ao aeroporto do Arquipélago, como mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Visualização do posicionador (a), marco-testemunho (b) e localização no Arquipélago (c) da estação em terra ocupada.



Fonte: Adaptado de CPRM (2014).

Foram cumpridas uma seção a cada dia nos três dias de aquisição de dados LiDAR. Os dados brutos foram processados com uso do serviço *online* AUSPOS, mantido pelo Governo Australiano. Esse recurso provê o processamento gratuito de dados GPS RINEX em dupla frequência obtidos em modo estático com o emprego de linhas de base com estações IGS (*International GNSS Service*) (AUSPOS, 2018). As coordenadas finais foram obtidas a partir da média das três seções realizadas, considerando como referências as seguintes estações IGS: BRFT (Fortaleza-CE), CHPI (Cachoeira Paulista – SP) e KOUR (Kouru – Guiana Francesa).

As informações de navegação KGPS foram processadas no *software* Applanix POSPac, versão 5.3. As soluções direta e inversa foram comparadas até que apresentassem discrepância

menor do que 0,10 m (CPRM, 2014). A aplicação das informações de atitude a essas soluções gerou uma trajetória suavizada (SBET) para cada voo realizado.

3.2 Levantamento Batimétrico por MBES

As informações de profundidade utilizadas como referência para as análises foram obtidas em um levantamento hidrográfico realizado entre 21 de maio e 01 de junho de 2011, por equipe do Navio-Hidrográfico Sirius, unidade da DHN. Armazenados no BNDO, sediado na DHN, os dados foram processados pela equipe que realizou a campanha e posteriormente verificados por analistas do Centro de Hidrografia da Marinha, tendo seguido os procedimentos elucidados no Apêndice A.

A área planejada para a pesquisa foi formada por um polígono irregular que totalizava 5,88 km² em região próxima à enseada de Santo Antônio, indo até a profundidade de aproximadamente 55 m, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Área planejada para o levantamento MBES.



Fonte: Adaptado de DHN (2011).

Empregado nesta sondagem batimétrica, o ecobatímetro Kongsberg EM3000 emite pulsos com frequência de 300 KHz, com uma varredura de 130° de largura transversal e 1,5° de abertura longitudinal à plataforma de coleta. Ao receber o sinal de retorno, esse sistema gera até 127 feixes (KONGSBERG, 2001). A varredura foi realizada de modo a obter 2 recobrimentos (cobertura de 200%), o que permitiu a criação de uma grade com células espaçadas de 0,5m.

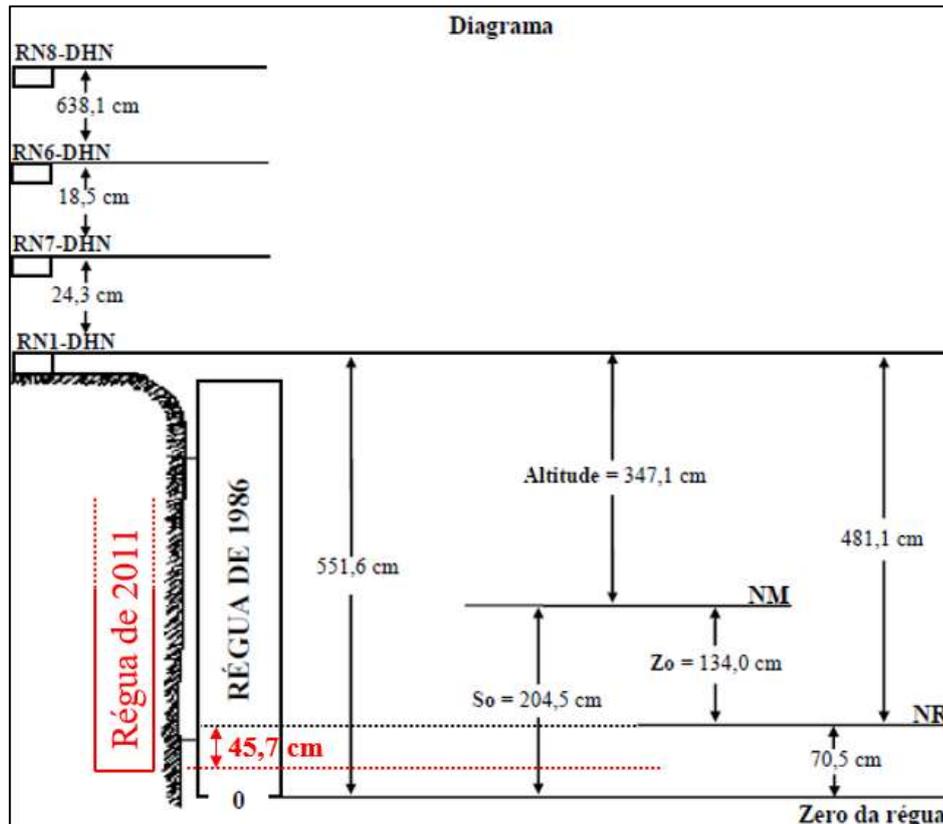
O acompanhamento da formação dos feixes acústicos durante a sondagem permitiu monitorar as alterações do perfil da velocidade de propagação do som na coluna d'água. De

forma a garantir a adequada aplicação dessa velocidade, perfis do parâmetro foram obtidos sempre que necessário.

O posicionamento e as compensações de atitude foram obtidos com o conjunto formado pelo RTG (*Real Time Gipsy*) C&C Technologies C-NAV 2050 e pelo sistema Kongsberg Seapath 200. Esse último, composto por um posicionador que utilizou duas antenas GPS (dados de *heading*) e uma IMU Kongsberg Seatex MRU-5 (informações de *roll*, *pitch* e *yaw*), integradas com a aplicação do filtro de Kalman (KONGSBERG, 2001).

A variação da maré foi registrada durante os dias de sondagem, a cada 10 minutos e com precisão centimétrica, por meio do marégrafo digital OTT Thalimedes. As alturas de maré foram gravadas com base na régua instalada por ocasião do levantamento. O nivelamento geométrico entre o topo da régua e as referências de nível instaladas nas proximidades da régua foi feito com o nível LEICA NA-724. Nessa tarefa, a diferença entre os desníveis das medições de ida e volta foi de 1 mm. Conforme mostra o diagrama adaptado a partir da Ficha da Estação Maregráfica, na Figura 21, o NR se encontrou 45,7 cm acima do zero da régua instalada, cota essa usada para a redução das profundidades medidas ao *datum* da carta.

Figura 21– Ficha da Estação Maregráfica com posicionamento da régua utilizada em 2011.



Fonte: Adaptado de DHN (2011).

A RN-6, aquela mais próxima à posição da régua de marés, foi rastreada por um receptor de dupla frequência NovAtel DL-V3, com antena NovAtel GPS-702-GG. A aquisição se deu a cada 5 segundos, com máscara de elevação de 5°, por aproximadamente 70 minutos. O processamento desses dados se deu pelo serviço PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e forneceu a altitude elipsoidal da RN de 0,69 m.

3.3 Metodologia Empregada

Os dados resultantes da batimetria LiDAR, constaram de coordenadas cartesianas X, Y e Z no sistema referencial geodésico WGS-84 e tiveram suas coordenadas transformadas para a projeção Universal Transversa de Mercator para importação no *software* Cloud Compare v. 2.9 beta. Isso permitiu a projeção da área aerolevantada por ALB sobre a região pesquisada por MBES. Dessa forma, pode-se selecionar os pontos da nuvem LiDAR pertencentes à região coincidente aos dois sistemas de coleta.

Para a geração de superfícies de interpolação, as informações LiDAR foram importadas no *software* Caris Base Editor, versão 4.4. Foi escolhida uma mesma técnica de interpolação tanto para as profundidades LiDAR quanto para as MBES. Assim, as análises se deram sobre um modelo digital do fundo marinho gerado pela técnica *shoalest depth true position*, detalhada no item 6 do Apêndice A. Essa modalidade oferece maior segurança ao navegante, ao considerar como valor da célula, a menor profundidade dentre as hipóteses amostrais nela contidas.

A análise da capacidade de cobertura dos dados LiDAR foi feita com a sobreposição dos dados ALB e análise da distribuição de feriados¹³. Foi avaliada ainda a incerteza vertical dos pontos obtidos pelo sistema LiDAR por meio de um método analítico baseado em um raio de busca centrado em cada uma das amostras ALB. Por último, foi verificada a relação das diferenças entre as profundidades medidas pelos dois sistemas com as variações do relevo marinho. Os métodos utilizados nessas análises são descritos a seguir.

¹³ Termo utilizado pelos serviços hidrográficos para trechos sem dados de profundidade dentro da área de um LH.

3.3.1 Análise da Cobertura do Aerolevanteamento LiDAR

Conforme explicitado nas Especificações para Levantamentos Hidrográficos de NOAA (2017), há duas classificações quanto à cobertura atingida para as superfícies batimétricas geradas a partir de dados LiDAR: Cobertura Completa e Cobertura de Reconhecimento. A Cobertura Completa considera uma varredura de 200%, com um espaçamento de até 4 m entre as amostras. Já a Cobertura de Reconhecimento aborda levantamentos que atingem especificações abaixo da Completa, usados para propósitos distintos da aplicação à cartografia náutica.

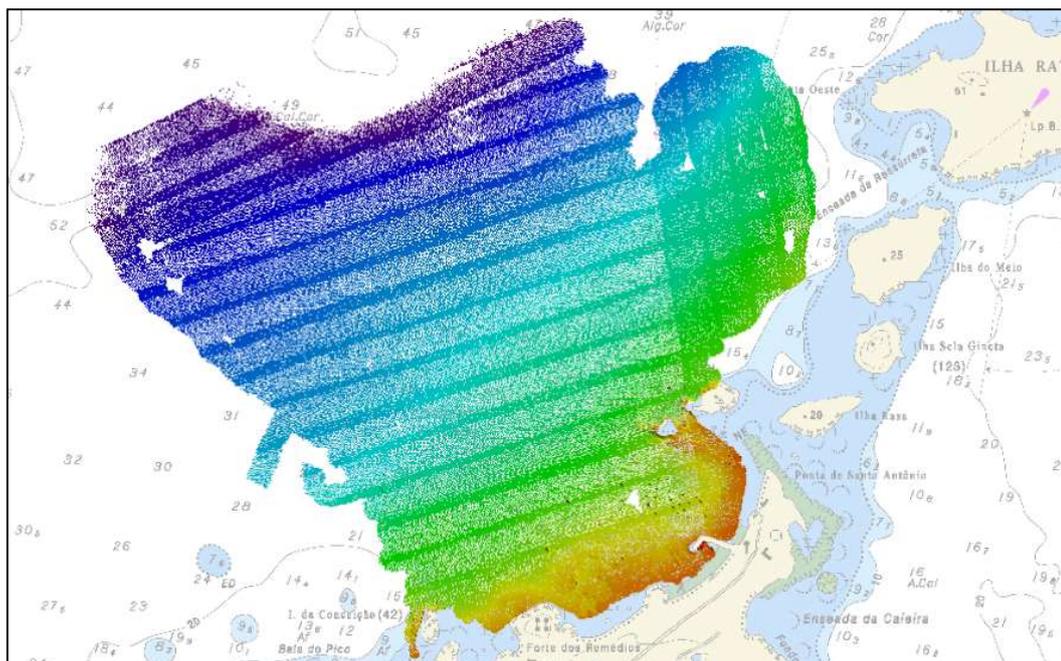
A avaliação da cobertura de fato alcançada se baseou nos conceitos acima citados e nos parâmetros escolhidos para o aerolevanteamento. O planejamento do levantamento LiDAR visou obter pontos amostrais espaçados de 5 m, com 100% de cobertura e uma sobreposição lateral entre faixas não baseada em percentual de varredura, mas no alcance de recobrimento de 30 m.

A avaliação quanto à adequação a uma Cobertura Completa se deu então, sobre as áreas onde houve duas varreduras sobrepostas (denominada como sendo cobertura de 200%), onde foram consideradas células com dimensões de 4, 5 e 6 m. A análise das grades de 4 m tem como propósito verificar a adequação ou não a uma Cobertura Completa dos trechos com dupla varredura. Por sua vez, a interpolação de 5 m permitiu a verificação da ocorrência de feriados ao se considerar o espaçamento de fato escolhido para o levantamento. Isso permitiu avaliar se o resultado final coadunou com o que foi previsto. Já a avaliação com células de 6 m propôs a verificação de uma margem de segurança, sugerindo uma interpolação de dados com espaçamento maior que o planejado para a aquisição.

Considerando-se os mesmos trechos de varreduras sobrepostas, analisou-se também a cobertura efetiva para cada faixa separadamente, com os mesmos dimensionamentos de células. Com isso, pode-se avaliar as varreduras a 100% sob o critério da Cobertura de Reconhecimento.

Nestas análises, foram criadas superfícies pela técnica *shoalest depth true position*, a partir do *software* Caris Base Editor, com a interpolação de todas as faixas em um único conjunto de dados. Assim, pode-se visualizar de maneira geral a sobreposição de faixas e a distribuição de feriados. Na Figura 22, pode-se observar a superfície de trabalho após a interpolação com células de 4 x 4 m.

Figura 22 – Superfície de Interpolação dos Dados LiDAR com células de 4 m.



Em seguida, no *software* Cloud Compare, foram segregadas as regiões onde ocorreu o recobrimento lateral das varreduras. Estas nuvens, separadas por faixas, foram então exportadas ao Caris Base Editor para a criação das superfícies interpoladas. Feita a interpolação, o uso da ferramenta *Identify Holidays* permitiu identificar os nós vazios nas superfícies criadas. Esse recurso classifica as células em três grupos: externas à área de interesse; pertencentes à área e com dados válidos; e contidas na área do levantamento, mas sem informações (CARIS, 2017).

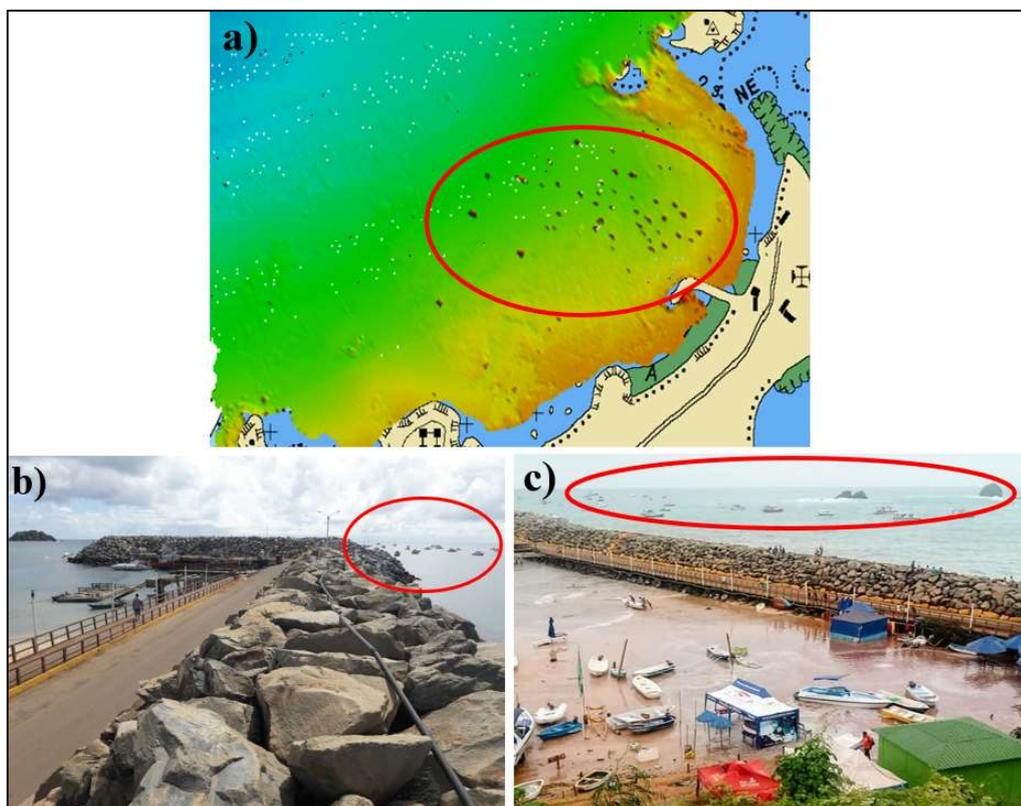
Com a contabilização das células classificadas como válidas ou vazias, pode-se avaliar a distribuição dos feriados nas áreas com recobrimento de faixas. Considerou-se os percentuais de células sem dados para cada espaçamento. Posteriormente, considerou-se para as mesmas seções, a cobertura atingida individualmente por cada faixa. Dessa forma, pode-se verificar os efeitos atingidos pelas varreduras de 100 e 200%.

3.3.2 Verificação da Incerteza Vertical das Amostras com Exclusão de *Outliers*

Conforme recomendado por NOAA (2017), em um levantamento hidrográfico, deve-se abordar a contribuição individual das sondagens para estimar a incerteza da superfície final gerada. Todavia, em casos onde não for possível estimar a incerteza total propagada para cada medição de profundidade, é recomendado atribuir um mesmo grau de incerteza para cada nó da grade criada. Como previamente explanado neste trabalho, variados fatores ambientais se relacionam à precisão LiDAR obtida, aos quais se somam as incertezas de cada sensor utilizado.

Previamente às análises, a verificação visual da superfície interpolada das elevações obtidas pelo sistema LiDAR denotou a ocorrência de erros grosseiros. Essas discrepâncias foram geradas por erros isolados decorrentes do sistema de varredura a LASER, algo muito comum. Em alguns casos, observou-se por exemplo, uma profundidade de 998 m, incompatível com as características da região. Outros erros percebidos se deram pela consideração de medições referentes a feições acima da superfície d'água, sendo informações também incompatíveis. Estas últimas, foram geradas devido à presença de embarcações fundeadas ou amarradas a boias nas proximidades do Porto de Santo Antônio, no instante do aerolevantamento. Nas posições desses barcos, as medições mostraram valores acima do nível da água e puderam ser identificados conforme ilustra a Figura 23a. Nas Figuras 23b e 23c, é destacada a distribuição de embarcações na região, próximas ao atracadouro e ao quebra-mar da enseada. Além de elevações da superfície emersa dessas embarcações, pontos do seu entorno também foram excluídos por informarem elevações abaixo d'água, porém próximas de zero e assim, não condizentes com o fundo natural desses locais.

Figura 23 – Superfície interpolada com a presença das embarcações no momento do aerolevantamento (a). Em (b) e (c), nota-se barcos pesqueiros e de esporte e recreio próximos ao quebra-mar.



As avaliações da incerteza foram conduzidas de duas formas distintas: uma por meio da comparação dos dados dos dois sistemas, após a qual, foram removidos os *outliers* identificados; e outra com o cálculo analítico da incerteza vertical, empregando-se somente a nuvem de pontos ALB.

a) Análise comparativa e remoção de *outliers*

Na análise comparativa entre os dados LiDAR e MBES, ambas nuvens foram interpoladas com células de 5 m, espaçamento previsto para a aquisição ALB. A subtração das profundidades aferidas forneceu as discrepâncias verticais entre os dados. Após a comparação entre as profundidades, conduziu-se a identificação e remoção de *outliers* dos dados ALB.

Dentre as técnicas mais utilizadas para a detecção de *outliers*, está a proposta por Tukey (1977), chamada de *boxplot*. Essa abordagem, pautada sobre dados em uma distribuição normal, faz uso do cálculo de limites superior (LS) e inferior (LI) definidos pelas Equações (9) e (10), nas quais se encontram o primeiro (Q1) e o terceiro (Q3) quartis e o intervalo interquartilício (AIQ), definido por $Q3 - Q1$.

$$LS = Q3 + 1,5 \cdot AIQ \quad (9)$$

$$LI = Q1 - 1,5 \cdot AIQ \quad (10)$$

De acordo com essa metodologia, ao se considerar uma distribuição normal de média zero e variância igual a um, as expressões acima gerariam um intervalo entre LS e LI correspondente a 99,3% das ocorrências.

Segundo Ferreira (2018), há outros métodos com aplicação a dados normais, como o *Z-Score* e o *Z-Score* modificado. O *Z-Score* faz uso da média (μ) e do desvio-padrão (σ), conforme expresso na Equação (11), onde X_i é a amostra e Z_i , o seu *score*. Caso $|Z_i| > 3$, a amostra é classificada como *outlier*.

$$Z_i = \frac{X_i - \mu}{\sigma}, \text{ com } X_i \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (11)$$

Já o *Z-Score* modificado busca utilizar estimadores mais resistentes aos efeitos da presença ou remoção de *outliers*. Para tal, a mediana (Q2) é usada no lugar da média e o desvio-padrão dá lugar ao Desvio Absoluto da Mediana (MAD) (IGLEWICZ e HOAGLIN, 1993), como mostrado na Equação (12).

$$M_i = \frac{0,6745 \cdot (X_i - Q2)}{MAD} \quad (12)$$

Na Equação acima, $MAD = \text{mediana}\{|X_i - Q_2|\}$, enquanto a constante 0,6745 faz-se necessária em função do valor de $E(MAD) = 0,6745 \cdot \sigma$ para uma grande amostra de distribuição normal. Para valores de $|M_i| > 3,5$, X_i é definido como *outlier*.

Conforme Meng *et al.* (2010), a remoção de *outliers* em dados LiDAR normalmente distribuídos, deve ser feita durante o pós-processamento, sendo que uma das metodologias propostas por estes autores e utilizada neste trabalho, é a seleção de pontos que se encontram no intervalo $\mu \pm k\sigma$, onde k é um escalar e σ , o desvio-padrão estimado sobre a amostra. Como pode ser visto em Carrilho e Galo (2017), ao se considerar um limiar baseado em um determinado número de vezes o desvio-padrão da amostra, chega-se a uma técnica de exclusão de elevações espúrias sem a necessidade de informações externas aos dados.

De maneira a confirmar a distribuição das medições, foi feito o teste de normalidade a partir das discrepâncias observadas entre as medições LiDAR e as MBES. De acordo com Johnson e Wichern (2007), a visualização da projeção dos quantis amostrais versus quantis esperados para uma distribuição normal, denominada plotagem Q-Q, é útil na verificação normalidade dos dados. A plotagem que demonstrar a proximidade da disposição desses pontos a uma linha reta indica a normalidade da amostragem. Da mesma maneira, esse gráfico oferece sugestões de causas para uma eventual não normalidade do conjunto amostral.

Ao analisarmos os quantis x_i de uma amostra, estes se aproximarão de uma distribuição normal caso haja uma relação linear dos pares x_i e q_i , estes últimos, os quantis teóricos para uma distribuição normal. Isto pode ser verificado pelo cálculo da expressão $\sigma q_i + \mu$, cujo resultado deve, em tal situação, se assemelhar ao quantil amostral x_i . A correlação dos pares pode ser medida pelo coeficiente de correlação r_Q linear da plotagem Q-Q, definido pela Equação 13, onde \bar{x} e \bar{q} se referem respectivamente às médias de x_i e q_i .

$$r_Q = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(q_i - \bar{q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}} \quad (13)$$

Segundo Filliben (1975), Looney e Gullledge (1985) e Shapiro e Wilk (1965), de forma geral, a verificação do coeficiente de correlação linear da plotagem Q-Q é uma poderosa ferramenta para o teste de normalidade. Para grandes amostras, como é o caso das discrepâncias extraídas das faixas, o teste proposto se aproxima da análise feita pelo método Shapiro-Wilk

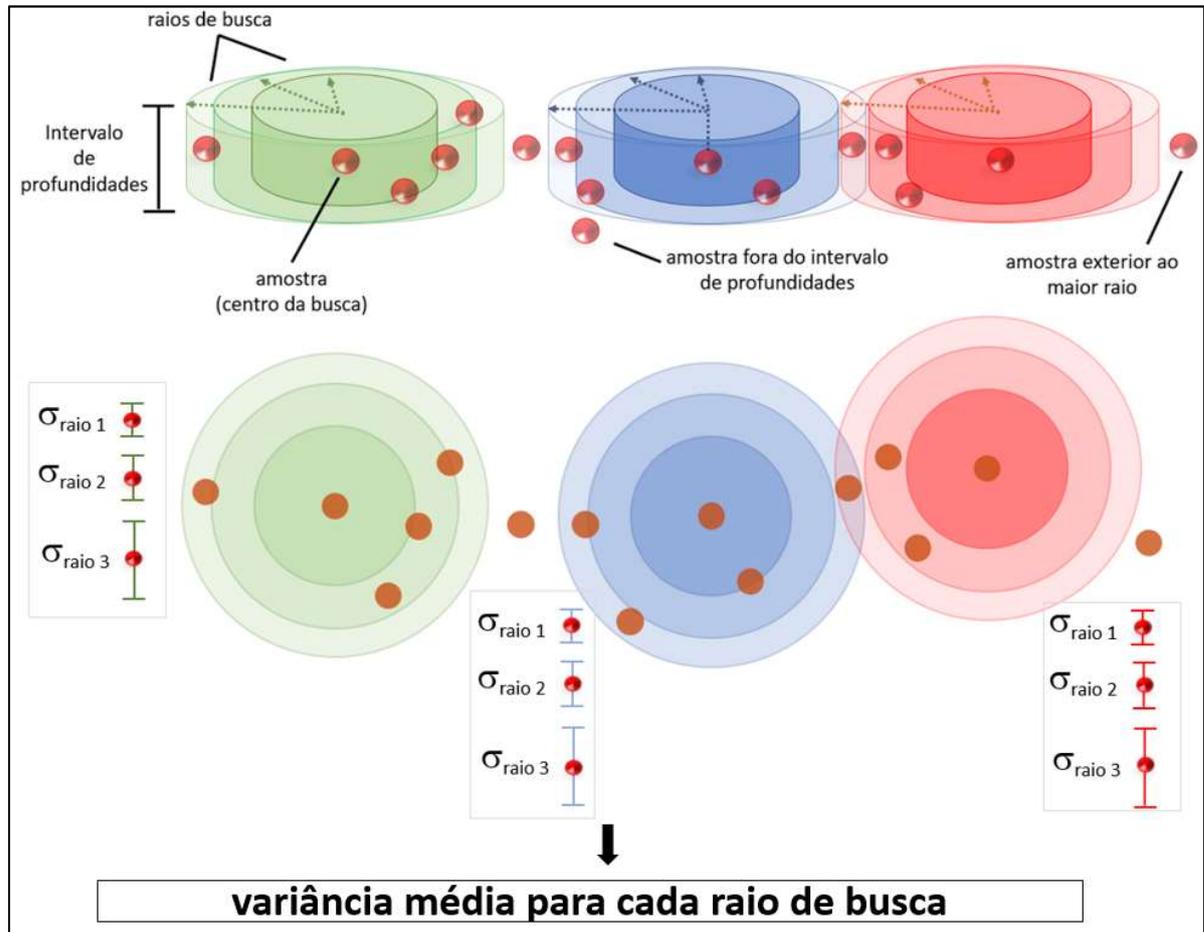
(JOHNSON e WICHERN, 2007 e VERRILL e JOHNSON, 1988) e indica a aceitação da hipótese de normalidade de um conjunto de n amostras quando o valor de r_Q se aproxima de 1.

b) Cálculo Analítico da Incerteza Amostral

Uma vez verificada a normalidade, identificados e desconsiderados os *outliers*, conduziu-se a análise da incerteza vertical amostral de acordo com a metodologia desenvolvida por Lockhart *et al.* (2008). Conforme destacam esses autores, a variância da profundidade aferida pode ser utilizada como uma estimativa analítica da incerteza vertical amostral LiDAR. Para tal, foram extraídas faixas de amostras de profundidades de 2 em 2 m, a partir de 1 m de profundidade. A seleção considerou como limite superior, a máxima profundidade detectada pelo sistema SHOALS-1000T.

Em uma rotina criada no *software* MATLAB R2015a, foram traçados raios de busca horizontal de 1 até 10 m para cada amostra, dentro de cada um dos intervalos de profundidade. O grupo de sondagens detectadas em um determinado raio teve a variância da profundidade calculada. Após os cálculos da variância com o centro da busca em cada um dos pontos amostrais do intervalo, a variância média foi determinada a partir das variâncias dos diferentes raios de busca. A Figura 24 exemplifica três raios de busca em amostras de uma hipotética faixa de profundidades, cada um centrado em uma amostra diferente.

Figura 24 – Visualização do cálculo analítico da incerteza vertical amostral dos pontos LiDAR em um dado intervalo de profundidades.



Em seguida, os conjuntos das médias de variâncias para cada intervalo de profundidades foram considerados para o traçado de variogramas e linhas de tendência por meio do *software* Excel.

3.3.3 Correlação das Discrepâncias Verticais com o Relevo Marinho

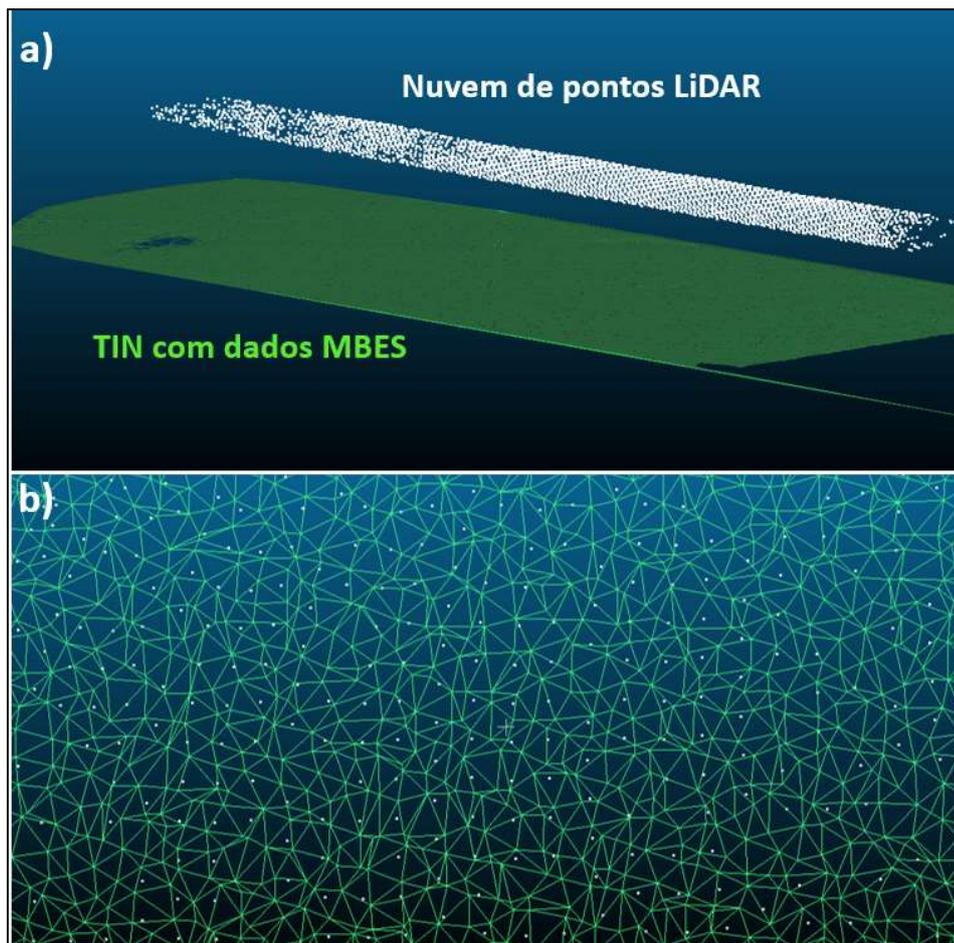
Para a análise da relação entre as variações do terreno levantado e as diferenças de profundidades encontradas entre as nuvens MBES e ALB, estabeleceu-se inicialmente o gradiente do fundo marinho referente à localização de cada amostra LiDAR, tomando como base os dados de profundidades MBES de referência.

Para tal, a nuvem MBES foi segregada por regiões coincidentes às das faixas de ALB com uso do *software* CARIS Base Editor e então interpolada em células de 3 x 3 m. A dimensão escolhida foi aquela que apresentou ausência de feriados nos dados MBES. Em seguida, os

dados MBES foram importados no *software* Cloud Compare com suas elevações zeradas. Dessa forma, obteve-se a projeção desses pontos no plano XY para a criação das redes irregulares de triângulos (TIN) correspondentes a cada faixa ALB. A interpolação de tais nuvens se deu pela Triangulação de Delaunay.

Dada uma faixa de voo, sobre a superfície TIN gerada com dados de MBES, foi projetada a nuvem de pontos obtidos por LiDAR. Essa projeção se deu também no plano XY, ou seja, sem a consideração das informações de profundidade. A Figura 25a, mostra uma nuvem de pontos LiDAR ainda com suas elevações e uma superfície TIN no plano XY com dados MBES de uma mesma faixa de voo. Na Figura 25b, há a projeção das amostras obtidas por ALB (pontos brancos) sobre a mesma superfície TIN (linhas em verde), dessa vez, ambos os conjuntos de dados com suas elevações zeradas.

Figura 25 – Nuvem de pontos LiDAR e TIN com dados MBES correspondentes (a) e pontos LiDAR e TIN projetados sobre o plano XY (b).



A partir da superfície TIN criada com dados MBES e da nuvem LiDAR projetadas no plano XY, aplicou-se uma rotina no *software* MATLAB R2015a/GNU Octave, com a qual identificou-se em qual das células do TIN se localizou a projeção em XY de cada amostra

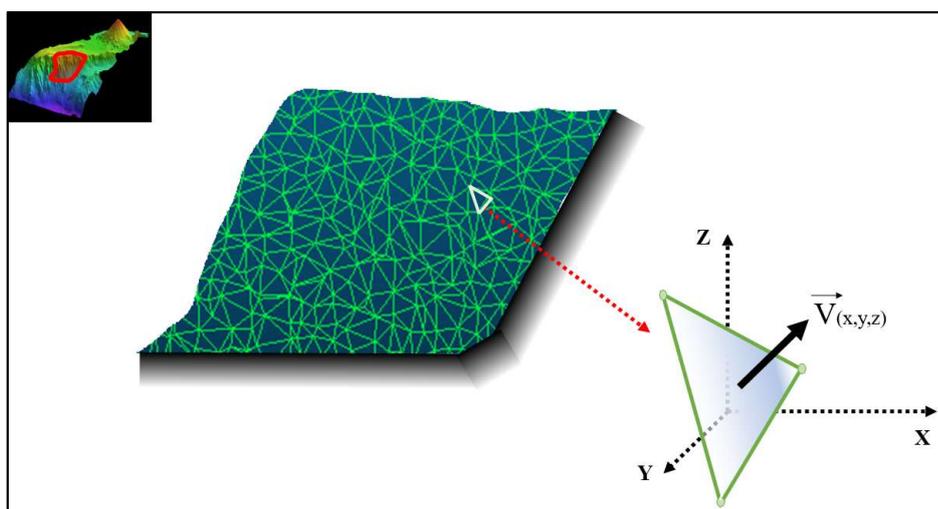
LiDAR. A identificação de qual triângulo um determinado ponto deve estar pode ser feita por diferentes procedimentos. No presente caso, optou-se por fazê-la com base no cálculo da área de um triângulo a partir do Teorema de Heron, expresso pela Equação 14, onde S é a área do triângulo, p é o seu semiperímetro e a , b e c , as medidas de seus lados. Com base nesse Teorema, pode-se concluir que, dado um ponto (P) qualquer e um triângulo (T), ao ligar P a cada um dos vértices de T , gera-se três novos triângulos. Se esse ponto estiver no interior do polígono ou sobre um dos seus lados, a soma dessas três novas áreas será igual à área do triângulo em questão, caso contrário, estará fora. A rotina criada em MATLAB/GNU Octave com este propósito se encontra no Apêndice B.

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} \quad (14)$$

Dessa forma, dado um ponto amostral da nuvem LiDAR, este pertencerá à uma determinada célula TIN quando a soma das áreas dos três triângulos criados pela ligação de suas coordenadas XY aos vértices da célula for igual à área da própria célula triangular.

Uma vez determinados os vértices MBES dos triângulos, nesse ponto com suas elevações novamente consideradas, e as amostras LiDAR neles contidas, determinou-se o vetor normal a cada célula das TINs. Para tal, utilizou-se da equação do plano determinado por três pontos, como ilustrado na Figura 26 abaixo.

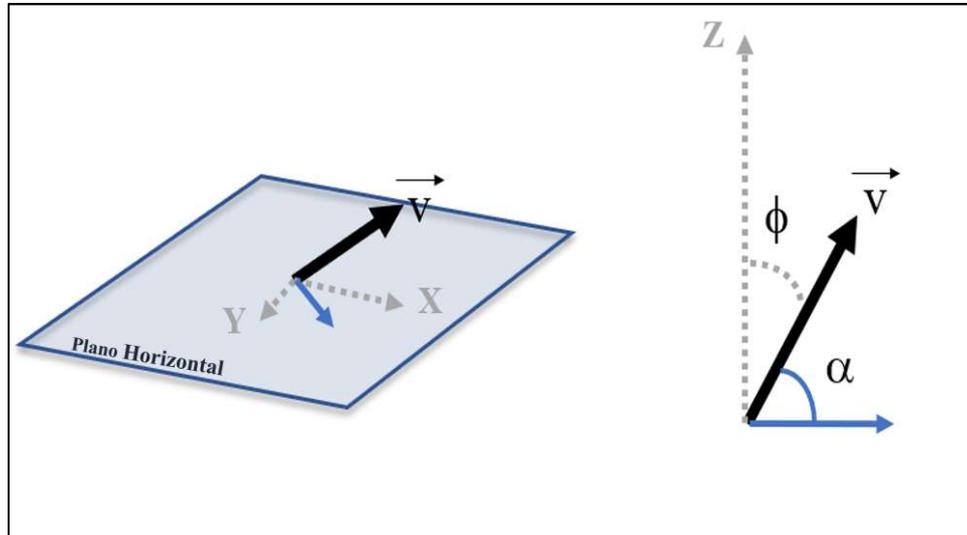
Figura 26 – Extrato de superfície TIN com exemplo de vetor normal ao plano de um determinado triângulo.



Em seguida, a partir dos coeficientes do vetor \vec{V} , calculou-se o seu ângulo α em relação ao plano horizontal XY , conforme mostrado na Figura 27. A tangente do ângulo ϕ complementar a α define a magnitude do gradiente da célula em relação ao eixo vertical. Este

valor passa a ser considerado a todos os pontos do triângulo, inclusive aos dados ALB localizados no seu interior.

Figura 27 – Projeção do vetor \vec{V} no plano XY e sua inclinação ϕ em relação ao eixo vertical.



A partir das informações de gradiente e das discrepâncias em profundidades para a nuvem LiDAR, já excluindo-se os *outliers*, analisou-se o grau de correlação entre esses parâmetros com base no coeficiente de Pearson, definido conforme a Equação 13.

Calculando-o para cada uma das faixas de voo, obteve-se a correlação entre a variação do solo marinho e as discrepâncias na medição de profundidades entre o sistema ALB e os dados de referência.

O percentual de células sem dados válidos para o conjunto total da Figura 28 demonstrou que não foram satisfeitos os critérios para o alcance de uma Cobertura Completa, com ocorrência de 8,734% de feriados.

Dentre os 24 trechos, encontra-se na Tabela 3, a relação das porções com maiores percentuais de feriados. É possível observar que esses trechos se localizaram nos dois extremos da área do aerolevante, sendo dois deles (1 e 5) com profundidades médias próximas às de máximo alcance do sistema ALB utilizado, como exibido na Figura 30 e os demais (19, 21 e 24), em área com ocorrência de arrebentação ou adjacente a ela, conforme informado pela carta náutica local e ilustrado na Figura 31.

Tabela 3 – Trechos de sobreposição com maiores ocorrências de feriados.

Trecho	Área	Ocorrência de Feriados	Profundidade Média
1	0,007 km ²	13,94%	46,63 m
5	0,019 km ²	12,47%	44,67 m
19	0,029 km ²	17,82%	12,22 m
21	0,018 km ²	17,48%	10,88 m
24	0,018 km ²	19,08%	7,45 m

Figura 30 – Áreas dos trechos 1 e 5, conforme Tabela 3, destacadas em vermelho.

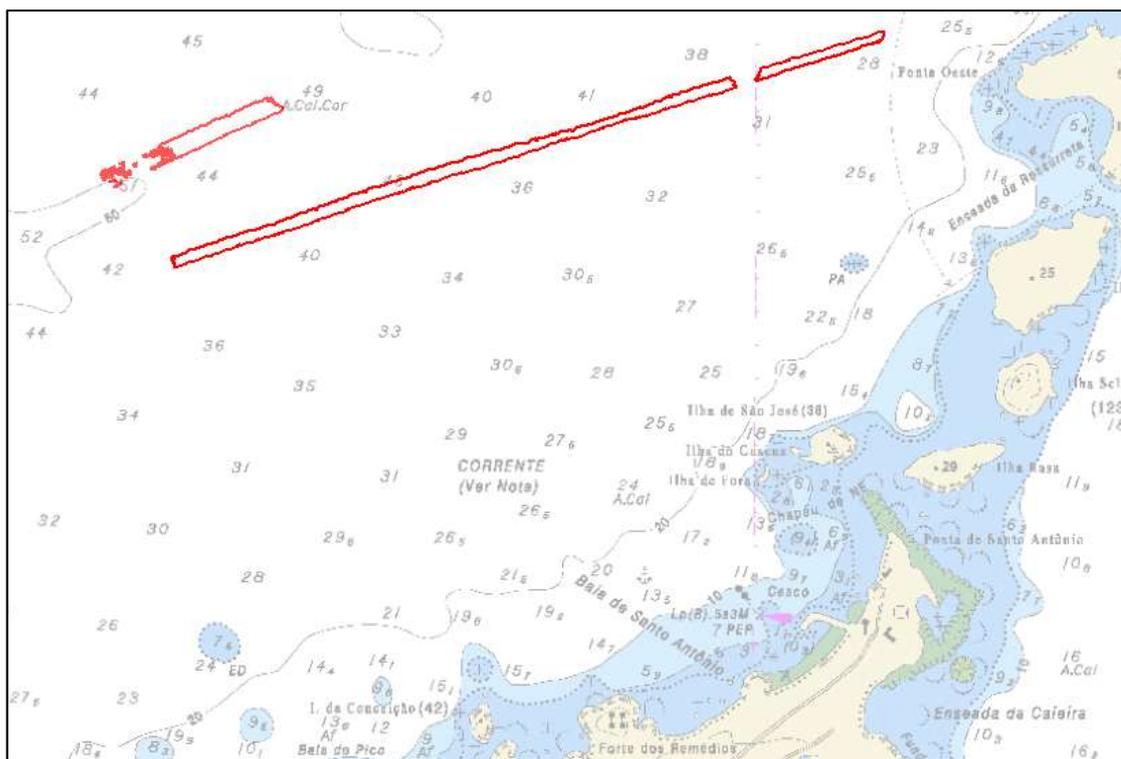
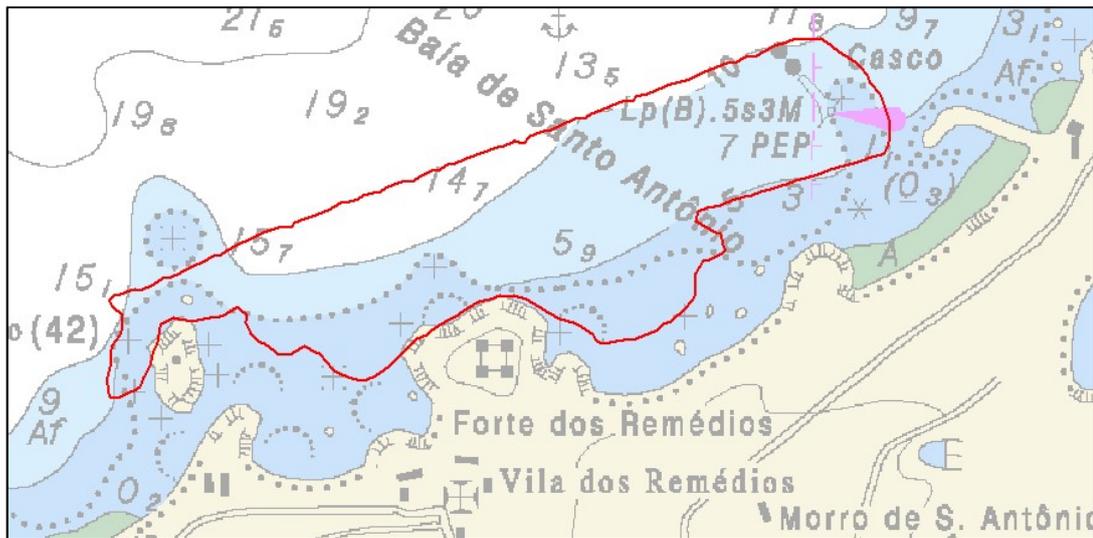


Figura 31 – Área dos trechos 19, 21 e 24, conforme Tabela 3, destacada em vermelho.

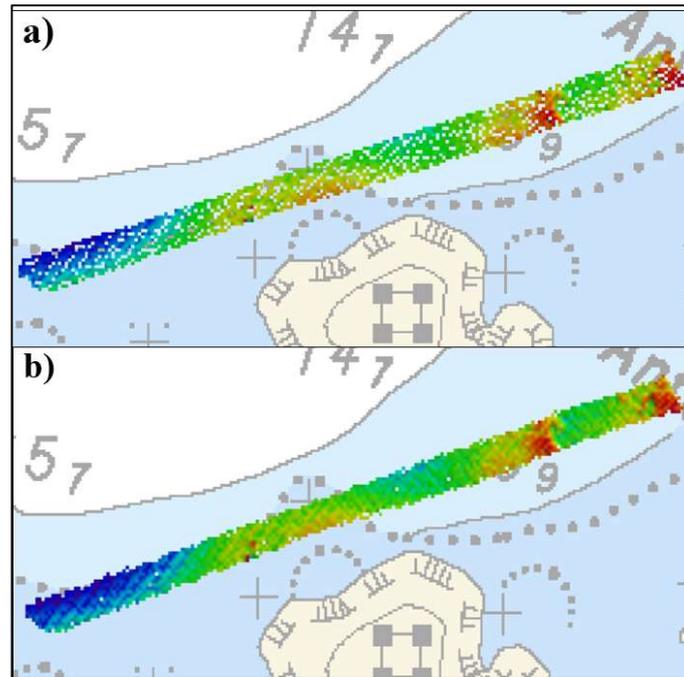


As concentrações de feriados nos trechos 1 e 5 corroboram a influência do aumento da profundidade na diminuição da intensidade do sinal de retorno do fundo, conforme expressa a Equação 8.

Já nos trechos 19, 21 e 24, há os efeitos da arrebentação que provocam perturbação à superfície e, conseqüentemente, dificultam a definição da interface ar/água. Neste caso, por se tratar de área com baixa profundidade, a ondulação é capaz também de gerar maior turbidez à coluna d'água. Tais fatores influenciam na capacidade de um sistema ALB em obter dados válidos, como afirmam Guenther e Goodman (1978) e observam Pe'eri *et al.* (2011).

Outrossim, foram realizadas mais duas faixas de voo sobre parte do trecho 21. Com as coletas adicionais, foi possível atingir 400% de varredura nessa porção e aumentar o alcance de sua cobertura para a quase totalidade, com a ocorrência de 0,94% de feriados. Na Figura 32, pode-se notar a superfície interpolada para as coberturas de 200% (a) e 400% (b) neste trecho.

Figura 32 – Visualização de trecho com sobreposição de duas (a) e de quatro faixas (b).



Estendendo-se a avaliação da Cobertura Completa para as interpolações em células de 5 x 5 m e 6 x 6 m, obtém-se sensível diminuição da taxa de feriados, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Percentual de células sem dados em trechos com sobreposição de duas faixas.

Ocorrências de Feriados com 200% de Varredura		
Células de 4 x 4 m	Células de 5 x 5 m	Células de 6 x 6 m
8,734 %	1,066 %	0,006 %

Dessa forma, depreende-se que ao se considerar o espaçamento de dados previsto, no aerolevanteamento estudado de 5 m, uma vez cumprido o levantamento em duas passagens (ou com 200% de varredura), atinge-se a completa cobertura do solo. Pode-se afirmar o mesmo para a interpolação com células de 6 m, logo acima do espaçamento planejado. Entretanto, tais espaçamentos são maiores do que os recomendados pelo NOAA e não atendem aos seus requisitos para a Cobertura Completa.

A avaliação sob os parâmetros da Cobertura de Reconhecimento para os mesmos 2,85 km² apontou a não adequação aos critérios. A taxa de ocorrência de feriados analisada para cada faixa nesses trechos se encontra na Tabela 5. Os percentuais foram agrupados por dimensão da célula da superfície interpolada.

Tabela 5 – Percentual individual de feriados em trechos em que houve sobreposição, para toda a área de trabalho.

Ocorrências de Feriados com 100% de Varredura		
Células de 4 x 4 m 39,089 %	Células de 5 x 5 m 8,100 %	Células de 6 x 6 m 7,203 %

4.2 Verificação da Incerteza Vertical das Amostras com Exclusão de *Outliers*

a) Análise comparativa e remoção de *outliers*

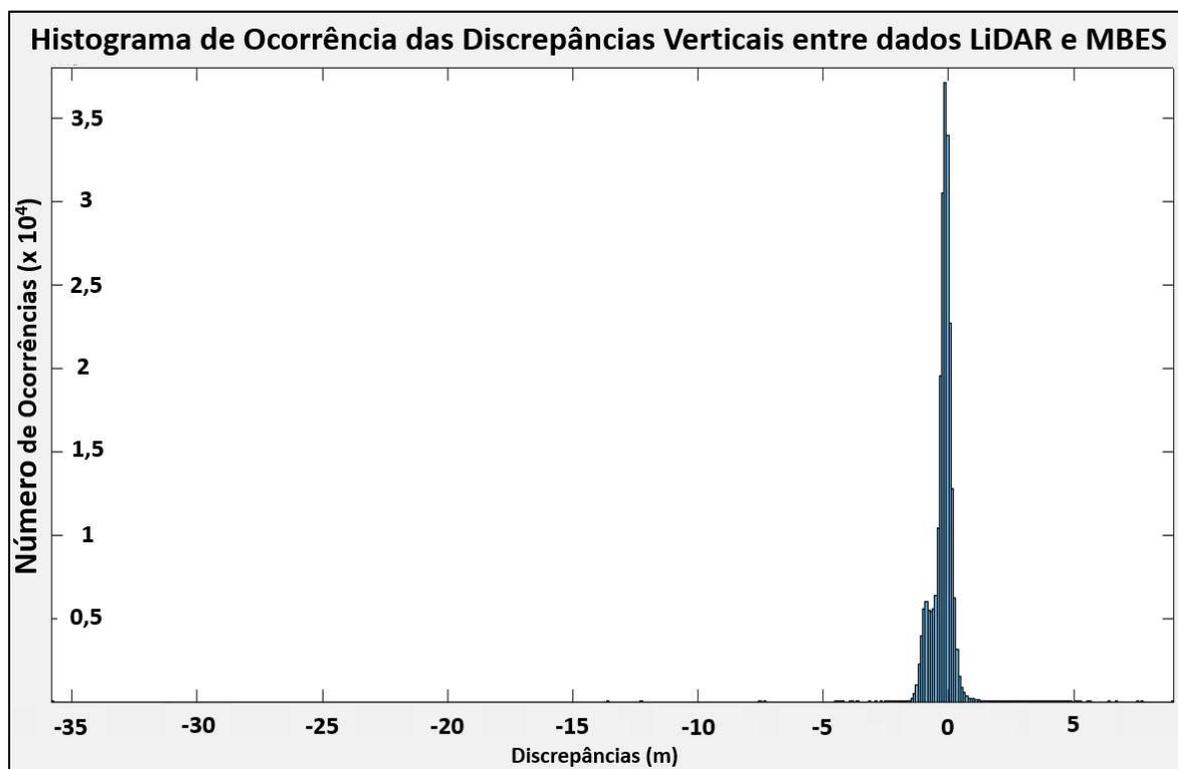
Na análise comparativa entre dados LiDAR e MBES, a subtração das profundidades das células da grade LiDAR pelas dos dados MBES, para aproximadamente 223.557 pontos, conforme a Tabela 6, gerou diferenças com uma média de -0,215 m. Essa discrepância denotou que as profundidades obtidas por ALB foram em média mais rasas, tal qual apurado por Costa *et al.* (2009). Conforme destacado por esses autores, uma explicação plausível para o fato pode ser encontrada na determinação do pulso correspondente ao fundo marinho por parte do sistema ALB.

No SHOALS-1000T, a detecção do sinal de resposta no comprimento de onda do verde ocorre em dois canais de recepção. Em ambos podem ser identificados até dois pontos da onda de retorno como candidatos para a definição do fundo marinho. A seleção do pulso se dá de acordo com critérios definidos previamente ao levantamento, os HAPS (*Hydrographer Accessible Parameters*), descritos no item 1 do Apêndice A. No que tange à configuração dos HAPS para a detecção de fundo, o método de escolha do retorno pode ser feita pelo critério do sinal mais forte, último pulso ou primeiro pulso (GUENTHER *et al.*, 1996). O sinal mais forte se refere ao pulso com a melhor relação sinal-ruído (SNR) entre os candidatos. Neste modo de operação, diminui-se a probabilidade de identificar formações como rochas ou corais. O último pulso evita a falsa detecção de objetos ou seres vivos localizados entre a superfície e o solo marinho, mas está relacionado à mínima SNR entre os 4 potenciais candidatos. Já a seleção do primeiro sinal é aquela que melhor descreve as feições submarinas, e por isso, a que melhor atende ao propósito do aerolevante estudado. A escolha desse critério, portanto, passa a considerar um menor tempo de propagação do LASER sob a água e pode estar relacionada com a obtenção de profundidades por ALB consistentemente menores do que as coletadas por MBES.

O espectro de diferenças entre as informações ALB e MBES mostrou uma grande amplitude de valores de discrepâncias, acima de cinco vezes o desvio-padrão estimado de 0,395

m. A verificação da distribuição desses valores por faixa de voo com o emprego da Equação 13 indicou a distribuição normal dessas informações. O histograma com todo o conjunto das discrepâncias obtidas (223.577 pontos) pode ser visto na Figura 33.

Figura 33 – Histograma das discrepâncias verticais



Empregando-se a abordagem de Galo e Carrilho (2017), a eliminação de valores de discrepâncias maiores do que 1,96 vezes o desvio-padrão aferido, classificados como *outliers*, manteve como aceitas as diferenças dentro do intervalo igual a $\mu \pm 1,96\sigma$. A adoção desse limiar confere às profundidades mantidas um nível de significância de 5%, mesmo percentual considerado nas incertezas sugeridas em especificações da OHI. Com auxílio do *software* MATLAB/GNU Octave e considerando as informações originais (e, portanto, com valores espúrios), bem como após a exclusão de elevações espúrias, obteve-se as análises estatísticas constantes das Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6 – Análise das diferenças com todos os dados, incluindo os pontos espúrios.

Análise das Discrepância ALB x MBES (com outliers)	
Média das Diferenças	-0,215 m
Desvio-Padrão das Diferenças (σ)	0,395 m
Diferença Máxima	8,977 m
Diferença Mínima	-35,794 m
Número de Pontos	223557

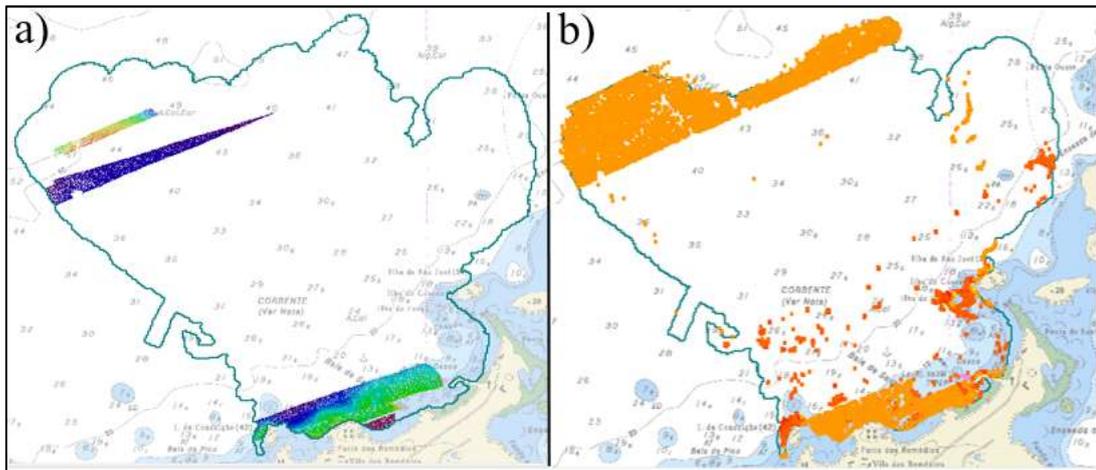
Tabela 7 – Análise das diferenças sem os pontos espúrios ($\mu \pm 1,96\sigma$).

Análise das Discrepância ALB x MBES (sem <i>outliers</i>)	
Média das Diferenças	-0,187 m
Desvio-Padrão das Diferenças (σ)	0,289 m
Diferença Máxima	0,559 m
Diferença Mínima	-0,988 m
Número de Pontos	210846
Pontos Excluídos	12711 (5,69%)

Cabe ressaltar o caráter subjetivo e não trivial presente em um processamento com eliminação de *outliers*. A desconsideração de dados com claras características distintas das esperadas em um fundo marinho, como as informações acima da linha d'água provenientes de embarcações, oferece baixo risco de equívocos. Todavia, o estabelecimento de um limiar para a caracterização de uma medição como espúria ou não envolverá a possibilidade da eliminação de informações relevantes, especialmente no mapeamento de um ambiente como o fundo marinho. A impossibilidade da redundância exata na medição de um mesmo ponto localização nesse tipo de levantamento adiciona complexidade ao processamento e à análise dos dados.

Ao se considerar o conjunto das discrepâncias desde os outliers até aquelas cujo módulo foi acima de 1 m, obtém-se a concentração de tais amostras em regiões próximas às dos trechos com menor cobertura de varredura, relacionados na Tabela 3. Na Figura 34, observa-se a localização desses trechos (a) e a distribuição dos pontos em questão (b). Ressalta-se que os trechos exibidos na Figura 34a se referem somente às porções onde houve sobreposição de faixas. Pode-se observar uma relação espacial entre as concentrações desses feriados e dos maiores valores de discrepância.

Figura 34 – Distribuição dos trechos de pior cobertura do solo (a) e dos pontos com discrepância maiores que 1 m e menores que -1 m, em laranja (b).



b) Cálculo Analítico da Incerteza Amostral

Na avaliação da incerteza vertical amostral dos dados LiDAR, variogramas com suas respectivas linhas de tendência foram gerados a partir dos conjuntos das médias de variâncias para cada intervalo de profundidades.

Em todos os casos, escolheu-se a linha polinomial cuja ordem melhor se ajustou aos dados da amostra. As Figuras 35 e 36, mostram os gráficos formados com suas respectivas linhas de tendência.

Figura 35 – Variogramas das variâncias médias de 1 a 25 m de profundidade.

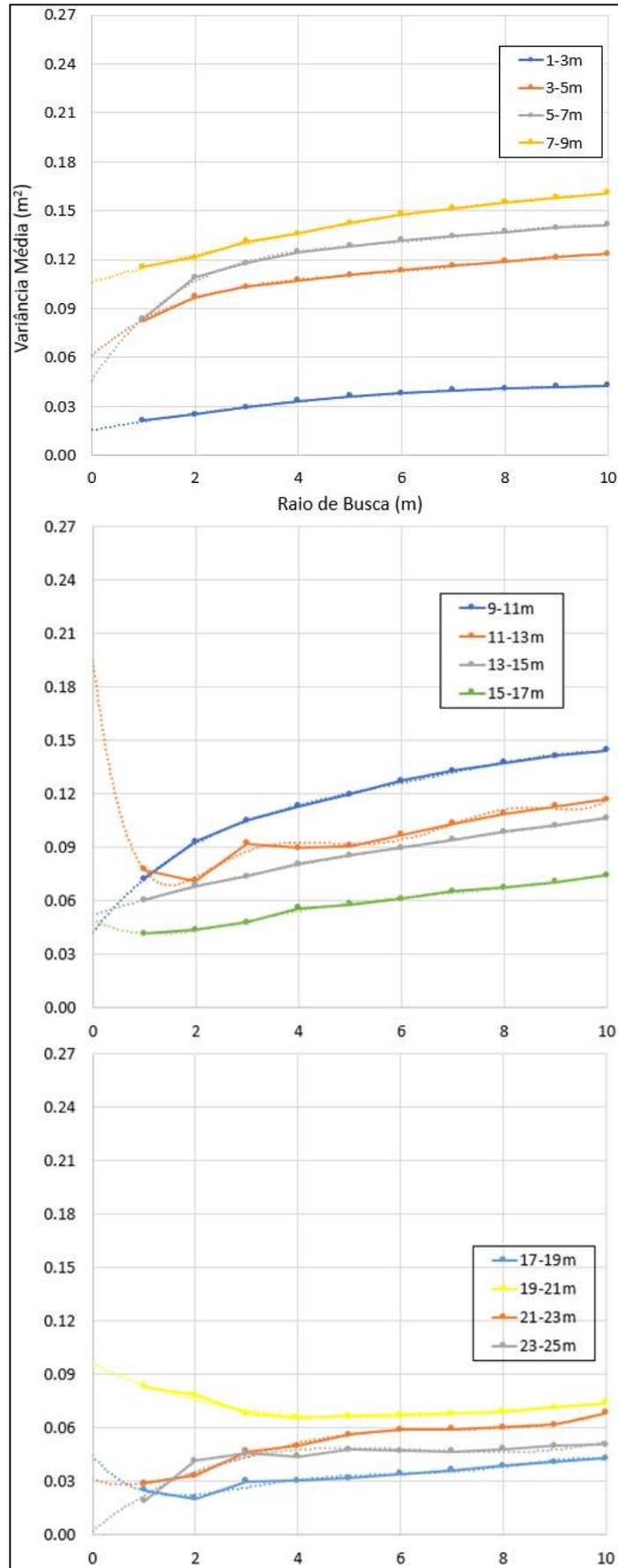
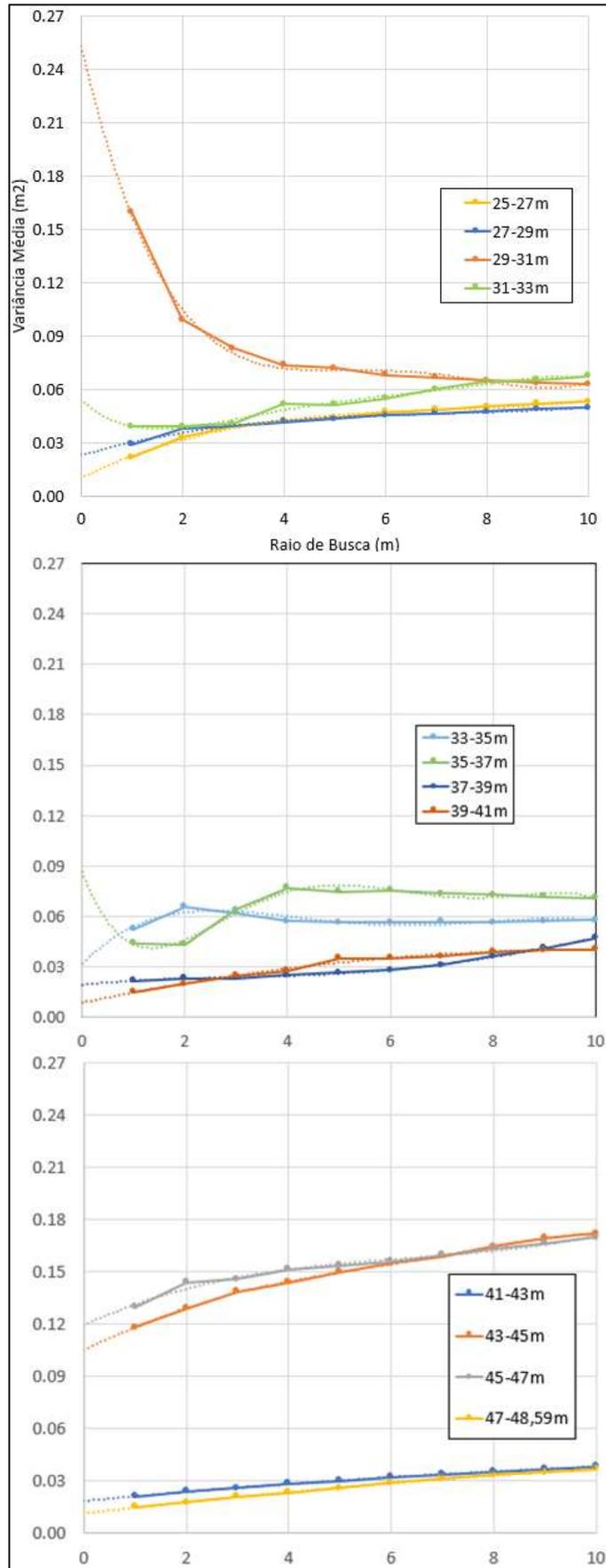


Figura 36 – Variogramas das variâncias médias de 25 a 48,59 m de profundidade.



Para determinar a variância amostral de cada intervalo de valores, considerou-se o valor de interseção das linhas de tendência com o eixo das ordenadas.

De forma a avaliar se, para um dado intervalo de profundidades, a incerteza amostral calculada atendeu à tolerância da ordem 1A definida pelas especificações da OHI (S-44), o valor da raiz quadrada da variância média foi comparado à incerteza máxima constante da publicação da OHI. A Tabela 8 elenca os resultados alcançados.

Tabela 8 – Avaliação das incertezas amostrais calculadas para os dados LiDAR

Intervalo	Variância (para um raio de busca nulo)	Incerteza Amostral (para um raio de busca nulo)	Tolerância da Ordem 1A para a menor profundidade do intervalo	Avaliação
1-3 m	0,0154 m ²	0,124 m	0,500 m	Atendida
3-5 m	0,0614 m ²	0,248 m	0,502 m	Atendida
5-7 m	0,0465 m ²	0,216 m	0,504 m	Atendida
7-9 m	0,1065 m ²	0,326 m	0,508 m	Atendida
9-11 m	0,0427 m ²	0,207 m	0,514 m	Atendida
11-13 m	0,1943 m ²	0,441 m	0,520 m	Atendida
13-15 m	0,0524 m ²	0,229 m	0,528 m	Atendida
15-17 m	0,0495 m ²	0,222 m	0,537 m	Atendida
17-19 m	0,0444 m ²	0,211 m	0,547 m	Atendida
19-21 m	0,0957 m ²	0,309 m	0,558 m	Atendida
21-23 m	0,0310 m ²	0,176 m	0,570 m	Atendida
23-25 m	0,0022 m ²	0,047 m	0,583 m	Atendida
25-27 m	0,0102 m ²	0,101 m	0,596 m	Atendida
27-29 m	0,0229 m ²	0,151 m	0,611 m	Atendida
29-31 m	0,2528 m ²	0,503 m	0,626 m	Atendida
31-33 m	0,0541 m ²	0,233 m	0,642 m	Atendida
33-35 m	0,0317 m ²	0,178 m	0,659 m	Atendida
35-37 m	0,0867 m ²	0,294 m	0,676 m	Atendida
37-39 m	0,0194 m ²	0,139 m	0,694 m	Atendida
39-41 m	0,0087 m ²	0,093 m	0,712 m	Atendida
41-43 m	0,0187 m ²	0,137 m	0,731 m	Atendida
43-45 m	0,1054 m ²	0,325 m	0,750 m	Atendida
45-47 m	0,1194 m ²	0,346 m	0,770 m	Atendida
47-48,59 m	0,1115 m ²	0,107 m	0,790 m	Atendida

A tolerância para ordem 1A definida pela NORMAM-25 foi calculada com base no menor valor do intervalo, sendo assim a mais exigente para a faixa de profundidades em questão. Esse valor de referência foi definido de acordo com a Tabela 1 e Equação 6, descritos no item 2.4.3.

Foi possível observar que todas as incertezas amostrais calculadas atendem à tolerância da ordem 1A. Lockhart *et. al* (2008), com aplicação da mesma metodologia, alcançaram resultados semelhantes, sendo suas análises realizadas com dados da Baía de Shilshole (EUA) onde atingiram até 16 m de profundidade, com todos os intervalos analisados se adequando à ordem 1A da OHI, mesmo critério adotado pela NORMAM-25. Conforme estes autores, a estimação dessa incerteza leva em conta as condições ambientais do momento do levantamento, as quais poderão variar com alterações de local, parâmetros de turbidez da coluna d'água e de reflectância do solo marinho.

Todavia, cabe ressaltar que esse parâmetro da OHI é definido com base na incerteza total propagada referente somente aos sensores empregados. Já a incerteza amostral determinada foi obtida a partir das medições efetivamente realizadas e que dessa forma, englobam as contribuições à incerteza por parte dos equipamentos e das condições do ambiente de operação.

4.3 Correlação das Discrepâncias Verticais com o Relevo Marinho

Para a análise da relação entre a discrepância vertical das amostras LiDAR e os dados de referência, os resultados foram gerados por faixa de voo, como mostra a Tabela 9.

Com base no coeficiente de correlação de Pearson determinado, foi possível verificar que não houve significativa relação entre o perfil do relevo marinho e as diferenças entre as profundidades LiDAR e MBES por cada faixa de voo.

Diferentes resultados foram alcançados por Costa *et al.* (2009). Seus estudos resultaram em maiores discrepâncias em relação aos dados de MBES de referência para os trechos com mais de 25% de variação da profundidade. Os autores citam como motivador desse resultado, o maior *footprint* do sistema LiDAR em relação ao MBES. Todavia, ainda que os dados tenham sido obtidos com espaçamentos de 4 x 4 m e 5 x 5 m, as faixas de voo executadas naquela pesquisa não descreveram uma trajetória paralela às linhas isobatimétricas da carta náutica da região e consideraram informações obtidas por LiDAR até a profundidade de 35 m, enquanto os dados do presente trabalho alcançaram 48,59 m, próxima da máxima teórica do sistema empregado.

Tabela 9 – Coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre as discrepâncias verticais e o gradiente do solo.

Faixa	Coeficiente de Correlação (r)
1	0,111
2	0,422
3	0,309
4	0,233
5	-0,101
6	-0,059
7	-0,066
8	-0,061
9	0,008
10	0,076
11	0,068
12	0,108
13	0,110
14	0,070
15	0,021
16	0,091
17	0,031
18	0,177
19	0,446
20	0,339
21	0,247
22	0,403
23	0,251
24	-0,337
25	0,428
26	-0,247
27	0,440
28	-0,085

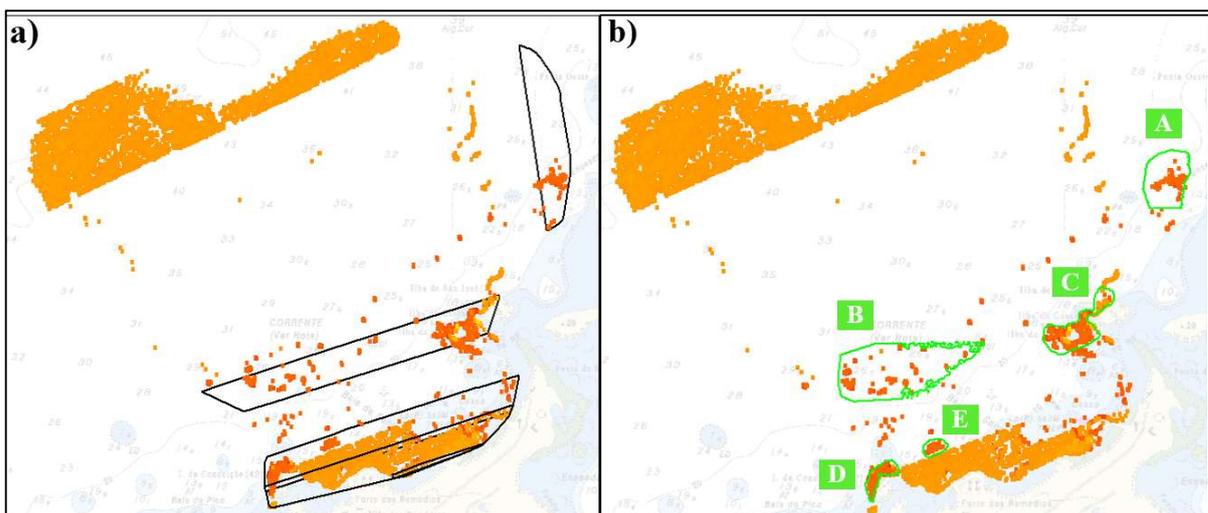
Já Pe'eri *et al.* (2011) coletaram dados LiDAR em levantamentos com espaçamento de 3 x 3 m em duas varreduras sobrepostas (200% de recobrimento) e com 4 x 4 m de espaçamento,

com 100% de cobertura. Ao compará-los com profundidades de referência obtidas com MBES, os autores concluíram que a eficiência da detecção do fundo por um sistema ALB não possui correlação relevante com valores absolutos de inclinação do solo marinho. Suas constatações sugerem que o meio ambiente de propagação ao longo da coluna d'água como sendo um fator preponderante na habilidade de mapeamento LiDAR, especialmente em águas com menos de 7 m de profundidade. Conforme a mesma pesquisa, tal fator passaria a agir em conjunto com a influência das características do solo a partir dos 7 m de profundidade.

Bouhdaoui *et al.* (2014) obtiveram conclusões diferentes ao avaliarem a relação de inclinação do solo marinho com o deslocamento do ponto de detecção do fundo na forma de onda de retorno. Em seus estudos, os autores encontraram significativa correlação entre a variação do terreno e a alteração da profundidade medida para diversos *footprints*.

Não obstante, neste trabalho verificou-se que nas faixas 2, 19, 22, 25 e 27, o valor de r foi maior que 0,4, indicando uma correlação positiva moderada. Tais faixas compreendem regiões destacadas na Figura 34b, nas quais houve discrepâncias maiores que 1 m, como ilustrado na Figura 37a. Este fato poderia sugerir que a análise por faixa tenha suavizado o grau de correlação entre o gradiente e a discrepância dessas regiões, grau este, que poderia ser relevante a partir de um determinado limiar de variação do terreno.

Figura 37 – Regiões com correlação moderada compreendendo pontos de discrepâncias maiores que 1 m (a) e porções analisadas (circuladas em verde) (b).



Com isso, conduziu-se nova análise, com emprego do mesmo método, sobre as regiões mostradas na Figura 37b. Nessas porções, considerou-se todas as amostras coletadas, independentemente da faixa de voo, obtendo-se os valores descritos na Tabela 10.

Tabela 10 – Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre discrepância vertical e gradiente do fundo em trechos com discrepâncias maiores que 1 m.

Região	r
A	0,383
B	0,310
C	0,308
D	0,266
E	0,382

Os coeficientes da tabela acima indicam que de fato não houve relação significativa entre as variações do terreno e as discrepâncias verticais aferidas, mesmo após a análise de um conjunto de dados pertencente a diferentes faixas de voo.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Embora os dados utilizados neste trabalho tenham sido obtidos por um aerolevante voltado para a identificação de feições submersas de interesse à CPRM e não para a atualização de documentos náuticos, a análise dos dados sob critérios aceitos pela OHI, DHN e NOAA fornece orientações para trabalhos futuros que busquem a produção e atualização de cartas náuticas por meio desta técnica.

A avaliação da cobertura do solo alcançada se baseou em critérios do NOAA, Serviço Hidrográfico que já realiza a atualização de seus produtos com informações ALB, atividade ainda não efetuada no Brasil, até o momento. O estabelecimento de requisitos para a cobertura do solo marinho a partir de dados LiDAR ainda não foi contemplado pela NORMAM-25. Dessa forma, à luz dos parâmetros adotados pelo NOAA, pode-se concluir que com a dupla varredura (200% de recobrimento), com espaçamento de 5 x 5 m, não é possível garantir a cobertura total do solo. Contudo, com uma maior sobreposição de faixas, os requisitos necessários poderão ser cumpridos, como pode ser observado a partir dos resultados obtidos em um trecho com 400% de cobertura.

A interpolação de dados em células de dimensões acima do espaçamento planejado mostrou que é possível estabelecer uma margem de segurança para a interpolação de uma superfície sem ocorrência de células vazias. Dessa forma, espera-se que um aerolevante com espaçamento de 3 x 3 m e dupla varredura (200% de recobrimento) seja capaz de atingir a cobertura completa ao se considerar estes mesmos dados compilados em uma grade com células de 4 x 4 m.

As características das regiões onde houve maiores dificuldades para a obtenção de dados válidos mostram que em um levantamento hidrográfico LiDAR deve-se dispendir especial atenção às regiões próximas ao alcance máximo do sistema e em áreas de arrebentação. O planejamento para o mapeamento dessas regiões deve contemplar um número maior de faixas e se possível, considerar uma maior potência na emissão do sinal.

De forma a atender às ordens de levantamento Especial e 1A, um sistema batimétrico deve ter a capacidade de identificar feições cúbicas com pelo menos 1 m e 2 m, respectivamente (DHN, 2017). A densidade apresentada pelos dados do sistema ALB disponíveis não atinge esse propósito. Dessa forma, informações de profundidade dessa natureza poderiam ser aplicadas como complementação àquelas obtidas por MBES, mas não como suas substitutas, de maneira similar ao que é realizado por NAVOCEANO em suas cartas náuticas. A identificação de feições submarinas com a cobertura total do solo em regiões onde a folga

abaixo da quilha é crítica, não foi observada no aerolevanteamento LiDAR. Esta capacidade é essencial à segurança das atividades de navegação. Todavia, sistemas ALB desenvolvidos posteriormente ao SHOALS-1000T possuem a capacidade de produzir menor *footprint* à superfície da água, além de gerar informações com menores espaçamentos. Enquanto o sistema SHOALS-1000T apresenta um *footprint* nominal do feixe verde de 2 m de diâmetro, o ALTM Aquarius, por exemplo, atinge de 0,3 m a 0,6 m. Quanto ao espaçamento mínimo, o ALTM Aquarius pode amostrar a cada 0,4 m, já o SHOALS-1000T, de 2 m em 2 m (QUADROS, 2013). Embora tragam como consequência maior tempo necessário para cobrir uma mesma área, maiores densidades e uma menor área escaneada por feixe oferecem maior confiabilidade às profundidades medidas.

Ainda que a incerteza vertical amostral obtida por ALB resulte valores que atendem à Ordem 1A prevista na NORMAM-25, a análise desse trabalho se tratou de uma estimativa que envolve fatores causados pelo ambiente no instante da aquisição dos dados e que compreende também os parâmetros dos sensores empregados no sistema.

Conforme Pereira (2016), é a partir da incerteza vertical total (IVT) e não da amostral, que se define adequadamente se um levantamento se enquadra ou não em uma determinada ordem. Para calcular a IVT, utiliza-se a Lei de Propagação das Incertezas. Todavia, por ser uma estimativa associada às fontes de erro de medições e considerar as contribuições dadas somente pelos sensores, a IVT não leva em conta os efeitos provocados pelo ambiente de operação.

Sugere-se para um maior aprofundamento das avaliações do emprego da ALB à cartografia náutica, a realização de levantamentos sobre um campo de provas. A adoção de diferentes parâmetros de espaçamento de dados, alturas de voo e potência de emissão em uma mesma região, sob condições ambientais semelhantes, poderá oferecer informações necessárias para a modelagem de erros dos sensores. Para que possa ser definida a IVT de um levantamento ALB, faz-se necessária a estimativa dos erros desses equipamentos. Tais procedimentos já foram contemplados para uma extensa lista com os sensores mais utilizados em um MBES, após uma série de testes conduzidos pela Universidade de New Hampshire (CARIS, 2017). Atualmente, não há estudos semelhantes para os sensores LiDAR batimétricos.

Embora a maioria dos LH realizados no Brasil façam uso dados MBES, o aumento da atividade econômica e busca por maiores índices de eficiência aumentariam a demanda por aerolevanteamentos LiDAR. Assim ocorrendo, tornar-se-ia de suma importância a estimativa de parâmetros que permitam aferir a qualidade das informações de ALB para que estas possam então, satisfatoriamente complementar a batimetria aplicada às cartas náuticas brasileiras.

REFERÊNCIAS

APPLANIX. **Datasheet POS AV**. Applanix, 2017.

AUSPOS. **AUSPOS - Online GPS Processing Service**. Disponível em: <<http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/auspos>>. Acesso em: 18 jun. 2018.

BOUHDAOUI, A.; BAILLY, J.; BAGHDADI, N.; ABADY, L. Modeling the Water Bottom Geometry Effect on Peak Time Shifting in LiDAR Bathymetric Waveforms. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 11, n. 7, p. 1285-1289, 2014.

BAKER, E. T.; LAVELLE, J. W. The Effect of Particle Size on the Light Attenuation Coefficient of Natural Suspensions. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. 5, p. 8197–8203, 1984.

BANIC, J.; CUNNINGHAM, G. Airborne Laser Bathymetry : A Tool for the Next Millennium. **EEZ Technology**, v. 3, p. 75–80, 1998.

BILLARD, B.; WILSEN, P. J. Sea surface and depth detection in the WRELADS airborne depth sounder. **Applied Optics**, v. 25, n. 13, p. 2059–2066, 1986.

BUTLER, J. B.; LANE, S. N.; CHANDLER, J. H.; PORFIRI, E. Through-Water Close Range Digital Photogrammetry in Flume and Field Environments. **Photogrammetric Record**, v. 17, n. 99, p. 419–439, 2002.

CARIS. **Caris Training Module Multibeam Data Processing With CUBE**. Fredericton: Caris, 2014. 220p.

CARIS. **CARIS HIPS and SIPS 10.2 Reference Guide**. Fredericton: Caris, 2017. 494p.

CARRILHO, A. C.; GALO, M. Remoção de Pontos Espúrios em Dados Lidar Aerotransportado a Partir da Análise Estatística das Altitudes. **Simpósio Brasileiro de Geomática**, p. 323–327, 2017.

CARSWELL, A. I.; SIZGORIC, S. Underwater probing with laser radar. In: **The Uses of Lasers for Hydrographic Studies**, Estados-Unidos. National And Space Administration, 1973.

CISTERNELLI, M.; MARTIN, C.; GALLAGHER, B.; BRENNAN, R. A Comparison of Discrete Tidal Zoning and Tidal Constituent and Residual Interpolation (TCARI) Methodologies For Use in Hydrographic Sounding Reduction. In: **U.S. Hydrographic Conference**, Norfolk, Estados-Unidos, 2007.

COSTA, B. M.; BATTISTA, T. A.; PITTMAN, S. J. Comparative evaluation of airborne LiDAR and ship-based multibeam SoNAR bathymetry and intensity for mapping coral reef ecosystems. **Remote Sensing of Environment**, n. 113, p. 1082–1100, 2009.

CPRM. **Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados de Relevo, com Aplicação da Tecnologia a Laser Aerotransportada (Área Emersa e Submersa)**. Fernando de Noronha, 2014. 89p.

DAIMON, M.; MASUMURA, A. Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region. **Applied Optics**, v. 46, n. 18, p. 3811–3820, 2007.

DE MOUSTIER, C. Bottom Detection Methods. In: **1998 Coastal Multibeam Training Course Notes**, New Brunswick, Canada: The University of New Brunswick, 1998.

- DHN, D. de H. e N. **Relatório do Levantamento Hidrográfico Geo-Imageamento II/Atualização Cartográfica I**. Niterói, 2011. 41p.
- DHN, D. de H. e N. **Normas Da Autoridade Marítima Para Levantamentos Hidrográficos - Normam25 Rev.2**. 2. ed. Niterói: DHN, 2017.
- DODD, D.; MILLS, J. Ellipsoidally Referenced Surveys Separation Models. In: **FIG Working Week 2012**. Roma, Itália: 2014.
- DONNELLY, C.; KRAUS, N.; LARSON, M. State of Knowledge on Measurement and Modeling of Coastal Overwash. **Journal of Coastal Research**, v. 22, n. 4, p. 965–991, 2006.
- FERREIRA, I. O. **Controle de Qualidade em Levantamentos Hidrográficos**. 2018. Universidade Federal de Viçosa, 2018.
- FILLIBEN, J. J. The Probability Plot Correlation Coefficient Test for Normality. **Technometrics**, v. 17, n. 1, p. 111–117, 1975.
- FRANCO, A. S. **Marés: Fundamentos, Análise e Previsão**. 2. ed. Niterói: DHN, 2009.
- FRODGE, S. L.; DELOACH, S. R.; REMONDI, B.; LAPUCHA, D.; BARKER, R. A. Real-Time on-the-Fly Kinematic GPS System Results. **Journal of The Institute of Navigation**, v. 41, n. 2, p. 175–186, 1994.
- GAO, J. Bathymetric mapping by means of remote sensing : methods , accuracy and limitations. **Progress in Physical Geography**, v. 1, n. 33, p. 103–116, 2014.
- GORDON, H. R. Interpretation of airborne oceanic lidar : effects of multiple scattering. **Applied Optics**, v. 21, n. 16, p. 2996–3001, 1982.
- GORDON, H. R.; BROWN, O. B.; JACOBS, M. M. Computed Relationships Between the Inherent and Apparent Optical Properties of a Flat Homogeneous Ocean. **Applied Optics**, v. 14, n. 2, p. 417–427, 1975.
- GUENTHER, G. C. **Airborne Laser Hydrography - System Design and Performance Factors**. Rockville: National Ocean Service, 1985.
- GUENTHER, G. C. Airborne Lidar Bathymetry. In: SENSING, A. S. OF P. AND R. (Ed.). **Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual**. 2. ed. Maryland: Sensing, American Society of Photogrammetry and Remote, 2007. p. 253–320.
- GUENTHER, G. C.; BROOKS, M. W.; LAROCQUE, P. E. New Capabilities of the “SHOALS” Airborne Lidar Bathymeter. **Remote Sensing Of Environment**, n. 73, p. 247–255, 2000.
- GUENTHER, G. C.; CUNNINGHAM, A. G.; LAROCQUE, P. E.; REID, D. J. Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry. In: Proceedings, 20th EARSeL Symposium - Workshop on LiDAR Remote Sensing of Land and Sea, Dresden, Alemanha. **Anais...** Dresden, Alemanha: 2000.
- GUENTHER, G. C.; GOODMAN, L. R. Laser Applications For Near-Shore Nautical Charting. **Ocean Optics**, v. 160, n. V, p. 174–183, 1978.
- GUENTHER, G. C.; LAROCQUE, P. E.; LILLYCROP, W. J. Multiple surface channels in SHOALS airborne lidar. **Ocean Optics**, v. 2258, n. XII, p. 422–430, 1994.
- GUENTHER, G. C.; THOMAS, R. W. L.; LAROCQUE, P. E. Design Considerations for Achieving High Accuracy with the Shoals Bathymetric Lidar System. **SPIE**, v. 2964, n. 54, 1996.

- HARE, R.; CALDER, B.; ALEXANDER, L.; SEBASTIAN, S. Multi-beam Error Management. **Hydro International**, v. 8, n. 1002, p. 6–9, 2011. Disponível em: <<https://scholars.unh.edu/ccom/1002>>.
- HICKMAN, G. D.; HOGG, J. E. Application of an Airborne Pulsed Laser for Near Shore Bathymetric Measurements. **Remote Sensing of Environment**, n. 1, p. 47–58, 1969.
- HILLDALE, R. C.; RAFF, D. Assessing the ability of airborne LiDAR to map river bathymetry. **Earth Surface Processes and Landforms**, n. 33, p. 773–783, 2008.
- HOUSER, C.; HAPKE, C.; HAMILTON, S. Controls on coastal dune morphology , shoreline erosion and barrier island response to extreme storms. **Geomorphology**, v. 100, p. 223–240, 2008.
- IGLEWICZ, B.; HOAGLIN, D. **How to Detect and Handle Outliers**. Milwaukee: ASQ Press, 1993. p. 87.
- IRISH, J. L.; LILLYCROP, W. J. Scanning laser mapping of the coastal zone : the SHOALS system. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 2–3, n. 54, p. 123–129, 1999.
- IVANOV, A. P. Study of optical characteristics of water media using pulsed sounding. **ZhPS**, v. 2, n. 17, p. 232–240, 1972.
- JAWAK, S. D.; LUIS, A. J. Spectral information analysis for the semiautomatic derivation of shallow lake bathymetry using high-resolution multispectral imagery : A case study of Antarctic coastal oasis. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1331–1338, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.173>>.
- JERLOV, N. V. **Marine Optics**. Amsterdã: Elsevier Scientific Pub. Co, 1976.
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2007.
- KONGSBERG. **Multibeam Echo Sounder EM 710 - Maintenance Manual**. 3. ed. [s.l.: s.n.]
- KRABILL, B.; MARTIN, C. F. Aircraft Positioning Using Global Positioning System Carrier Phase Data. **Journal of Geophysical Research**, v. 34, n. 1, 1987.
- LAROCQUE, P. E.; BANIC, J. R.; CUNNINGHAM, A. G. Design description and field testing of the SHOALS-1000T airborne bathymeter. In: **SPIE Laser Radar Technology and Applications**, IX, Bellingham, 2004.
- LAROCQUE, P. E.; WEST, G. R. Airborne Laser Hydrography : An Introduction History of Airborne Laser Hydrography. In: **IHB Workshop on Hydrographic Activities in the ROPME sea area and Red Sea**, Kuwait, 1999.
- LEE, D. S.; SHAN, J. Combining Lidar Elevation Data and IKONOS Multispectral Imagery for Coastal Classification Mapping Combining Lidar Elevation Data and IKONOS Multispectral Imagery for Coastal Classification Mapping. **Marine Geodesy**, v. 2, n. 26, p. 37–41, 2003.
- LEIPER, I. A.; PHINN, S. R.; ROELFSEMA, C. M.; JOYCE, K. E.; DEKKER, A. G. Mapping Coral Reef Benthos, Substrates, and Bathymetry, Using Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) Data. **Remote Sensing**, v. 6, p. 6423–6445, 2014.
- LESSER, M. P.; MOBLEY, C. D. Bathymetry , water optical properties , and benthic classification of coral reefs using hyperspectral remote sensing imagery. **Coral Reefs**, v. 26, p. 819–829, 2007.

- LOCKHART, C.; LOCKHART, D.; MARTINEZ, J. Total Propagated Uncertainty (TPU) for Hydrographic LiDAR to Aid Objective Comparison to Acoustic Datasets. **International Hydrographic Review**, v. 9, n. 2, p. 19–27, 2008. Disponível em: <<https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/20821>>.
- LOONEY, S. W.; GULLEDGE, T. R. Use of the Correlation Coefficient with Normal Probability Plots. **American Statistical Association**, v. 39, n. 1, p. 75–79, 1985.
- LYZENGA, D. R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. **Applied Optics**, v. 17, n. 3, p. 379–383, 1978.
- MANDLBURGER, G.; PFENNIGBAUER, M.; PFEIFER, N. Analyzing Near Water Surface Penetration in Laser Bathymetry - A Case Study at The River Pielach. In: **ISPRS Workshop Laser Scanning**. Turquia, 2013.
- MENG, X.; CURRIT, N.; ZHAO, K. Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data : A Review of Critical Issues. **Remote Sensing**, v. 2, p. 833–860, 2010.
- MIGUENS, A. P. Projeções cartográficas; a carta náutica 2.1. In: **Navegação: a Ciência e a Arte**. Niterói: DHN, 1996. p. 232.
- MILAN, D. J.; HERITAGE, G. L.; HETHERINGTON, D. Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river. **Earth Surface Processes and Landforms**, n. 32, p. 1657–1674, 2007.
- MONTEYS, X.; HARRIS, P.; CALOCA, S.; CAHALANE, C. Spatial Prediction of Coastal Bathymetry Based on Multispectral Satellite Imagery and Multibeam Data. **Remote Sensing**, v. 7, p. 13782–13806, 2015.
- MOYLES, D.; ORTHMANN, A.; LOCKHART, C.; LAGE, J. da S. Hydrographic Mapping by Combined Operations Using Bathymetric LiDAR and Multibeam Echosounder in Alaska. **The Hydrographic Journal**, n. 117, 2005.
- NASA, N. A. and A. **Modis Aqua**. Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. Acesso em: 18 jun. 2018.
- NIEMEYER, J.; SOERGEL, U. Opportunities of Airborne Laser Bathymetry for the Monitoring of the Sea Bed on the Baltic Sea Coast. **ISPRS - Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XL, p. 179–184, 2013.
- NOAA, N. O. and A. A. **HYDROGRAPHIC SURVEYS SPECIFICATIONS AND DELIVERABLES**. U.S. Department of Commerce, 2017.
- NOVATEL. **NovAtel L1 / L2 GPSAntenna Model 512 - User Information**. 2. ed. [s.l.] NovAtel Incorporated, 1999.
- OHI, O. H. I. **Hydrographic Dictionary - Publication S-32**. 5. ed. Monaco: OHI, 1994. v. I
- OHI, O. H. I. **Especificações da OHI para Levantamentos Hidrográficos - Publicação S-44**. 5. ed. Monaco: OHI, 2008.
- OHI, O. H. I. **Manual de Hidrografia - Publicação C-13**. Monaco: OHI, 2010. v. 1
- OHI, O. H. I. **The Need For Hydrographic Services - Publication M-2**. 3.0.6 ed. Monaco: OHI, 2016.
- OHI, O. H. I. Tides and Water Levels. In: **Resolutions Of The International Hydrographic Organization Publication M-3**. 2. ed. Monaco: OHI, 2017.
- OPTECH. **SHOALS-1000T Specifications**. Optech Incorporated, 2006.

- PARK, J.-Y.; SHRESTHA, R. L.; CARTER, W. E.; TRUPELL, G. H. Land cover classification using combined ALSM (LIDAR) and color digital photography. In: **ASPRS Annual Conference**, St. Louis, 2001.
- PE'ERI, S.; MORGAN, L. V; PHILPOT, W. D.; ARMSTRONG, A. A. Land-Water Interface Resolved from Airborne LIDAR Bathymetry (ALB) Waveforms. **Journal of Coastal Research**, n. 62, p. 75–85, 2011.
- PEREIRA, D. L. da S. Incertezas e Controle de Qualidade na Medição de Profundidades por Meio de Ecobatímetros Multifeixe. **Anais Hidrográficos**, p. 152, 2016.
- PEREIRA, D. L. da S. **Improving Shallow-Water Multibeam Target Detection at Low Grazing Angles**. 2015. The University of New Brunswick, 2015.
- PHILPOT, W. D. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. **Applied Optics**, v. 28, n. 8, p. 1569–1578, 1989.
- QUADROS, N. D. Unlocking the Characteristics of Bathymetric Lidar Sensors. **Lidar Magazine**, v. 3, n. 6, p. 1–4, 2013.
- SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic Laser Ranging Principles and Processing**. Londres: Press CRC, 2008.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 4, n. 52, p. 591–611, 1965.
- SMITH, M.; VERICAT, D.; GIBBINS, C. Through-water terrestrial laser scanning of gravel beds at the patch scale. **Earth Surface Processes and Landforms**, n. 37, p. 411–421, 2012.
- STEINVALL, K. O.; KOPPARI, K. R.; KARISSON, U. C. M. Experimental evaluation of an airborne depth-sounding lidar. **Optical Engineering**, v. 6, n. 32, p. 1307–1321, 1993.
- STUMPF, R. P.; HOLDERIED, K.; SINCLAIR, M. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. **American Society of Limnology and Oceanography**, v. 1, n. 48, p. 547–556, 2003.
- TIMOFEYEVA, V. A.; GOROBETS, F. I. On the relationship between the attenuation coefficients of collimated and diffuse light fluxes. **Atmospheric and Oceanic Physics (Academy of Science USSR)**, n. 3, p. 291–296, 1967.
- TUKEY, J.W. **Exploratory Data Analysis**. Princeton: Ed. Pearson, 1977.
- TYLER, J.E. PREISENDORFER, R. W. **The Sea**. M.N. Hill, 1962.
- USACE, U. S. A. C. of E. Hydrographic Surveying. In: **Engineer Manual**. USACE, 2013. p. 6–9.
- VELASCO, J.; MOLINA, I.; MARTINEZ, E.; ARQUERO, Á.; PRIETO, J. F. Sea Bottom Classification by Means of Bathymetric LIDAR Data. **IEEE Latin America Transactions**, v. 12, n. 4, p. 590–595, 2014.
- VERRILL, S.; JOHNSON, R. A. Tables and Large-Sample Distribution Theory for Censored-Data Correlation Statistics for Testing Normality. **American Statistical Association**, v. 83, n. 404, p. 1192–1997, 1988.
- VOGELZANG, J.; WENSINK, G. J.; HYDRAULICS, D.; KOOIJ, M. Van Der; ALPERS, W.; MATTHEWS, J. P.; BRIDGE, M. Mapping of Sea Bottom Topography in a Multi Sensor Approach. In: **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Pasadena, United States of America, 1994.

WANG, C.; PHILPOT, W. D. Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, p. 123–135, 2007.

WEBSTER, T. L.; FORBES, D. L.; DICKIE, S.; SHREENAN, R. Using topographic lidar to map flood risk from storm-surge events for Charlottetown , Prince Edward Island , Canada. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 1, p. 64–76, 2004.

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.

YANG, L.; TAXT, T. Multibeam Sonar Bottom Detection Using Multiple Subarrays. In: **Oceans 97 MTS**, Halifax, Canada, 1997.

ZHAO, J. Improved Model for Depth Bias Correction in Airborne LiDAR Bathymetry Systems. **Remote Sensing**, v. 9, n. 710, 2017.

APÊNDICE A - Etapas de levantamentos batimétricos LiDAR e MBES

Para a realização de um levantamento batimétrico, seja ele por ALB ou MBES, devem ser realizadas algumas etapas previamente à aquisição dos dados, outras durante a coleta e por último, no processamento das informações de campo.

A descrição das etapas a seguir se baseou na execução de duas coletas batimétricas. Primeiramente, apoiou-se em um aerolevanteamento topobatimétrico realizado em 2011 sobre o Arquipélago de Fernando de Noronha – PE, pela empresa Fugro Pelagos Inc. (FPI) em nome da empresa Fugro Airborne Surveys - Lasa Prospecções S/A, esta, contratada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Mineralógicos (CPRM), no qual foi utilizado o sistema de batimetria por LiDAR SHOALS-1000T, da Optech Integrated. E posteriormente, tomou como base um levantamento hidrográfico, com uso de MBES, efetuado no mesmo ano e região, por equipe do Navio Hidrográfico Sirius, unidade pertencente à DHN.

A.1 Planejamento do Aerolevanteamento LiDAR

Para o planejamento das faixas de aerolevanteamento a serem executadas pelo sistema SHOALS, faz-se uso da ferramenta MAPS (*Management and Planning Software*) (OPTECH, 2006).

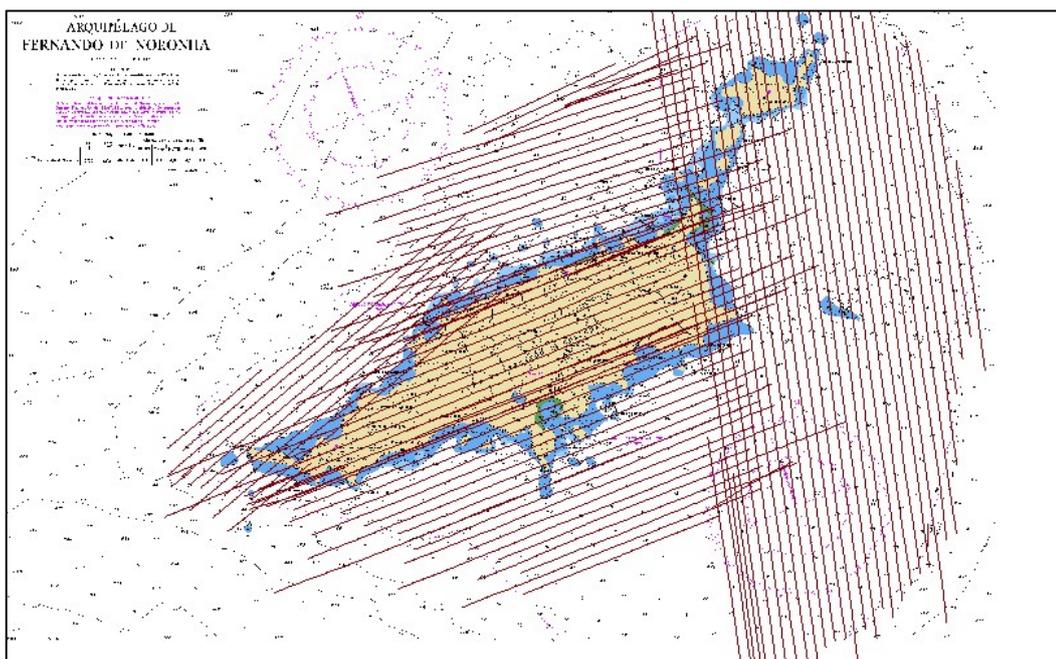
Nessa etapa, são definidos alguns parâmetros que devem ser considerados durante o voo. São eles, os ambientais (*Project Environmental Parameters – PEPS*) e os hidrográficos (*Hydrographer Accessible Parameters – HAPS*). Esses parâmetros são definidos anteriormente à aquisição, podendo alguns sofrer alterações durante o voo. Os PEPS contêm informações de claridade da água, altura de ondas, índice de refração, máxima profundidade alcançável, além de parâmetros limites para o sistema. Os HAPS são mais raramente modificados em voo e contêm opções de modos de operação do sistema, como a definição da sequência de canais na definição da superfície e o critério para identificação do pulso de detecção (primeiro pulso, pulso mais forte, último pulso). Nas opções de HAPS, define-se também os limiares de tempo a partir da emissão do pulso para detecção da superfície da água por parte do canal verde. Tais parâmetros evitam que o sistema considere o fundo marinho como superfície, em casos em que a superfície não for detectada e de forma análoga, não permitir que a superfície seja considerada fundo, situação mais provável em áreas rasas. Além desses, dados da aeronave e informações como altura de voo também são consideradas nas opções HAPS.

Nas configurações de *hardware* disponíveis estão a escolha da divergência dos feixes, a abertura do FOV, controle de ganho de sinal e de ruídos, *offsets* de tempo para os canais de

recepção (janelas temporais para detecção de superfície d'água ou fundo), voltagem do PMT¹⁴ (*Photomultiplier Tubes*), valores de calibração, espaçamento das amostras, padrão da varredura, altura e velocidade de voo, entre outros (GUENTHER *et al.*, 1996). Define-se ainda, a sequência de canais IR, Raman ou Verde para a detecção da superfície da água.

Um exemplo de linhas planejadas no MAPS para a área de Fernando de Noronha encontra-se projetada sobre a carta náutica local na Figura A.1.

Figura A.1 – Linhas de voo planejadas.

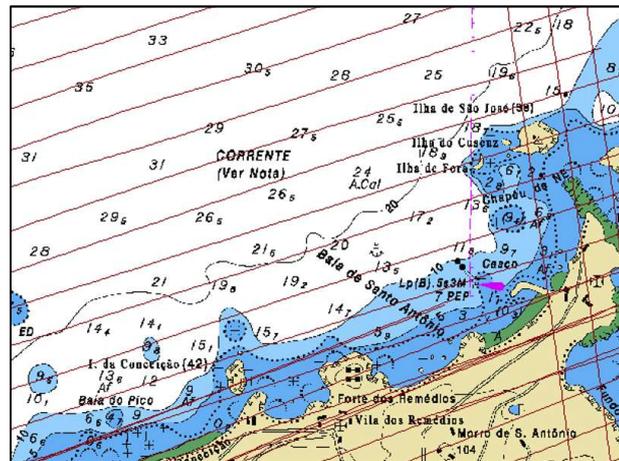


Fonte: CPRM (2014).

É possível notar na Figura A.2, linhas previstas em sentido aproximadamente paralelo às linhas isobatimétricas da carta, na enseada de Santo Antônio. Dessa forma, o padrão de varredura do LASER, a princípio, poderia traçar um perfil mais fiel às variações do terreno marinho nesta região.

¹⁴ PMT é um componente do sistema de varredura a LASER que permite a diferenciação de fótons provenientes de um sinal refletido, ainda que eles sejam espacialmente e temporalmente muito próximos (SHAN e TOTH, 2008).

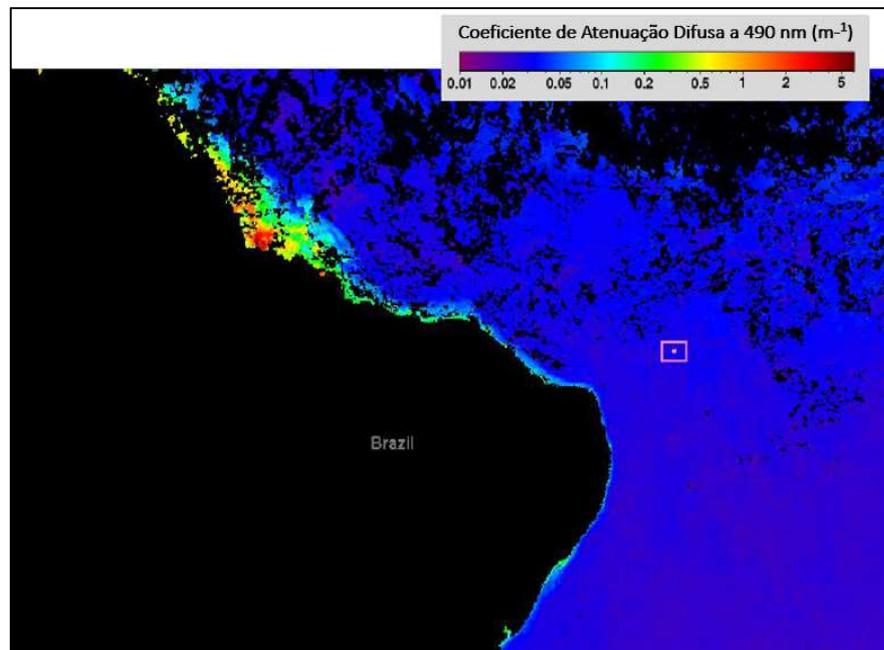
Figura A. 2 – Detalhe das linhas de voo planejadas (em vermelho) paralelamente às isobatimétricas na enseada de Santo Antônio



Fonte: CPRM (2014)

De maneira a estimar a máxima profundidade alcançável para um dado aerolevante, deve-se considerar as condições de visibilidade na água na área de interesse. Uma forma de fazê-lo é por meio de imagens de satélite. O programa OceanColor, mantido desde 1996 pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) oferece publicamente informações de coloração, temperatura e salinidade à superfície a partir de 2002 até os dias atuais. Estas informações são obtidas por meio do sistema MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) Aqua, o qual adquire dados em um espectro de 36 bandas, atualizados a cada dois dias (NASA, 2018), os quais auxiliam a estimativa do coeficiente de atenuação difusa para ondas no comprimento de 490 nm (K490), aplicável às operações ALB. A Figura A.3 exemplifica seu uso na região de Fernando de Noronha.

Figura A. 3 – Imagem mostrando o coeficiente de atenuação difusa, para $\lambda = 490$ nm (K490) na região de Fernando de Noronha.



Fonte: Adaptado de CPRM (2014) e NASA (2018)

A partir de conjuntos de dados mensais do MODIS Aqua, um perfil da profundidade máxima alcançável esperada por mês permite prever qual época do ano é mais favorável à penetração dos feixes.

A.2 Calibração do Sistema SHOALS

Previamente à mobilização para a região de interesse, são conduzidas rotinas de calibração geométrica do sistema. Para o sistema SHOALS, os procedimentos envolvem os seguintes passos, na seguinte ordem (CPRM, 2014):

- Medidas de *lever-arm* (deslocamento) entre os equipamentos do sistema SHOALS instalados na aeronave (refeitas por ocasião do levantamento);
- Calibração angular;
- Calibração da acurácia vertical;
- Calibração da acurácia horizontal; e
- Verificação da acurácia vertical subaquática.

O posicionamento da aeronave deve ser feito em tempo real por um sistema diferencial e depois pós-processado com uma solução cinemática relativa (KGPS). Essa solução é capaz de atingir uma acurácia horizontal de 0,02 m e vertical de 0,05 m (APPLANIX, 2017).

Para o sistema em tela, não é necessário medir os *lever-arms* entre a IMU e o ponto de referência localizado no lado externo da unidade LASER, pois a unidade inercial é localizada no mesmo componente. São medidos então os ângulos e distâncias do ponto de referência ao centro da antena POS/AV. Assim, definiu-se os *lever-arms* da IMU à antena.

A calibração angular é feita a partir de informações de faixas de voo executadas sobre uma superfície d'água em estado calmo, com regime de ventos fracos. Com este propósito, são adquiridos dados em duas faixas de pelo menos 5 minutos de duração e em sentidos opostos. Dados de rastreadores em terra são utilizados para gerar uma solução de calibração que torne a superfície da água plana em ambos os sentidos de deslocamento, gerando as informações de correções. As compensações angulares são apuradas com as faixas executadas em voos paralelos e perpendiculares a alguma edificação conhecida. A variação das situações de voo permite um pós-processamento KGPS sob diferentes condições de aquisição.

A acurácia horizontal é estimada por meio da análise de dados LiDAR adquiridos em relação a pontos de controle em terra. Adquiridos com um espaçamento de 3 x 3 m, os pontos da nuvem LiDAR mais próximos dos marcos-testemunho tem suas posições comparadas às obtidas no terreno.

Para as correções verticais, os valores da calibração angular são introduzidos para a aquisição de dados sobre uma área com elevações previamente conhecidas. Dados são coletados em três diferentes alturas de voo e em sentidos opostos. Como referência para as elevações obtidas pelo sistema LiDAR, utiliza-se um modelo digital de elevação com base em um levantamento KGPS previamente realizado na área de testes. As análises geram então as compensações verticais ao sistema.

Posteriormente, é conduzido o último passo da calibração, a estimação das correções de distância medidas abaixo da linha d'água. Para tal, são realizados voos a pelo menos três diferentes alturas sobre uma área já anteriormente sondada com um ecobatímetro multifeixe. A sondagem em questão deve atingir a Ordem Especial de acordo com os critérios da OHI. Uma vez tendo-se considerados todos as contribuições para a incerteza obtida no levantamento MBES dessa área, as discrepâncias que forem observadas são atribuídas ao sistema ALB (LOCKHART *et al.*, 2008).

A.3 Processamento dos Dados LiDAR

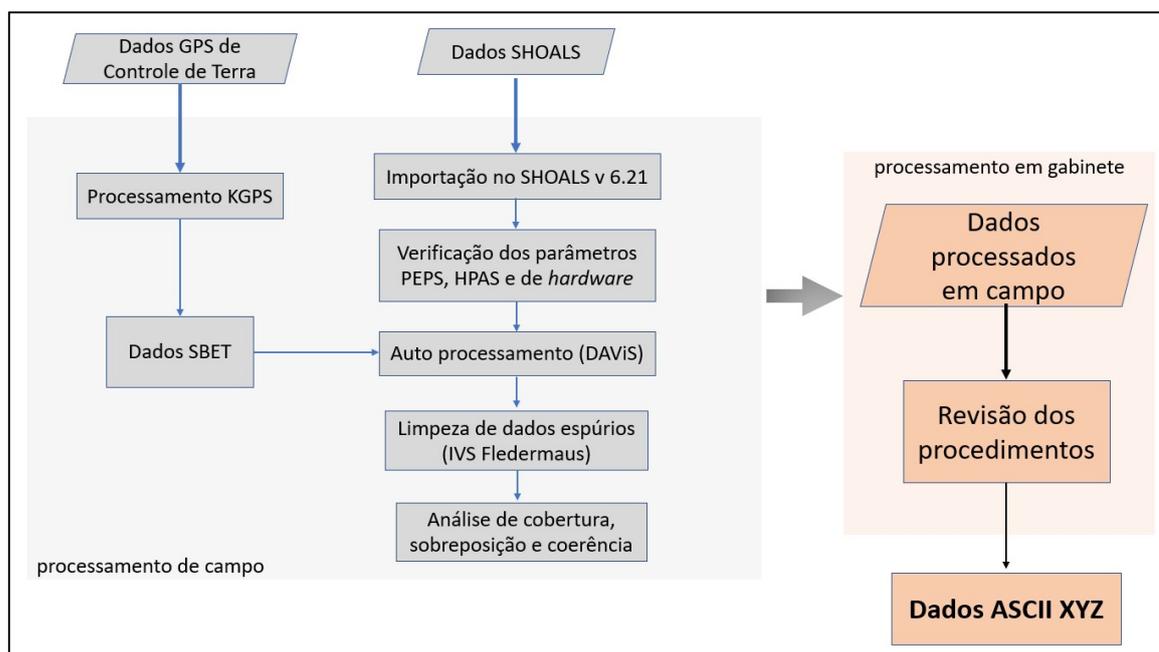
O processamento dos dados LiDAR segue duas principais etapas, com a primeira sendo executada pelo pessoal de campo e a posterior, um pós-processamento feito em gabinete.

No módulo GCS DAViS (*Ground Control System Download, Autoprocessing, and Visualization Software*) do sistema SHOALS, as informações da trajetória da plataforma de aquisição obtidas com o processamento KGPS devem ser introduzidas aos dados brutos do sistema, visando realizar o para em seguida ser cumprido o autoprocessamento (CPRM, 2014). Nesse passo, as formas de onda captadas pelos canais de recepção são analisadas levando-se em conta os parâmetros anteriormente checados (PEPS, HAPS e *hardware*). Para cada pulso é estimada a profundidade e seu fator de confiança, assim como outros indicadores estatísticos e de diagnóstico gerados pelo sistema, o que auxilia na conferência do processamento por parte de um operador. A elevação do fundo, inicialmente referenciada à superfície da água, passa a ser considerada em relação ao elipsoide (GUENTHER, 2000).

Mesmo após o autoprocessamento, é possível remover manualmente elevações espúrias que tenham sido consideradas válidas pelo *software*. Essas incorreções podem ocorrer principalmente em função da turbidez gerada por sedimentos em suspensão e por retornos falsos da superfície do mar. São então verificadas a presença de possíveis áreas sem dados, a efetiva sobreposição de faixas e uma análise preliminar da coerência dos dados de faixas de voo cruzadas.

O processamento feito em gabinete revisa as etapas cumpridas em campo, reimportando dados quando necessário e realizando a verificação e limpeza detalhada de elevações errôneas eventualmente validadas. A Figura A.4 ilustra o fluxo das etapas para o sistema SHOALS.

Figura A. 4 – Fluxo do processamento dos dados SHOALS.



Fonte: Adaptado de CPRM (2014).

Ao final, o sistema SHOALS gera como resultado dados agrupados contendo os campos mostrados na Tabela A.1.

Tabela A. 1 – Informações disponibilizadas pelo Sistema SHOALS-1000T em ASCII após o pós-processamento.

Campo	Significado
latitude	Latitude da profundidade em graus e décimos de grau
longitude	Longitude da profundidade em graus e décimos de grau
kgps_elevation	Elevação do ponto em relação ao elipsoide após a aplicação do processamento KGPS
ab_dep_conf	Valor da confiança na definição da profundidade (útil para modo de operação com emprego tradicional dos dados de maré). Varia de 0 a 99
bot_conf	Intensidade da resposta de fundo detectada como primeiro retorno
depth_conf	Valor de confiança da profundidade calculado pelo GCS. Considera informações de altura de ondas, canal de recepção do sinal de superfície, estado do emissor LASER, entre outros. Possui 6 dígitos e é usado para constatações em pesquisas de possíveis avarias do sistema.
kgps_abd_conf	valor da confiança na definição da profundidade (útil para modo de operação com solução KGPS). Varia de 0 a 99

kgps_sec_abd_conf	valor da confiança da profundidade identificada como segunda candidata. Nem sempre é obtido.
kgps_sec_elev	Valor de profundidade para o segundo melhor candidato.
kgps_water_level	Elevação elipsoidal da superfície da água no momento da sua detecção por parte do sistema.
position_conf	Valor de confiança da posição gerado pelo GCS.
status	Identifica se a informação de profundidade foi: 1 – descartada manualmente 2 – mantida 3 – trocada pela informação secundária
sec_depth_conf	Valor de confiança para a profundidade secundária no modo de uso tradicional da maré.
sec_depth	Valor da profundidade secundária no modo de uso tradicional da maré.
sec_bot_conf	Intensidade da resposta de fundo detectada como primeiro retorno para o segundo candidato a valor de profundidade.
sec_ab_dep_conf	Valor da confiança na definição da profundidade secundária (para modo de uso tradicional dos dados de maré). Varia de 0 a 99
timestamp	Instante da aquisição de informação definido pelo posicionador POS/AV.
tide_cor_depth	Informação de profundidade após a aplicação da correção de maré.
sfc_channel_used	Canal usado para detectar o retorno da superfície, sendo: 1 – Verde 2 – IR 3 – Raman

Fonte: CPRM (2014).

A.4 Planejamento do Levantamento Batimétrico por MBES

O padrão de varredura do MBES é transversal à direção de deslocamento da embarcação. Essa característica, assim como a do sistema SHOALS, leva à necessidade de se executar linhas de sondagem paralelas às isobatimétricas, como ilustra a Figura A.5.

De acordo com DHN (2017), o posicionamento deve ser obtido por GNSS de alta precisão, podendo ser em modo RTK, PPK, PPP (*Precise Point Positioning*) ou DGNSS (*Differential Global Navigation Satellite Systems*).

Para as compensações de arfagem (*heave*), balanço (*roll*) e caturro (*pitch*) da embarcação, é fortemente recomendado o uso de sensores inerciais associados à técnica de posicionamento por satélite aplicada que devem ser obtidos por um sistema diferencial ou por meio do posicionamento cinemático, como o KGPS ou PPK (DHN, 2017). Essas informações são consideradas no momento da aquisição da profundidade, não sendo processadas posteriormente.

A.6 Processamento das Informações MBES

O fluxo de processamento descrito a seguir se pauta nos procedimentos recomendados pela DHN, com uso do *software* Caris HIPS and SIPS. O tratamento dos dados deve levar em consideração as contribuições às incertezas totais por parte de cada um dos sensores empregados, bem como das medições físicas da plataforma de aquisição. Por último, as informações de sondagem devem ser então compiladas em uma superfície de interpolação, cujo critério de formação determinará as profundidades a serem consideradas como válidas.

a) Introdução das configurações do sistema e integração dos dados batimétricos e maregráficos (*merge*)

Inicialmente, são inseridas as informações dos equipamentos instalados na embarcação de sondagem. São consideradas as características físicas da plataforma de coleta, com as medições de distâncias (*lever-arms*) entre os sensores. São introduzidas nessa etapa, as incertezas dos equipamentos empregados com base no sítio da internet disponibilizado pela Teledyne Caris, fabricante do *software*. Consta nesse sítio uma relação de sensores cujos erros foram modelados ao longo de levantamentos hidrográficos conduzidos pela University of New Hampshire (CARIS, 2017).

Conforme Caris (2014), na integração dos dados colhidos, são combinadas as observações de maré, profundidades coletadas, informações de incertezas dos sensores empregados e das medições da embarcação.

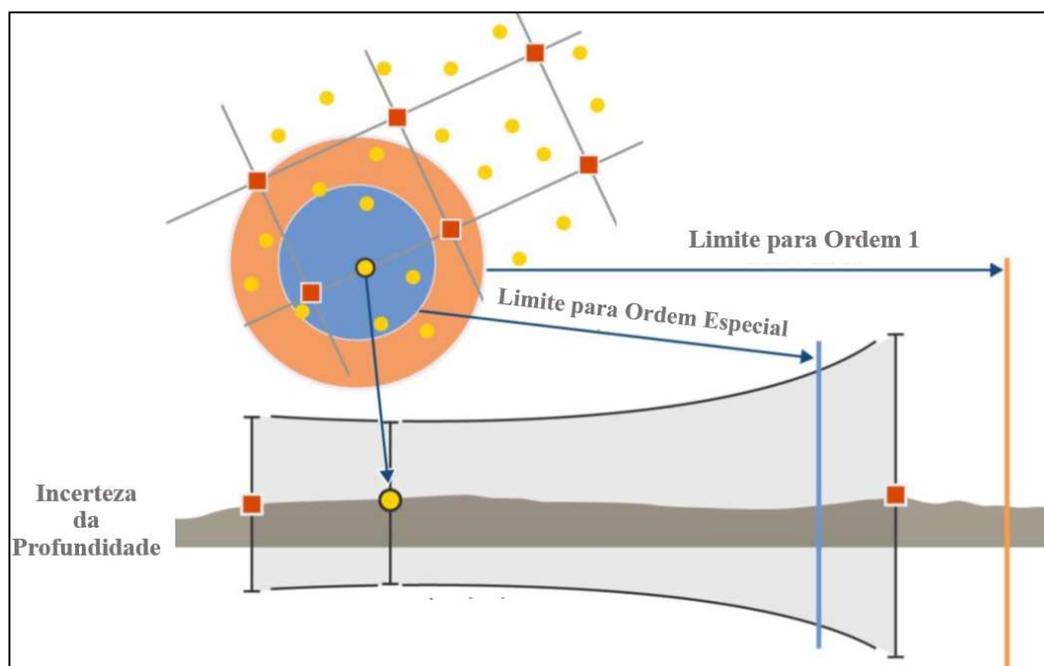
Os dados ainda brutos de profundidades são introduzidos conforme as medições da altura da coluna fundo-linha d'água informada no momento da aquisição, já com as correções da velocidade do som. Em seguida, são aplicadas as variações de maré. Como resultado, são informadas as profundidades em relação ao *datum* da carta náutica.

b) Superfície de Interpolação

São quatro as opções para a criação de superfícies batimétricas, cada uma com suas considerações para a definição da hipótese escolhida como representativa da célula (ou nó) formada, conforme detalhado abaixo (CARIS, 2014):

- *Swath Angle*: superfície que leva em consideração três fatores;
 - Raio de influência de cada informação de profundidade, o qual aumenta com a profundidade e com o ângulo de incidência de cada feixe ao solo.
 - Distância ao nó, parâmetro que diminui a influência da medição conforme aumenta a sua distância ao centro da célula; e
 - Peso do ângulo de incidência, em razão do aumento de erros presentes nos feixes externos. Deste modo, quanto maior for o afastamento em relação ao nadir, menor será o seu peso na hipótese.
- *Shoalest Depth True Position*: considera como valor da célula aquele da menor profundidade medida dentre as que contribuem para a hipótese. A posição do nó formado será a mesma da profundidade escolhida.
- *Uncertainty Surface*: considera inicialmente uma propagação da incerteza das medições de profundidade baseada na distância da medição ao nó e na Incerteza Horizontal Total (IHT) a ela associada. Em seguida, tanto IHT quanto a Incerteza Vertical Total (IVT) contribuem para determinar o peso de cada profundidade à hipótese. A área de influência para o cálculo do valor da célula variará de acordo com a ordem da OHI escolhida. Quanto mais exigente o critério, menor será esse raio.
- *Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator (CUBE)*: De forma semelhante à *Uncertainty Surface*, o CUBE o peso da contribuição das sondagens ao nó variará em função da distância à célula e do cálculo de sua Incerteza Propagada Total (IPT). Dessa forma, também no CUBE, as medições que não estiverem dentro do raio de influência correspondente à ordem escolhida, não contribuirão para a hipótese do nó. A Figura A.6 ilustra raios para as ordens Especial e 1a, com a incerteza da sondagem crescendo com a distância à célula.

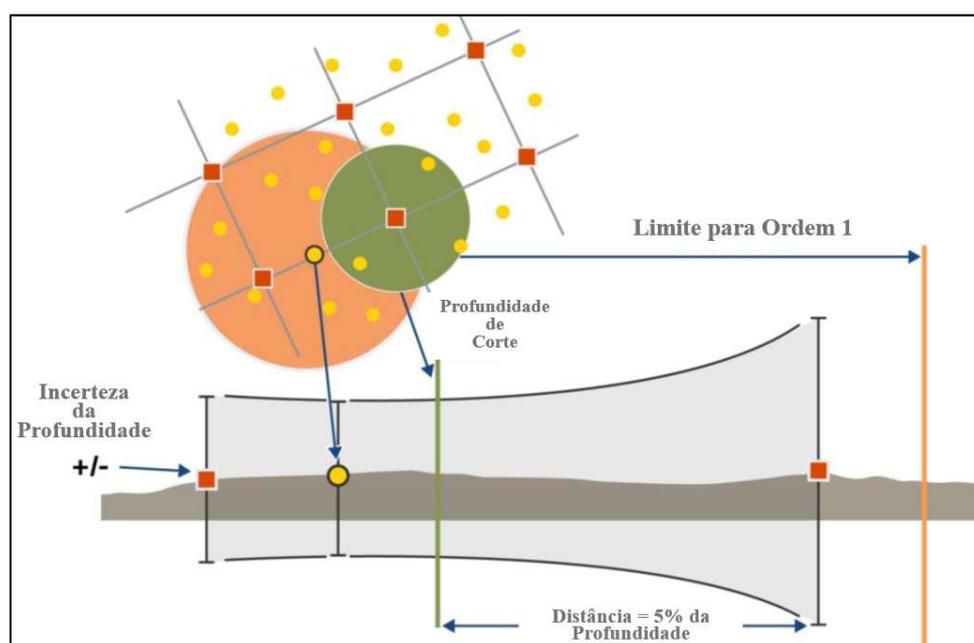
Figura A. 6 – Crescimento da incerteza com aumento do raio de influência.



Fonte: Caris (2014).

No CUBE, outro fator de corte para as sondagens utilizadas para um dado nó é a distância em si da medição. Caso essa distância exceda 5% da profundidade medida, valor padrão que pode ser alterado pelo operador, ainda que a amostra esteja dentro do raio da ordem escolhida, ela será descartada. A Figura A.7 ilustra um exemplo.

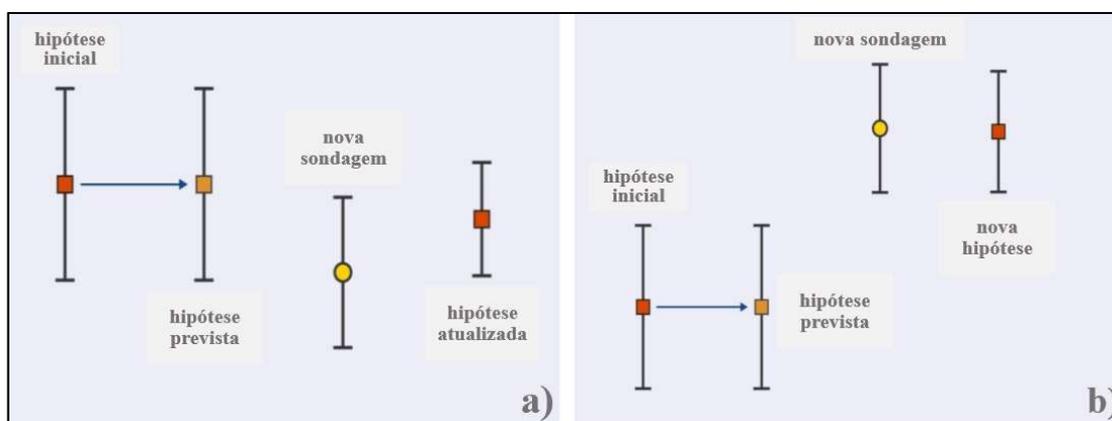
Figura A. 7 – Critério de corte baseada na distância à sondagem.



Fonte: Caris (2014).

A análise das medições para cada célula é feita de maneira aleatória. Em uma situação onde já haja uma hipótese para o nó, novas sondagens podem ser consideradas para o valor da célula. Caso essa nova medição esteja dentro de 4 vezes o desvio-padrão da hipótese, ela é considerada, podendo alterar o valor do nó ou mesmo mantê-lo (Figura A.8a). Se o limite for excedido, é gerada uma nova hipótese, e o nó passa a ter mais de um valor possível (Figura A.8b). Esse procedimento é feito sobre cada uma das sondagens que se enquadrarem nos critérios de eliminação de distância citados.

Figura A. 8 – Análises das sondagens com manutenção da hipótese inicial (a) ou geração de uma nova hipótese (b).



Fonte: Adaptado de Caris (2014).

A eliminação de ambiguidades pode seguir um de três critérios, sendo eles:

- Densidade: a hipótese que contiver o maior número de sondagens é a escolhida;
- Localidade: seleciona-se a hipótese cujo valor é o mais próximo da profundidade que representa o nó vizinho; e
- Densidade e Localidade: utiliza os dois critérios anteriores. Inicialmente considera a densidade das hipóteses. Caso a escolhida possua um fator de força, este, um parâmetro definido pelo algoritmo do *software* baseado na incerteza da sondagem, acima de um limiar definido, ela será a eleita. Caso contrário, o critério a ser usado passa a ser o da localidade.

É possível notar que a superfície obtida pelo método CUBE já realiza uma análise de medições espúrias, desconsiderando-as. De toda forma, após a criação da superfície de interpolação, uma análise visual das sondagens é feita de forma a verificar a coerência no “casamento” entre linhas sobrepostas e a presença de erros grosseiros.

Cumpridos os quatro principais passos descritos acima (características da embarcação e seus sensores, integração dos dados, cálculo da IPT e interpolação), é conduzida a verificação da coerência e eliminação dos dados espúrios.

APÊNDICE B – Programa para determinação do gradiente do terreno para as coordenadas dos pontos ALB com base em dados MBES de referência.

O script em questão foi criado para a determinação do gradiente do terreno para as coordenadas dos pontos ALB com base em dados MBES de referência. São utilizados como dados de entrada:

- Uma nuvem de pontos MBES em formato XYZ, extraída do software Caris Base Editor;
- Uma relação dos vértices criada a partir de interpolação dos dados MBES em uma TIN no plano XY, realizada com uso do software Cloud Compare; e
- Pontos de uma nuvem LiDAR com informações XYZ e de discrepância vertical em relação aos dados MBES.

Em seu desenvolvimento, define-se inicialmente o triângulo da TIN em cujo interior se encontra cada amostra LiDAR. Em seguida, é calculado o gradiente de cada célula da TIN a partir do vetor normal ao plano do triângulo. Por último, é calculado o coeficiente de correlação de Pearson entre a discrepância vertical da amostra LiDAR e o gradiente do triângulo no qual tal amostra se encontra.

```
% Autor(es): Mauricio Galo / Guilherme Nascimento
% UNESP - Departamento de Cartografia
% NOV/2018
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc
clear all
format long e

%Leitura do arquivo com coordenadas dos pontos da nuvem MBES que
%compõem os triângulos
arquivo(1) = fopen('Endereço do arquivo com a nuvem MBES','r');
formatSpec = '%f %f %f';
%Define os formatos dos dados presentes no arquivo

todos_dados = [3 Inf]; %Define as dimensoes da matriz
[secaoT,nobs] = fscanf(arquivo(1), formatSpec, todos_dados);

fclose(arquivo(1));

pontos_MBES = secaoT';
[num_ptos_MBES,lixo] = size(pontos_MBES);
```

```

%Montagem dos pontos MBES em matriz no formato:
%Índice do ponto // X_ponto_MBES // Y_ponto_MBES // Z_ponto_MBES
for i=1:num_ptos_MBES
    format long
    pontos_MBES_REF(i,4) = pontos_MBES(i,3);
    pontos_MBES_REF(i,4) =round(pontos_MBES_REF(i,4),6);
    pontos_MBES_REF(i,3) = pontos_MBES(i,2);
    pontos_MBES_REF(i,3) =round(pontos_MBES_REF(i,3),6);
    pontos_MBES_REF(i,2) = pontos_MBES(i,1);
    pontos_MBES_REF(i,2) = round(pontos_MBES_REF(i,2),6);
    pontos_MBES_REF(i,1) = i;
end

%Leitura e ler arquivo com o índice dos pontos que formam cada
%triângulo. Essa relação é extraída do software Cloud Compare
arquivo(1) = fopen('Endereço do arquivo com os índices dos pontos
que formam cada célula da TIN','r');
formatSpec = '%i %i %i'; %Define os formatos dos dados presentes
no arquivo

todos_dados = [3 Inf]; %Define as dimensoes da matriz
[secaoT,nobs] = fscanf(arquivo(1), formatSpec, todos_dados);
fclose(arquivo(1));

relacao_faces=secaoT';
[num_planos,lixo] = size(relacao_faces);

%Montagem de matriz com o índice do triangulo(plano) // índice do
%vértice 1 // índice do vértice 2 // índice do vértice 3
for i=1:num_planos
    planos(i,4)= relacao_faces(i,3)+1; % Valor 1 adicionado para
igualar a contagem de vértices com a numeração dos pontos feita
pelo Cloud Compare.
    planos(i,3)= relacao_faces(i,2)+1;
    planos(i,2)= relacao_faces(i,1)+1;
    planos(i,1)= i;
end

%Neste ponto, a relação de triângulos tem seus vértices com os
%mesmos índices da matriz pontos_MBES_REF

%Leitura do arquivo com a lista dos pontos LiDAR que serão
%candidatos a pertencer ou não aos triangulos (planos). Tais
%pontos tem formato: Índice // X // Y // Z // Discrepância de Z

arquivo(1) = fopen('Endereço do arquivo com a nuvem de pontos
LiDAR','r'); %arquivo com a relação dos pontos candidatos a
pertencer aos triangulos(planos)

% K definirá quantas linhas ignorar para ler o arquivo dos dados
for k=1
    tline = fgets(arquivo(1));
end

```

```

formatSpec = '%f %f %f %f'; %Define os formatos dos dados
presentes no arquivo

todos_dados = [4 Inf]; %Define as dimensoes da matriz
[secaoT,nobs] = fscanf(arquivo(1), formatSpec, todos_dados);
fclose(arquivo(1));

candidatos=secaoT';
[num_candidatos,lixo] = size(candidatos);

%Conforme feito com os pontos MBES, inclui-se uma coluna para
%Z = 0. Com isso, coloca-se as duas nuvens no plano XY para
%projetar os pontos LiDAR sobre os triângulos formados pela TIN.

%Organização no formato:Índice // X // Y // Z //Discrepância de Z
for i=1:num_candidatos
    candidatos(i,5) = candidatos(i,4);
    candidatos(i,4) = (-1)*candidatos(i,3); %Acerto de sinal.Dado
exportado como negativo a partir do software Caris Base Editor
    candidatos(i,3) = candidatos(i,2);
    candidatos(i,2) = candidatos(i,1);
    candidatos(i,1) = i;
end

k = 0;
lixo1 = 0;
%Formação dos triângulos(planos) a partir da relação que contem
os índices dos vértices
for i=1:num_planos
    format long
    %Índices dos vértices que compõem o plano
    ptos = [planos(i,2) planos(i,3) planos(i,4)];

    %coordenadas dos pontos do triângulo (só serão usados os do
plano XY)
    P1 = [pontos_MBES_REF(ptos(1),2) pontos_MBES_REF(ptos(1),3)
pontos_MBES_REF(ptos(1),4)];
    P2 = [pontos_MBES_REF(ptos(2),2) pontos_MBES_REF(ptos(2),3)
pontos_MBES_REF(ptos(2),4)];
    P3 = [pontos_MBES_REF(ptos(3),2) pontos_MBES_REF(ptos(3),3)
pontos_MBES_REF(ptos(3),4)];

    %Comprimento dos lados do triângulo
    mod_P1P2 = ((P2(1)-P1(1))^2 + (P2(2)-P1(2))^2)^0.5;
    mod_P1P3 = ((P3(1)-P1(1))^2 + (P3(2)-P1(2))^2)^0.5;
    mod_P2P3 = ((P3(1)-P2(1))^2 + (P3(2)-P2(2))^2)^0.5;

    p = (mod_P1P2 + mod_P1P3 + mod_P2P3)/2; %semiperímetro do
triangulo

    %Cálculo da área do triângulo pelo Teorema de Heron
    area_tri = (p*(p-mod_P1P2)*(p-mod_P1P3)*(p-mod_P2P3))^0.5;
    area_tri = round(area_tri,6);

```

```

areas(i,:)=[i,area_tri,P1(1),P1(2),P1(3),P2(1),P2(2),P2(3),P3(1),
P3(2),P3(3),mod_P1P2,mod_P1P3,mod_P2P3,p];

end

[num_areas,lixo] = size(areas);
%Com base no Teorema de Heron, para que o teste de pertencimento
%seja feito, é necessário criar os triângulos a partir dos índices
%de vértices, assim como os triângulos formados a partir da ligação
%do ponto LiDAR aos vértices de cada triângulo da TIN.

for j=1:num_candidatos %rolagem do conjunto de pontos candidatos
a serem testados
    for i=1:num_areas %%rolagem do conjunto de áreas formadas pelos
triângulos MBES e dos seus vértices com os candidatos LiDAR

        %módulos dos lados dos triangulos formados com o candidato
        mod_cp1 = ((areas(i,3)-candidatos(j,2))^2 + (areas(i,4)-
candidatos(j,3))^2 + 0)^0.5;
        mod_cp2 = ((areas(i,6)-candidatos(j,2))^2 + (areas(i,7)-
candidatos(j,3))^2 + 0)^0.5;
        mod_cp3 = ((areas(i,9)-candidatos(j,2))^2 + (areas(i,10)-
candidatos(j,3))^2 + 0)^0.5;
        mod_P1P2 = areas(i,12);
        mod_P1P3 = areas(i,13);
        mod_P2P3 = areas(i,14);
        %semiperímetro do triangulos formados com os candidatos
        pp12 = (mod_cp1 + mod_cp2 + mod_P1P2)/2;
        pp13 = (mod_cp1 + mod_cp3 + mod_P1P3)/2;
        pp23 = (mod_cp2 + mod_cp3 + mod_P2P3)/2;
        %áreas com os triangulos formados com o candidato e seu somatório
        area_12 = (pp12*(pp12-mod_P1P2)*(pp12-mod_cp1)*(pp12-
mod_cp2))^0.5;
        area_13 = (pp13*(pp13-mod_P1P3)*(pp13-mod_cp1)*(pp13-
mod_cp3))^0.5;
        area_23 = (pp23*(pp23-mod_P2P3)*(pp23-mod_cp2)*(pp23-
mod_cp3))^0.5;
        area_candidato_total = (area_12 + area_13 + area_23);
        area_candidato_total = round(area_candidato_total,6);

        %Condição para o candidato pertencer ou não ao triângulo
        if area_candidato_total > areas(i,2)
            lixo1 = lixo1 + 1;
        else
            k = k + 1; %Condição atendida
            %Formato do conjunto: ID_candidato /X_LiDAR /Y_LiDAR/ Z_LiDAR/
Discrepância de Z /ID_triângulo/XYZ dos pontos do triângulo MBES
            conjuntos(k,:) = [candidatos(j,1) candidatos(j,2)
candidatos(j,3) candidatos(j,4) candidatos(j,5) i areas(i,3)
areas(i,4) areas(i,5) areas(i,6) areas(i,7) areas(i,8)
areas(i,9) areas(i,10) areas(i,11)];
        end
    end
end
end

```

```

[num_conjuntos,lixo] = size(conjuntos);

%Criação do arquivo de Saída com a relação dos conjuntos formados
por ponto LiDAR, índice do triângulo ao qual pertence, vértices
do triângulo
fid = fopen ('Endereço do arquivo de Saída dos Conjuntos
Formados','w');
fprintf (fid, 'ID_candidato // X_LiDAR // Y_LiDAR // Z_LiDAR //
Discrepância de Z_LiDAR //ID_triângulo// X1 // Y1 // Z1 // // X2
// Y2 // Z2 // // X3 // Y3 // Z3\n');

for m=1:num_conjuntos

    fprintf (fid, '%f %f %f',
conjuntos(m,:));
    fprintf (fid, '\n');

end
fclose(fid);

% As operações abaixo calculam os coeficientes do vetor normal aos
planos formados pelos triângulos e o coeficiente angular desses
planos

k = 0;
for i=1:num_conjuntos
    P1 = [conjuntos(i,7),conjuntos(i,8),conjuntos(i,9)];
    P2 = [conjuntos(i,10),conjuntos(i,11),conjuntos(i,12)];
    P3 = [conjuntos(i,13),conjuntos(i,14),conjuntos(i,15)];

    %A função F_coeficientes_grad_plano abaixo calcula os coeficientes
do vetor normal ao plano %e o gradiente do plano.
    %Seu desenvolvimento se encontra ao final desse script.

    [cA,cB,cC,cD,Grad]=F_coeficientes_grad_plano(P1,P2,P3);

    k = k + 1;

    ALB_Dif_Grad(k,:) = [ conjuntos(i,2),conjuntos(i,3),
conjuntos(i,4),abs(conjuntos(i,5)),abs(Grad)];
    %Formato da matriz criada acima: X_LiDAR // Y_LiDAR // Z_LiDAR //
Discrepância_Z // Gradiente no Ponto

end

%Cálculo do Coeficiente de Correlação de Pearson entre as
discrepâncias de Z e os gradientes nos pontos ALB

[r,p] = corr(ALB_Dif_Grad(:,4),ALB_Dif_Grad(:,5))

```

```

%Criação do arquivo de saída com os pontos LiDAR e o gradiente do
triângulo ao qual pertencem.
fid = fopen ('Endereço do arquivo de saída com pontos LiDAR e
respectivos gradientes', 'w');
fprintf (fid, 'X_LiDAR      Y_LiDAR      Z_LiDAR      Diff_Z
Gradiente\n');
fprintf(fid, '\n');

fprintf (fid, 'Coeficiente      P-valor\n');
fprintf (fid, '%f %f', r,p);
fprintf (fid, '\n');

for i=1:num_conjuntos
    fprintf (fid, '%f %f %f %f %f', ALB_Dif_Grad(i,:));
    fprintf (fid, '\n');
end
fclose(fid);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Função de Cálculo do Coeficiente Angular do Triângulo

function [cA,cB,cC,cD,grad]=F_coeficientes_grad_plano(P1,P2,P3)

% F_COEFICIENTES_GRAD_PLANO
%Objetivo:
%Determinar os coeficientes de um plano de equação: aX+bY+cZ+d=0
%
% Entrada: P1 = [ X1 Y1 Z1 ]
%           P2 = [ X2 Y2 Z2 ]
%           P3 = [ X3 Y3 Z3 ]
%
% Saida:    cA = a, cB = b, cC = c, cD = d
%           Grad - Gradiente
%
% Autor(es): Mauricio Galo / Guilherme Nascimento
% UNESP - Departamento de Cartografia
% ABR/2018

% Valores auxiliares
X1X2 = P2(1)-P1(1);
Y1Y2 = P2(2)-P1(2);
Z1Z2 = P2(3)-P1(3);

X1X3 = P3(1)-P1(1);
Y1Y3 = P3(2)-P1(2);
Z1Z3 = P3(3)-P1(3);

a1 = ( Y1Y2 )*( Z1Z3 );
b1 = ( Z1Z2 )*( X1X3 );
c1 = ( X1X2 )*( Y1Y3 );
a2 = ( Z1Z2 )*( Y1Y3 );
b2 = ( X1X2 )*( Z1Z3 );
c2 = ( Y1Y2 )*( X1X3 );

```

```
% Cálculo dos coeficientes
cA = a1 - a2;
cB = b1 - b2;
cC = c1 - c2;
cD = a2*P1(1) + b2*P1(2) + c2*P1(3) - ( a1*P1(1) + b1*P1(2) +
c1*P1(3) );

%Calculo do modulo do vetor normal e atualização da componente D
modN = sqrt(cA^2 + cB^2 + cC^2);
cA = cA/modN;
cB = cB/modN;
cC = cC/modN;
cD = - (cA*P1(1) + cB*P1(2) + cC*P1(3));

modXY = sqrt(cA^2 + cB^2);

if modXY == 0
    grad = 0;
else
    grad = tan(pi/2 - atan(cC/modXY));
end

clear a1 b1 c1 a2 b2 c2 modN
```