

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA/LAGEMAR
CURSO DE DOUTORADO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

VITOR BRAVO PIMENTEL

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE DADOS
ADQUIRIDOS COM O SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO NA
PRODUÇÃO DE DOCUMENTOS NÁUTICOS

NITERÓI, RJ

2023

VITOR BRAVO PIMENTEL

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE DADOS
ADQUIRIDOS COM O SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO
NA PRODUÇÃO DE DOCUMENTOS NÁUTICOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, com ênfase em Hidrografia.

Campo de Confluência: Hidrografia e Geofísica.

Orientador:

Prof. Dr. Arthur Ayres Neto

Niterói, RJ

2023

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

P644d Pimentel, Vitor Bravo
Desenvolvimento de Metodologia para Aplicação de Dados
Adquiridos com o Sonar de Varredura Lateral Interferométrico
na Produção de Documentos Náuticos / Vitor Bravo Pimentel. -
2023.
130 p.: il.

Orientador: Arthur Ayres Neto.
Tese (doutorado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto
de Geociências, Niterói, 2023.

1. Hidrografia. 2. Levantamento Hidrográfico. 3. Sonar de
Varredura Lateral Interferométrico. 4. Carta Náutica. 5.
Produção intelectual. I. Neto, Arthur Ayres, orientador. II.
Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências.
III. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

VITOR BRAVO PIMENTEL

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA APLICAÇÃO DE DADOS ADQUIRIDOS COM O SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO NA PRODUÇÃO DE DOCUMENTOS NÁUTICOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, com ênfase em Hidrografia.

Campo de Confluência: Hidrografia e Geofísica.

Aprovada em 07 de março de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Arthur Ayres Neto, Dr. (Orientador)
Universidade Federal Fluminense (UFF)

Prof. Luciano Fonseca, Dr.
Universidade de Brasília (UnB)

Prof. Luiz Antonio Pereira de Souza, Dr.
Laps Consulting Ltda

Prof^a. Flávia Mandarino, Dr^a.
Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN)

Capitão de Fragata Ricardo Freire, Dr.
Centro de Hidrografia da Marinha (CHM)

Prof. Gilberto Dias, Dr.
Universidade Federal Fluminense (UFF)

À Beatriz Fontes de Andrade Pimentel e
Estêvão Bravo de Andrade Pimentel

AGRADECIMENTOS

À Marinha do Brasil, à Diretoria de Hidrografia e Navegação e ao Centro de Hidrografia da Marinha, por sempre me estimularem a ir mais além.

À Universidade Federal Fluminense, por me receber e me orientar em meus estudos.

Aos professores do LAGEMAR, em especial ao professor Arthur Ayres Neto, pela orientação sempre segura e pelo tempo gasto com meu aprendizado.

Aos seguintes oficiais da Marinha do Brasil: aos Capitães de Mar e Guerra Cândido Marques, Marcos Alves e Costa Júnior por terem me permitido seguir o rumo que conduziu a elaboração desse trabalho. Aos Capitães de Fragata Eduardo Rezende, Freire e Peçanha, pelo apoio incondicional. Aos Capitães de Corveta Rafael Vieira, Nascimento, Leonardo Gomes e Ivan por terem escutado as intermináveis divagações acerca do tema de estudo, sempre com sugestões proíficas. Aos Capitães-Tenentes Vitor Carvalho, Pimentel, José Celso e Primeiros Tenentes Brito e Bittencourt, por me proporcionarem a tranquilidade necessária ao avanço científico. A Terceiro-Sargento Laís, pelas conversas sempre construtivas. A todos os oficiais e praças da Divisão de Cartografia em geral, pois foi nas conversas de corredores que muitas ideias nasceram. Agradeço, ainda, ao Capitão de Corveta Christopher, por ter dividido comigo as incertezas que o caminho da investigação científica pressupõe, sendo o companheiro constante dessa árdua vereda.

Por fim, agradeço à minha esposa Beatriz e ao meu filho Estêvão, por suportarem a ausência que a dedicação ao estudo requer e mesmo assim me apoiarem incondicionalmente, sendo eles os maiores dinamizadores do meu esforço diuturno e a maior razão do meu caminhar. Aos meus pais Júlio e Jupira e ao meu irmão Otávio, por sempre compartilharem as tristezas e alegrias do Curso de Doutorado.

Em última instância, a Deus e seus prepostos, cuja inspiração e epifania foram fundamentais para que esta obra nascesse.

A melhor solução é aquela que apresenta a menor quantidade de premissas possíveis.

Navalha de Ockham, princípio filosófico

RESUMO

O sonar de varredura lateral interferométrico é um sensor batimétrico com capacidade equiparada ao ecobatímetro multifeixe. Em um país eminentemente marítimo com grande potencial comercial e estratégico do uso de mares e rios, o sonar interferométrico se sobressai como uma ferramenta com potencial para mapeamento do fundo marinho, principalmente em águas rasas. Há de se considerar ainda os desafios tecnológicos evidenciados pelo novo formato e especificações para intercâmbio de dados hidrográficos S-100 (*IHO Universal Hydrographic Data Model*) e seus produtos aderentes, que passam a exigir novos requisitos dos dados hidrográficos nos quais uma série de adversidades surgem. Contudo apresenta uma grande desvantagem: dispersão vertical acentuada com performance aquém do preconizado em normas nacionais e internacionais. Nesse contexto, este trabalho se predispõe a desenvolver uma metodologia que possibilite a aplicação de informações de profundidade adquiridas por este equipamento na produção de documentos náuticos utilizando os dados do ecobatímetro multifeixe, tecnologia já consagrada, como modelo comparativo. Para tal, utilizou-se um levantamento hidrográfico realizado concomitantemente com ambos os sensores, de forma a poder fazer uma avaliação relativa e, a partir de tal confrontação buscar uma solução para a aplicação do sensor interferométrico na cartografia náutica. Como base ao avanço pretendido, utilizou-se o algoritmo CUBE, ferramentas estatísticas de análise e estimativa de superfícies batimétricas que sirvam de subsídios para a batimetria constante na carta náutica. A metodologia desenvolvida foi aplicada em cinco áreas com características distintas, avaliando seu resultado frente ao ecobatímetro multifeixe e às boas práticas da cartografia náutica. Por fim, atestou-se a utilização do sonar de varredura lateral interferométrico, onde seus óbices foram minorados a ponto de permitir a produção de documentos náuticos confiáveis, principalmente a carta náutica.

Palavras-chave: Hidrografia. Levantamento Hidrográfico. Sonar de Varredura Lateral Interferométrico. Carta Náutica.

ABSTRACT

Phase-measuring bathymetric sidescan is a bathymetric sensor with capability like a multibeam echosounder. In an eminently maritime country with great commercial and strategic potential for the use of seas and rivers, interferometric sonar stands out as a tool with potential for mapping the seabed, especially in shallow waters. It is also necessary to consider the technological challenges evidenced by the new hydrographic data exchange format and specifications S-100 (IHO Universal Hydrographic Data Model) and its adherent products, which now demand new requirements for hydrographic data in which a series of adversities arise. However, it has a major disadvantage: accentuated vertical dispersion with performance below what is recommended in national and international standards. In this context, this work intends to develop a methodology that allows the application of depth information acquired by this equipment in the production of nautical documents, using data from the already established technology multibeam echosounder as a comparative model. A hydrographic survey was carried out concurrently with both sensors, in order to assure a relative assessment and, from this confrontation, seek a solution for the application of the interferometric sensor in nautical cartography. As a basis for the intended advance, it was used the CUBE algorithm, statistical tools for analysis and bathymetric surfaces estimation that serve as subsidies for the nautical chart bathymetry. The developed methodology was applied in five areas with different characteristics, evaluating its result against the multibeam echosounder and the good practices of nautical cartography. Finally, the use of phase-measuring bathymetric sidescan was attested and its obstacles were reduced to the point of allowing the production of reliable nautical documents, mainly the nautical chart.

Keywords: Hydrography. Hydrographic Survey. Phase-measuring bathymetric sidescan. Nautical Chart.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Áreas em que foram realizados os testes na Baía de Guanabara	5
Figura 2 – Dispersão dos dados	7
Figura 3 – Terminais portuários distribuídos pelo Brasil	12
Figura 4 – Carta Náutica 1511, nos formatos papel, raster e vetorial	16
Figura 5 – Família de produtos compatíveis S-100	17
Figura 6 – Composição de ENC e camada S-102	18
Figura 7 – Extrato da CN 1511	21
Figura 8 – Seleção de sondagens	22
Figura 9 – Fluxo de dados de parte da produção cartográfica	23
Figura 10 – Comparação entre as sondagens mais rasas oriundas do PDBS e do MBES	23
Figura 11 – Exemplo da costa do Brasil	24
Figura 12 – Feições rochosas representada de formas diferentes, dependendo da escala	25
Figura 13 – Diagrama de Levantamentos da Carta Náutica 1512 – Porto do Rio de Janeiro	28
Figura 14 – Carta 22000, com sondagens de um levantamento multifeixe sobrepostas	29
Figura 15 – Mapa LEPLAC	30
Figura 16 – Fluxo dos dados batimétricos	33
Figura 17 – Aplicação do filtro de amplitude	34
Figura 18 – Aplicação do filtro de limite	35
Figura 19 – Aplicação do across track filter	35
Figura 20 – Aplicação do filtro estatístico	36
Figura 21 – Trecho visualizado com a ferramenta Subset Editor do CARIS HIPS&SIPS	37
Figura 22 – Diferença entre as camadas Depths das superfícies CUBE	39
Figura 23 – Desenho esquemático do nó de uma superfície CUBE	43
Figura 24 – Hipótese em verde, considerando a distribuição dos pings como Normal.	45
Figura 25 - Histograma	47
Figura 26 – Gráfico QQ Plot	47
Figura 27 – Diagrama de blocos com a metodologia proposta	48
Figura 28 – Superfícies com a visualização da quantidade de hipóteses	51
Figura 29 - Superfícies com a visualização da profundidade	52

Figura 30 – Superfícies com o desvio padrão (1,96x) da profundidade da hipótese.....	52
Figura 31 – Camadas da superfície MBES.....	53
Figura 32 – Diferença entra as camadas Shoal e Shoal _{HP} da superfície MBES.....	54
Figura 33 – Histograma da diferença entra as camadas Shoal e Shoal _{HP}	54
Figura 34 - Camadas da superfície PDBS.	55
Figura 35 – Superfícies diferença.....	56
Figura 36 – Histograma dos valores das células das superfícies diferenças	56
Figura 37 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 1	57
Figura 38 – Perfil 1	58
Figura 39 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 2.....	58
Figura 40 – Perfil 2.....	59
Figura 41 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 3.....	59
Figura 42 – Perfil 3.....	60
Figura 43 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 4.....	60
Figura 44 – Perfil 4.....	61
Figura 45 – Comparação entre os valores da borda de uma rocha.....	62
Figura 46 - Superfícies com a visualização por quantidade de hipóteses	64
Figura 47 - Superfícies com a visualização da profundidade.....	65
Figura 48 - Superfícies com o desvio padrão (1,96x) da profundidade da hipótese.	65
Figura 49 – Camadas da superfície MBES.....	66
Figura 50 – Diferença entra as camadas Shoal e Shoal _{HP} da superfície MBES.	66
Figura 51 – Histograma da diferença entra as camadas Shoal e Shoal _{HP}	67
Figura 52 – Camadas da superfície PDBS.....	67
Figura 53 – Superfícies diferença.....	68
Figura 54 – Histograma dos valores das células das superfícies diferenças	68
Figura 55 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 1.....	69
Figura 56 – Perfil 1	70
Figura 57 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 2.....	70
Figura 58 – Perfil 2.....	71
Figura 59 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 3.....	71
Figura 60 – Perfil 3.....	72

Figura 61 – Superfícies com a visualização por quantidade de hipóteses	74
Figura 62 – Superfícies com a visualização da profundidade	75
Figura 63 - Superfícies com a visualização da profundidade.....	76
Figura 64 – Superfícies com o desvio padrão (1,96x) da profundidade da hipótese.....	77
Figura 65 – Pilar central da superfície.....	78
Figura 66 – Camadas da superfície MBES.....	79
Figura 67 – Diferença entra as camadas Shoal e Shoal _{HP} da superfície MBES	80
Figura 68 – Histograma da diferença entra as camadas Shoal e Shoal _{HP}	80
Figura 69 – Camadas da superfície PDBS.....	81
Figura 70 – Superfícies diferença.....	82
Figura 71 – Histograma dos valores das células das superfícies diferenças	83
Figura 72 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 1.....	84
Figura 73 – Perfil 1	84
Figura 74 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 2.....	85
Figura 75 – Perfil 2.....	85
Figura 76 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 3.....	86
Figura 77 – Perfil 3.....	86
Figura 78 – Exemplo de simbolização de “ponte fixa com vão livre vertical” de 20 m.	88
Figura 79 – Detecção de objetos submersos.....	88
Figura 80 – Superfícies com a visualização por quantidade de hipóteses.....	89
Figura 81 – Superfícies com a visualização da profundidade	90
Figura 82 – Superfícies com o desvio padrão (1,96x) da profundidade da hipótese.....	90
Figura 83 – Camadas da superfície MBES.....	91
Figura 84 – Diferença entra as camadas Shoal e Shoal _{HP} da superfície MBES	92
Figura 85 – Histograma da diferença entra as camadas Shoal e Shoal _{HP}	92
Figura 86 – Camadas da superfície PDBS.....	93
Figura 87 – Superfícies diferença.....	93
Figura 88 – Superfícies diferença.....	94
Figura 89 – Histograma dos valores das células das superfícies diferenças	94
Figura 90 – Visualização ampliada do casco soçobrado..	95
Figura 91 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 1.....	96

Figura 92 – Perfil 1.....	96
Figura 93 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 2.....	97
Figura 94 – Perfil 2.....	97
Figura 95 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 3.....	98
Figura 96 – Perfil 3.....	98
Figura 97 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 4.....	99
Figura 98 – Perfil 4.....	99
Figura 99 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 5.....	100
Figura 100 – Perfil 5.....	100
Figura 101 – Superfície MBES	102
Figura 102 – Superfícies com a visualização por quantidade de hipóteses.....	104
Figura 103 – Superfícies com a visualização da profundidade	105
Figura 104 – Superfícies com o desvio padrão (1,96x) da profundidade da hipótese.....	105
Figura 105 – Camadas da superfície MBES.....	106
Figura 106 – Diferença entra as camadas Shoal e Shoal _{HP} da superfície MBES	106
Figura 107 – Histograma da diferença entra as camadas Shoal e Shoal _{HP}	107
Figura 108 – Camadas da superfície PDBS.....	107
Figura 109 – Superfícies diferença.....	108
Figura 110 – Histograma dos valores das células das superfícies diferenças	109
Figura 111 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 1.....	110
Figura 112 – Perfil 1.....	110
Figura 113 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 2.....	111
Figura 114 – Perfil 2.....	111
Figura 115 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 3.....	112
Figura 116 – Perfil 3.....	112
Figura 117 – Diagramação das camadas batimétricas com a diferença no eixo z.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das análises dos dados batimétricos.....	3
Tabela 2 – Exemplos de assoreamento em determinados portos brasileiros.....	13
Tabela 3 - Parâmetros de ZOC e categorias de LH	27
Tabela 4 – Valores resultantes do Teste Shapiro-Wilk	47
Tabela 5 – Comparação entre as superfícies analisadas	61
Tabela 6 – Compilação do resultado da aplicação da metodologia, por área.....	116
Tabela 7 – Correlação entre as diferenças de camadas, por área	117

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. O SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO.....	1
1.2. ABORDAGEM DESENVOLVIDA NO MESTRADO.....	3
1.3. DEFINIÇÃO DO ESCOPO DA PESQUISA	9
1.4. ESTRUTURA DA TESE.....	10
2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	12
2.1. MODAL MARÍTIMO E INFRAESTRUTURA PORTUÁRIA	12
2.2. ESPECIFICAÇÃO E PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA	14
2.3. CARTOGRAFIA NÁUTICA	18
2.4. IMPACTOS DA ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA NO SERVIÇO HIDROGRÁFICO BRASILEIRO.....	24
2.5. NOVAS TECNOLOGIAS DE PROSPECÇÃO DE DADOS PARA A CONSTRUÇÃO DA CARTA NÁUTICA	26
3. EMBASAMENTO TEÓRICO.....	32
3.1. DEFINIÇÕES E PREMISSAS.....	32
3.1.1. Tratamento dos dados batimétricos oriundos dos PDBS.....	32
3.1.2 Superfície CUBE.....	38
3.1.3 Determinação da camada	42
3.2. METODOLOGIA	48
4. RESULTADOS.....	50
4.1. ÁREA 1.....	50
4.1.1 Conclusões da Área 1	63
4.2. ÁREA 2.....	64
4.2.1 Conclusões da Área 2.....	72
4.3. ÁREA 3.....	73
4.3.1 Conclusões da Área 3.....	86
4.4. ÁREA 4.....	88
4.4.1 Conclusão da Área 4	101
4.5. ÁREA 5.....	102
4.5.1 Conclusão da Área 5	113

4.6. CONCLUSÕES GERAIS QUANTO A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA	113
5. CONCLUSÃO	120
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	120
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

1. INTRODUÇÃO

1.1. O SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO

Muito tem sido estudado e proposto para a utilização do sonar de varredura lateral interferométrico em levantamentos hidrográficos. Pimentel (2018) e Pimentel, Florentino e Neto (2020) fizeram sondagens concomitantes com o ecobatímetro multifeixe e o sonar interferométrico na Baía de Guanabara, elencando vantagens, desvantagens e potenciais usos deste último. Ma, Xu e Xu (2016) testaram as capacidades do sonar interferométrico frente ao multifeixe. Jerram e Schmidt (2015a; 2015b) estudaram a performance do sidescan batimétrico em uma avaliação ambiental após a passagem da super tempestade Sandy. Dodd (2013) avaliou as incertezas deste mesmo sensor. O Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE, 2013) parametrizou o uso do sonar interferométrico para levantamentos hidrográficos. Ai e Parent (2011) propuseram um modelo de propagação de incertezas para as informações batimétricas adquiridas com esse sensor. Gostnell (2005) fez um estudo preliminar para a NOAA a respeito desta tecnologia.

O maior conhecimento do solo marinho, para os mais diversos propósitos, seja na parte de segurança da navegação, pesquisa ou gerenciamento da Infraestrutura de Dados Espaciais Marinhos (IDEM¹), tem demandado a evolução de normas e tecnologias, no intuito de que este conhecimento seja sempre obtido de maneira rápida e com graus de incerteza cada vez menores.

Tal aspecto pode ser verificado, no que tange às normas, pela nova edição da S-44 (*IHO Standards for Hydrographic Surveys – 6th Edition*) (IHO, 2020), trazendo diferentes formas de abordagem matriciais de classificação de levantamentos hidrográficos. Institui a Ordem Exclusiva, gerando desdobramentos em métodos de coletas de dados e nas tecnologias de prospecção utilizadas. Além da precisão requerida, o viés econômico busca meios cada vez mais expeditos de aquisição de dados, onde a economia de tempo resulta em vantagens financeiras.

Nesse contexto, se inserem os Serviços Hidrográficos, buscando aplicar as normas vigentes da Organização Hidrográfica Internacional² (OHI), atendendo a segurança da navegação e normatizando dentro de seus países. Uma tecnologia que vem sendo encarada com diferentes

¹ IDEM é o “conjunto de tecnologias, políticas e acordos institucionais adotados em um sistema interoperável que permite a busca, o acesso e a visualização de dados geoespaciais” (CHM, 2023) com temática marítima.

² Em inglês, *International Hydrographic Organization* (IHO).

abordagens pelos serviços hidrográficos é a do PDBS (*phase differencing bathymetric sonar*³). Pela pesquisa bibliográfica, pode-se verificar suas vantagens e desvantagens em relação aos métodos consagrados, o que embasa o viés de cada país⁴. Dentre elas, se destacam como vantagem a quantidade de dados batimétricos capazes de serem adquiridos, sua maior varredura e menor tempo na realização de levantamentos hidrográficos. Como grande desvantagem, a menor precisão, o que dificulta o logro de ordens mais restritivas de Levantamento Hidrográfico (LH), tais como a Especial ou a nova Ordem Exclusiva (PIMENTEL, 2018; PIMENTEL; FLORENTINO; NETO, 2020).

Resta aos hidrógrafos, oceanógrafos, geólogos, geofísicos e engenheiros cartógrafos a iniciativa de minorar tais desvantagens, analisando soluções para a aplicabilidade das novas tecnologias aos produtos náuticos, mormente a carta náutica (em formato digital ou papel), proporcionando alternativas viáveis e eficazes para a problemática da atualização cartográfica.

Para isso, é preciso entender a correspondência inequívoca entre LH e carta náutica, mostrando que o primeiro é fundamental para a segunda. Faz-se mister entender a importância desta última, evidenciando como pode afetar diretamente a economia e ter impactos positivos ou negativos no país, dependendo de sua qualidade.

Na compreensão deste atributo, é necessário assimilar a quem compete produzir e atualizar a carta náutica, bem como captar seus critérios, requisitos, técnicas de produção e perspectivas. As demandas internacionais exigem que este produto seja cada vez mais preciso e com uma grande taxa de atualização. Tal fato requer LH's cada vez mais acurados e expeditos, ensejando o surgimento de diferentes tecnologias e esperando que atinjam os mínimos requisitos técnicos. Nesse contexto, este trabalho vem desenvolver a técnica para a aplicação dos dados batimétricos oriundos do PDBS na cartografia náutica.

³ Sigla em inglês para o sonar de varredura lateral interferométrico. Na literatura, também se pode achar PMBS (*phase-measuring bathymetric sidescan*).

⁴ Em prol de evitar repetições, nesta parte se omitiu as referências bibliográficas, que são as mesmas do primeiro parágrafo. A título de pesquisa e informação, cita-se alguns acadêmicos estudiosos do PDBS: Prof. Arthur Ayres (UFF – Brasil), Prof. Kevin Jerram e Val Schmidt (UNH – EUA) e Prof. David Dodd (USM – EUA).

1.2. ABORDAGEM DESENVOLVIDA NO MESTRADO

Este projeto de pesquisa é uma continuação de um trabalho que teve início em 2016, por ocasião do Mestrado em Dinâmicas dos Oceanos e da Terra, realizado nesta própria faculdade. Neste, foi estudado o sonar de varredura lateral interferométrico, à luz das normas vigentes no Brasil e no mundo. Para termos de comparação, foram usados dados batimétricos oriundos do ecobatímetro multifeixe (MBES – *multibeam echosounder*), considerado padrão e aceito pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).

Foi levantada toda uma pesquisa bibliográfica, com as definições que se fazem mister para o entendimento desta Tese (APÊNDICES A e B). Em adendo, para a realização do projeto, foi desenvolvida uma metodologia de planejamento e execução de um levantamento hidrográfico na Baía de Guanabara, possibilitando o fornecimento dos dados batimétricos de ambos os equipamentos para comparação e análise crítica (Tabela 1). Assim, cinco áreas foram sondadas, com diferentes propósitos, visando explorar e comparar características diferentes dos respectivos sonares, sempre tendo por objetivo a verificação do aproveitamento dos dados batimétricos do PDBS para a atualização de documentos náuticos (Figura 1). A área 1 visava avaliar a capacidade de detecção de alvos, por ser rica em afloramentos rochosos. A área 2 verificava a capacidade de resolução de inclinações do terreno, por ter desde as mais suaves até as mais abruptas. A área 3 avaliava a performance em detectar objetos que se pronunciam para acima da superfície do mar, sendo realizada nos pilares da Ponte Presidente Costa e Silva. A área 4 examinava a capacidade de detecção de alvos relacionados a naufrágios, contemplando um casco soçobrado. A área 5 foi um teste de eficiência, sendo realizado em um local plano, com profundidades variando entre 2 e 20 metros. Por ser um teste de eficiência, esta última área não foi avaliada em termos de precisão e acurácia.

Tabela 1 – Resumo das análises dos dados batimétricos adquiridos com o PDBS e resultados comparativos entre as superfícies batimétricas geradas a partir do MBES e do PDBS. Dados relativos à precisão (rosa) e à acurácia (coral). Fonte: Adaptado de (PIMENTEL; FLORENTINO; NETO, 2020).

	Área 1		Área 2		Área 3		Área 4	
	MBES	PDBS	MBES	PDBS	MBES	PDBS	MBES	PDBS
Incerteza média da hipótese (m)	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2

Ordem Especial (avaliação do TPU ⁵)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Desvio Padrão Médio do nó⁶ (m)	0	0.2	0	0.2	0	0.2	0	0.2
Ordem Especial (avaliação da incerteza amostral do nó)	99.5%	36.8%	99.8%	21.9%	99.1%	54%	99.3%	21.8%
Ordem 1a (avaliação da incerteza amostral do nó)	N/A	98.8%	N/A	96.8%	N/A	97.1%	N/A	97.9%
Densidade (média da quantidade de pings que contribuíram para 1 nó)	51.5	227.6	48	268.5	49.2	120.1	35.2	157.7
QC Report		<u>Ordem Especial</u>		<u>Ordem Especial</u>		<u>Ordem Especial</u>		<u>Ordem Especial</u>
Depth_{MBES} - Depth_{PDBS}(m)		$\mu = 0.1$		$\mu = 0.1$		$\mu = 0$		$\mu = 0$
Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS} (m)		$\mu = 0.6$		$\mu = 0.7$		$\mu = 0.5$		$\mu = 0.6$

⁵ Incerteza total propagada. Do inglês *total propagated uncertainty*.

⁶ Nó é o centro da célula de uma superfície e geralmente tem um valor numérico atribuído. Dependendo da temática da superfície, pode ser um valor de profundidade, incerteza, densidade, etc.



Figura 1 – Áreas em que foram realizados os testes na Baía de Guanabara. Fonte: (PIMENTEL, 2018).

Na tabela acima, cada linha contém uma avaliação diferente dos dados batimétricos adquiridos com o PDBS. A primeira linha estima a incerteza média da hipótese, calculada com o algoritmo do CUBE (*Combined Uncertainty and Bathymetry Estimator*)⁷ (CALDER; MAYER, 2003; CARIS, 2017; QPS, 2018). A partir deste parâmetro, foi calculado a porcentagem dos nós que se enquadram em Ordem Especial⁸ (segunda linha). Outro parâmetro analisado foi a incerteza amostral do nó, que abarcava todos os *pings* que foram considerados válidos na fase de processamento (terceira linha). Baseado nessa grandeza, foi verificado o enquadramento em Ordem Especial (quarta linha) e 1a (quinta linha). A sexta linha mostra a quantidade de *pings* que contribuíram para cada nó da superfície batimétrica, mostrando um maior adensamento dos dados

⁷ O algoritmo de interpolação do CUBE, no que tange à estimativa das hipóteses e suas incertezas, será mais bem abordado no Capítulo 3. O seu entendimento se faz necessário para uma melhor compreensão da metodologia proposta neste trabalho.

⁸ No trabalho desenvolvido no Curso de Mestrado, a ordem mais restrita de LH analisada foi a Ordem Especial. Como a 6th edição da S-44 ainda não tinha sido desenvolvida, a Ordem Exclusiva não foi contemplada.

oriundos do PDBS. Até aqui, pode-se perceber que apesar de uma quantidade bem maior de dados, o PDBS fornece-os de forma mais dispersa, comparativamente ao MBES, como se pode ver na Figura 2.

Ainda na mesma tabela, já passando para análise da acurácia, a sétima linha mostra, a partir do cruzamento entre a superfície CUBE (que estimou as hipóteses representativas da profundidade – camada *Depth*) do PDBS e as linhas adquiridas com o MBES, que o enquadramento foi na Ordem Especial. A oitava linha mostra a diferença entre as estimativas de profundidade das superfícies geradas com os dados advindos do MBES e do PDBS. A pequena diferença mostra que o CUBE foi capaz de estimar a profundidade do fundo marinho com valores batimétricos compatíveis. A nona linha vem salientar a diferença entre a camada *Shoal*⁹, composta pelas profundidades mais rasas que contribuíram para cada nó. A diferença mais acentuada da média demonstra, mais uma vez, a dispersão dos dados válidos do PDBS.

⁹ A camada *Shoal*, por representar os dados batimétricos mais rasos considerados válidos dentro de cada nó, é utilizada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) como subsídio para a construção da Carta Náutica. Este tópico será melhor abordado nos capítulos 4 e 5.

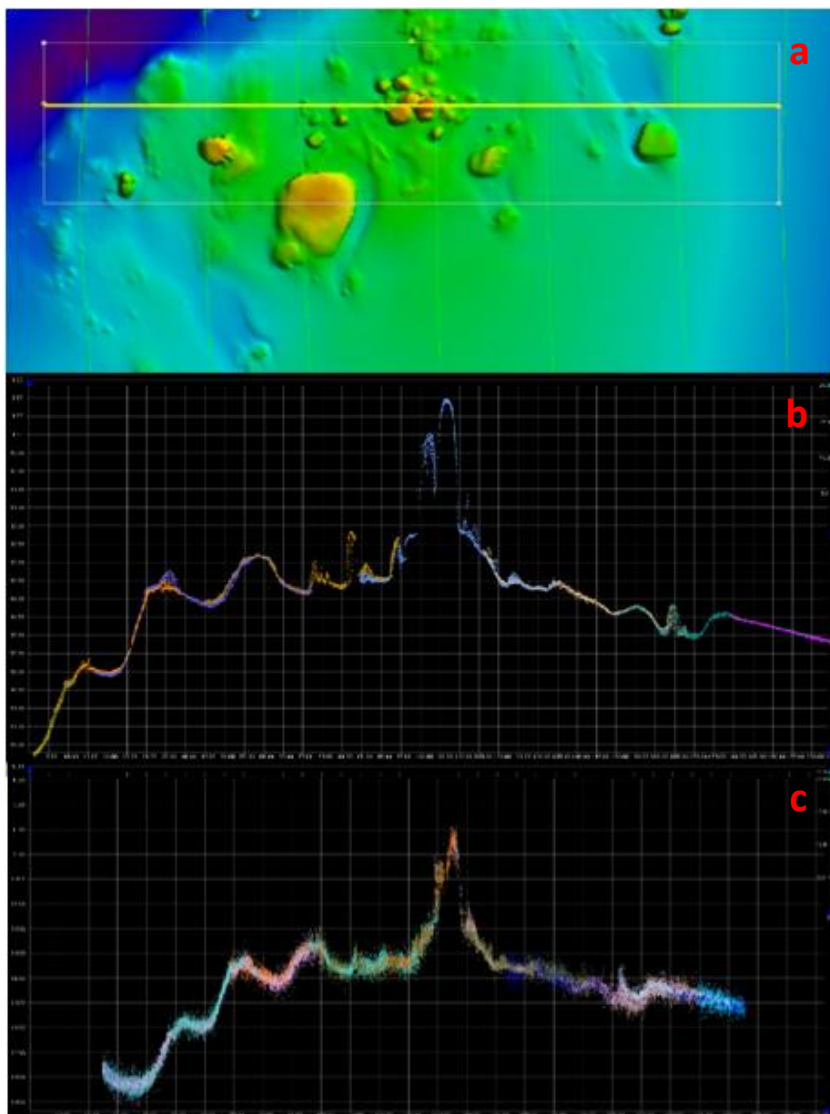


Figura 2 – Dispersão dos dados. O quadro a mostra um perfil da área 1 visualizado no programa CARIS HIPS&SIPS 10.2. O quadro b mostra os dados do MBES e o quadro c, do PDBS. Fonte: Adaptado de (PIMENTEL; FLORENTINO; NETO, 2020).

Em adendo, também foi verificado, por meio da área 5 (esta área não teve as análises estatísticas que compõe a Tabela 1), a melhor performance do PDBS em áreas mais rasas, com mais eficiência na sondagem.

Como resumo da comparação, foi verificado que o PDBS é capaz de estimar bem o fundo marinho, tem maior quantidade de dados por nó (o que permite robustez estatística e capacidade para gerar superfícies com maiores resoluções espaciais) e tem maior eficiência na sondagem. Contudo apresenta efeitos inerentes à sua tecnologia e ao tratamento dos dados que

impossibilitaram sua classificação como Ordem Especial. Dentre os efeitos identificados como os mais prejudiciais, destacam-se o ruído (*noisiness*), *layover* e a grande dispersão dos *pings* considerados válidos¹⁰.

O ruído (*noisiness*) ocasiona a validação de determinados *pings* que não representam o fundo marinho (LURTON, 2000). Apesar deste efeito ser tratado no processamento, alguns *pings* ainda permanecem, não sendo possível desassociá-los dos que realmente representam objetos e feições submersas. Assim, ele pode dificultar a discriminação ou visualização de alvos, principalmente os de pequenas dimensões, e deteriorar o resultado do controle de qualidade. Porém não afetam a determinação de profundidades.

O *layover* é inerente à tecnologia do PDBS (ĂRĂCIN; CALIN, 2000; WOOCK; FREY, 2010; SAUCAN et al., 2015), ocorrendo durante toda a sondagem. Como o mesmo objeto é imageado por diversos *pings*, os que ficaram suscetíveis ao *layover* foram tratados como ruídos e excluídos no processamento. Apenas em feições muito íngremes (ângulos $\geq 85,7^\circ$) (PIMENTEL, 2018) o efeito não pode ser mitigado. Tal efeito acontecerá principalmente em bordas de rochas e objetos soçobrados, dificultando o seu discernimento na superfície batimétrica. Entretanto, apesar de atrapalhar seu imageamento, não impossibilita sua quantificação (determinação numérica das dimensões de determinado objeto, sendo o mais importante a sua altura em relação a solo marinho). Nos moldes do que ocorre com o ruído, este efeito pode ser desprezado na atualização náutica, a depender da escala da Carta Náutica que será atualizada¹¹.

A grande dispersão dos *pings* considerados válidos, a qual gera incerteza vertical mais elevada (BRISSON; WOLFE; STALEY, 2014; JERRAM; SCHMIDT, 2015), é oriunda da aquisição e processamento dos dados batimétricos no PDBS. Na aquisição, não há o processo de filtragem que ocorre com o ecobatímetro multifeixe, realizado por meio de algoritmo (se aplica ao EM 2040, da Empresa *Kongsberg Maritime*, utilizado neste estudo). No processamento do sonar interferométrico, são aplicados filtros de amplitude do sinal recebido e filtros estatísticos para determinação do fundo. Mesmo com sua aplicação, os dados batimétricos permanecem muito

¹⁰ Estes efeitos foram amplamente estudados e comentados, com ampla pesquisa bibliográfica e resultados práticos nos dados analisados. Para maiores esclarecimentos e acesso à bibliografia de referência mundial, ver APÊNDICE A e (PIMENTEL, 2018).

¹¹ Embora esses efeitos possam ser desconsiderados na atualização dos produtos que temos hoje, há de se considerar que aumenta a incerteza vertical de uma determinada sondagem. Tal atributo pode ser requerido no novo modelo de dados da S-100. A partir daí, esses efeitos deverão ter maiores influências na Carta Náutica.

dispersos verticalmente, afetando diretamente o controle de qualidade e sua inclusão em Ordem Especial, além de apresentar uma camada *Shoal* mais rasa do que a dos dados oriundos do MBES. Esse efeito é o principal obstáculo para a utilização dos dados batimétricos do PDBS, demandando uma outra abordagem, seja nas etapas de aquisição, processamento ou tratamento da superfície batimétrica.

Apesar de não ser uma leitura *sine qua non*, no intuito de melhor abarcar muitos dos conceitos discutidos ao longo deste trabalho, desenvolver-se-á documentos suplementares pós-textuais: **APÊNDICE A – CONCEITOS TEÓRICOS SOBRE O SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO E O ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE** e **APÊNDICE B – AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS BATIMÉTRICOS**. Cabe destacar que estes documentos têm origem em Pimentel (2018).

1.3. DEFINIÇÃO DO ESCOPO DA PESQUISA

Na dissertação de Mestrado, foi desenvolvida uma metodologia para análise dos dados batimétricos do PDBS, bem como sua avaliação, à luz das normas internacionais e do MBES. Como continuação natural da pesquisa, surge a questão de sua aplicação. O principal produto de um levantamento hidrográfico é a Carta Náutica, dessa forma, o que se busca é a maneira de atualizá-la por meio do PDBS.

Este trabalho vem prescrutar esta problemática, objetivando, ao fim do estudo, criar uma metodologia que, uma vez aplicada, possibilite a utilização da batimetria obtida pelo sonar de varredura lateral interferométrico na produção cartográfica em função da maior efetividade no levantamento, com forte impacto em seus custos. Como os dados do PDBS possuem maior dispersão vertical (considerando o MBES como parâmetro), se buscou uma metodologia para mitigar este efeito.

Em prol de alcançar tal objetivo, partir-se-á da seguinte HIPÓTESE: **“informações batimétricas para a segurança da navegação podem ser obtidas por meio de dados oriundos do sonar de varredura lateral interferométrico e aplicadas nos mais diversos produtos náuticos”**. No intuito de estratificar esse desafio em etapas, as seguintes perguntas, uma vez

respondidas, serão capazes de verificar o grau de plausibilidade desta hipótese. Elas representam um crescente, em termo de performance do PDBS na segurança da navegação. Seguem:

1. É possível criar uma metodologia, diferente da atual, para a aplicação dos dados batimétricos oriundos do PDBS?
2. Essa metodologia, uma vez aplicada ao PDBS, apresenta resultados melhores do que a atual forma de uso dos dados? Em que grau?
3. A metodologia possibilita a utilização dos dados PDBS na segurança da navegação?
4. A metodologia possibilita menor dispersão dos dados PDBS, tornando-o compatível com os do MBES?
5. Há alguma restrição no uso dos dados batimétricos do PDBS para atualização de algum produto náutico?

A pergunta 1 se refere a exequibilidade do intento desta pesquisa. Caso a resposta da pergunta 1 seja positiva, as indagações do item 2 verificam o grau de eficiência da metodologia. Os questionamentos 3, 4 e 5 focam na eficácia, ou seja, no potencial uso.

Como principal documento náutico de segurança da navegação, a atualização da Carta Náutica é o objetivo último da pesquisa. Em outros termos, caso o resultado da pergunta 4 seja positivo e a da 5 negativa, a metodologia teve êxito completo e a hipótese foi demonstrada como verdadeira em sua integralidade. Contudo, como verificado nesta breve explanação e nos apêndices, existem dificuldades que, a princípio, parecem intransponíveis. Para entender as soluções propostas, é necessário desenvolver alguns conceitos, premissas e respectivas ilações, abordados em capítulos próximos.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

O presente capítulo é referente a uma introdução ao sonar de varredura lateral interferométrico, aos principais efeitos positivos e negativos e à problemática de seu uso na atualização cartográfica. O capítulo 2 fará uma contextualização do problema, abarcando os efeitos mais práticos e econômicos de um levantamento hidrográfico. O capítulo 3 fará discussão dos

principais conceitos e premissas necessários para a compreensão da metodologia de tratamento de dados proposta, uma vez que propõe algumas mudanças de perspectivas, e fará sua apresentação e desenvolvimento. No capítulo 4, pretende-se aplicar a metodologia nos dados prospectados, bem como avaliar o resultado. O capítulo 5 trará a conclusão do trabalho e no capítulo 6 estarão as referências bibliográficas utilizadas ou consultadas.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

2.1. MODAL MARÍTIMO E INFRAESTRUTURA PORTUÁRIA

Com uma extensão litorânea de aproximadamente 8.000 km (IBGE, 2011) e hidrovias navegáveis de 21.000 km (DNIT, 2021), o Brasil é um país com grande propensão para a navegação.

O transporte marítimo brasileiro é responsável por cerca de 95% da importação e exportação do país (CABRAL; BAHIA, 2017; PORTAL DA INDÚSTRIA, 2020). No âmbito interno, a navegação de cabotagem e hidrovias detém o volume de 16% do transporte de cargas nacional (ROBERTO et al., 2020). A infraestrutura de navegação conta com um total de 174 portos públicos e privados distribuídos pelo país (Figura 3), movimentando ao redor de 700 milhões de toneladas de carga bruta no primeiro semestre de 2021 (ANTAQ, 2021).



Figura 3 – Terminais portuários distribuídos pelo Brasil. Em azul, os terminais privados; em vermelho, os públicos. Fonte: (ANTAQ, 2021).

Sua distribuição pelo país ressalta a potencial importância em defesa e na geopolítica nacional (CABRAL; BAHIA, 2017), sendo grande foco de interesse do Poder Marítimo e do Poder Naval¹² (BRASIL. MINISTÉRIO DA DEFESA, 2020).

Como um dos fatores primordiais na navegação marítima, os terminais portuários são fundamentais para o funcionamento de toda essa estrutura. A escolha do ponto de atracação de um navio se deve, principalmente, ao seu custo logístico, apresentando-se, em geral, bem elevado. As empresas de transporte marítimo, por sua vez, tentam diluir esses custos, aumentando a eficiência do transporte. Uma das formas de atingir esse objetivo é alargar a capacidade de carga dos navios, repercutindo no aumento em seu calado, provocando canais de navegação com maiores profundidades e exigindo investimento em dragagem dos canais de acesso aos portos ((CADE), 2017).

A Nova Lei dos Portos (Lei nº 12.815/2013) veio com o objetivo de aumentar a infraestrutura dos mesmos e modernizar sua gestão. Ela institui, em seu Art. 53, o segundo Programa Nacional de Dragagem (BRASIL, 2013). A partir desse marco, intensificaram-se as obras de dragagem nos terminais portuários, de forma que eles pudessem aumentar paulatinamente o calado de navegação. Muitos desses canais, por não serem formações naturais, sofrem assoreamento (Tabela 2), necessitando de manutenção por meio de dragagens constantes (AUTORIDADE PORTUÁRIA DE SANTOS, 2020).

Tabela 2 – Exemplos de assoreamento em determinados portos brasileiros. Fonte: ((CGU), 2020).

Porto	Volume de Assoreamento Anual (m³)	Porto	Volume de Assoreamento Anual (m³)
Cabedelo	200.000	Itaguaí	228.122
Itajaí	2.400.000	Fortaleza	450.000
Natal	200.000	Paranaguá	3.686.790
Rio de Janeiro	200.000	Rio Grande	4.386.451
Santos	6.600.000	São Francisco do Sul	365.800
Suape	300.000	Vitória	250.000

¹² “Entende-se como Poder Marítimo o componente do Poder Nacional de que a nação dispõe para atingir seus propósitos ligados ao mar ou dele dependentes. Esses meios são de natureza política, econômica, militar e social e incluem, entre vários outros, a consciência marítima do povo e da classe política, a Marinha Mercante e a Marinha de Guerra, a indústria de construção naval, os portos e a estrutura do comércio marítimo. O Poder Naval é o componente militar do Poder Marítimo.” (BRASIL, 1994).

Nesses casos, é necessário que seja realizado um LH após o fim da dragagem, ou, em locais de dragagem constante, um acompanhamento periódico ((DPC), 2017). É interesse da Autoridade Portuária que as novas informações batimétricas constem nas Cartas Náuticas dos seus respectivos portos, com os LH de fim de situação enviados ao Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) para verificação de aproveitamento na atualização de documentos náuticos. Cada LH é analisado à luz dos requisitos técnicos nacionais mais restritos, os quais são compilados na publicação NORMAM-25/DHN (2ª Revisão) ((DHN), 2017).

Pelo exposto acima, pode-se perceber como a atualização cartográfica depende de um LH que atenda aos requisitos técnicos estabelecidos, o qual gera impactos na utilização de toda a estrutura portuária, afeta o modal marítimo (WILLIANS, 1980) e, conseqüentemente, tem atuação direta na economia, seja nos âmbitos regional, estadual ou nacional¹³. Uma vez que a realidade mundial demanda a adoção de navios maiores no comércio marítimo, a dragagem é fundamental nesse quesito (ANTAQ, 2020). Dentro deste contexto, o PDBS surge como opção de menor custo econômico para a execução de LH (PIMENTEL, 2018) (pelos aspectos já abordados no capítulo anterior), desde que seus dados possam ser aproveitados para atualização cartográfica.

2.2. ESPECIFICAÇÃO E PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA

“Navegação é a ciência e a arte de conduzir, com segurança, um navio (ou embarcação) de um ponto a outro da superfície da Terra” (MIGUENS, 1996)¹⁴. É com essa definição que o Comandante Miguens, autor da bibliografia oficial de navegação da Marinha do Brasil inicia sua obra. Este trabalho não pretende abordar a parte histórica deste tópico, visto que já foi amplamente tratado na literatura acadêmica. Contudo, uma parte interessante da definição é no tocante à “...um ponto a outro da superfície da Terra.” Para isso são necessários não apenas mapas, mas sim

¹³ Em uma análise do micro para o macro, a escolha do porto de atracação dos navios gera fomento na economia local. Portos próximos competem em prol de serem mais atrativos ((CADE), 2017). Maiores calados de navegação propiciam fluxo de navios maiores. Importa ressaltar ainda que Cartas Náuticas confiáveis também diminuem o custo do porto, uma vez que o seguro fica menor (SARRABEZOLE; LASSERRE; HAGOUAGN’RIN, 2016), diminuindo o custo Brasil.

¹⁴ Existem diversas definições de navegação, desde as mais simples até as mais complexas, nas quais outros conceitos são contemplados: planejamento, execução, rotas, embarcação, técnicas, etc. Contudo, o objetivo aqui foi mostrar a universalidade do ato de navegar, sendo uma atividade a ocorrer em todo o globo terrestre.

produtos cartográficos que possam ser lidos ao redor do globo. Ou seja, uma universalização para que qualquer navegante, de qualquer nacionalidade e em qualquer lugar do mundo, possa ler e interpretar as informações.

Em 1974, a SOLAS (*International Convention for the Safety of Life at Sea*) é adotada em âmbito mundial, sob tutela de Organização Marítima Internacional¹⁵. Nela, está descrito, em sua regra número 20, que todos os navios devem portar cartas náuticas adequadas ((IMO), 1974). Para que a linguagem fosse universal, após diversos esforços conjuntos da comunidade internacional, em 1984, a Organização Hidrográfica Internacional (OHI), por meio da *Chart Standardization Committee*, publica a primeira edição da *Regulations of the IHO For International (Int) Charts Sections*. Muito se evoluiu em termos de publicação e estrutura desde então e atualmente, tem-se o *Nautical Cartography Working Group* (pertencente à OHI) responsável pela uniformização e estruturação da Carta Náutica, por meio da publicação S-4 “*Chart Specifications and Regulations for INT Charts*”, agora em sua quarta edição, datada de março/21 ((IHO), 2021).

Com a natural evolução tecnológica, tanto de produtos cartográficos quanto computacionais, surge a ideia da carta náutica eletrônica em formato vetorial (ENC – *Electronic Nautical Chart*). Assim, em 1992, a OHI publica a S-57 “*IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data*” ((IHO), 2000a). O conhecimento foi sendo amadurecido ao longo dos anos e diversas outras publicações foram sendo lançadas, de modo a parametrizar a compilação, validação, distribuição e utilização das ENC. Essas cartas são lidas por equipamentos específicos conhecidos como ECDIS (*Electronic Chart Display and Information System*) ou mais genéricos, conhecidos como ECS (*Electronic Chart System*) ((DHN), 2011), sendo utilizados a bordo dos navios.

Passando ao âmbito interno, o Brasil respeita e internaliza essas normas, uma vez que é um país membro da OHI. No que tange aos aspectos de defesa e infraestrutura, cabe à Diretoria-Geral de Navegação (DGN) o preparo e aplicação dos Poderes Naval e Marítimo com relação à segurança da navegação, sendo a DHN a Organização Militar subordinada responsável por esta aplicação na área de hidrografia (BRASIL. MINISTÉRIO DA DEFESA, 2020). Dentro do território brasileiro e na qualidade de serviço hidrográfico, cabe ainda à DHN o estabelecimento de normas técnicas para a cartografia náutica, bem como elaboração e produção dos insumos (BRASIL, 1967). Dessa

¹⁵ Em inglês, *International Maritime Organization* (IMO).

forma, o CHM é responsável pela produção cartográfica náutica ((DHN), 2021), gerando cartas náuticas em formato papel, raster¹⁶ e vetorial (Figura 4).



Figura 4 – Carta Náutica 1511, nos formatos papel, raster e vetorial. Fonte: (MANDARINO et al., 2017). Esse é um exemplo do atual portfólio mantido e oferecido pela DHN.

É importante mencionar ainda o próximo salto tecnológico, que vem se apresentando como grande desafio aos serviços hidrográficos: o novo formato de intercâmbio de dados hidrográficos S-100 “*Universal Hydrographic Data Model*”¹⁷ ((IHO), 2022). A ideia é integrar informações hidrográficas, cartográficas, meteorológicas, oceanográficas e de sinalização náutica em vários produtos interoperáveis (Figura 5) para ser visualizado nos ECDIS dos navios, com os países podendo, a partir de 2025, adotar este insumo ((IHO), 2021). Uma das especificações de produtos da família S-100 é a S-102 “*Bathymetric Surface*”, uma superfície batimétrica mais adensada que a batimetria informada na Carta Náutica (S-101 “*Electronic Navigational Chart*”) (Figura 6). A utilização da S-102, em um formato padrão, é essencial para apoiar a precisão e a segurança da navegação das embarcações marítimas, além de ser uma importante plataforma para diversas aplicações no mar ((IHO), 2019). Devido à dificuldade logística de produzir superfícies batimétricas com alta resolução de forma expedita, o PDBS é uma opção cada vez mais atraente para atender a esta necessidade.

¹⁶ Carta Raster ou RNC (*Raster Nautical Chart*) é a versão da carta náutica em papel digitalizada para visualização nos ECDIS / ECS. É distribuída gratuitamente pela DHN e não vale como documento oficial de navegação ((DHN), 2011).

¹⁷ Este trabalho não pretende, de forma alguma, esgotar o tema da S-100. A ideia é mostrar a evolução da Carta Náutica, os desafios e as oportunidades, embasando na teoria e na prática a utilização do PDBS. Como o tema é complexo, extenso e embrionário, para maior conhecimento, sugere-se consultar o sítio da OHI na internet (<https://iho.int/en/s-100-based-product-specifications> e <https://iho.int/en/s100-project>).



Figura 5 – Família de produtos compatíveis S-100, com todas as informações que estarão disponíveis. Fonte: ((IHO), 2022).

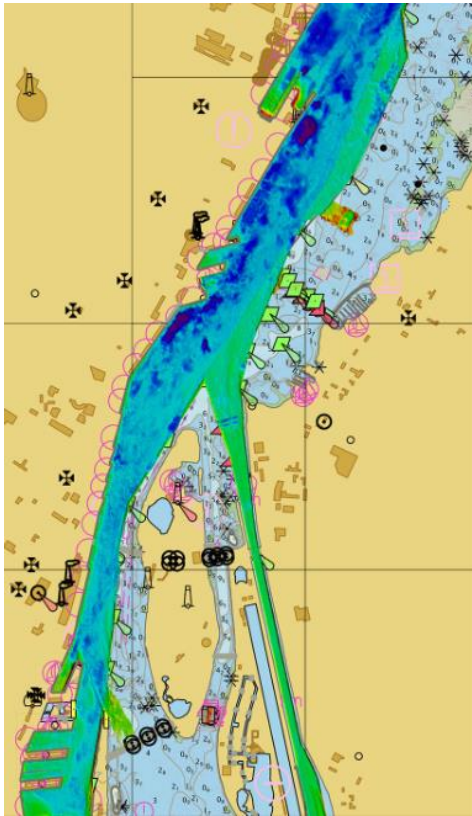


Figura 6 – Composição de ENC e camada S-102. Porto de Montreal, Quebec, Canadá. Fonte: (CANADÁ, 2022).

2.3. CARTOGRAFIA NÁUTICA

Seguindo uma definição bem completa de Carta Náutica, pode-se entender que

“[...] são documentos cartográficos que resultam de levantamentos de áreas oceânicas, mares, baías, rios, canais, lagos, lagoas, ou qualquer outra massa d’água navegável e que se destinam a servir de base à navegação; são geralmente construídas na Projeção de Mercator e representam os acidentes terrestres e submarinos, fornecendo informações sobre profundidades, perigos à navegação (bancos, pedras submersas, cascos soçobrados ou qualquer outro obstáculo à navegação), natureza do fundo, fundeadouros e áreas de fundeio, auxílios à navegação (faróis, faroletes, boias, balizas, luzes de alinhamento, radiofaróis, etc.), altitudes e pontos notáveis aos navegantes, linha de costa e de contorno das ilhas, elementos de marés, correntes e magnetismo e outras indicações necessárias à **segurança da navegação.**” ((DHN), 2021), grifo meu.

Esse conceito é bem completo, excluindo necessidades de maiores considerações. Ele explicita bem o entendimento do país que o objetivo último da carta náutica é a segurança da

navegação. Encontrar-se-á entendimento semelhante na OHI, por meio da S-4, expressando que “o objetivo do conceito das cartas internacionais é facilitar o provisionamento dos mínimos elementos que se apliquem aos requerimentos da navegação internacional.” ((IHO), 2021) (tradução livre¹⁸).

Um dos elementos fundamentais da Carta Náutica contribuinte para este intento é a informação de profundidade, a qual inclui linha de costa, batimetria e isobatimétrica, sendo a batimetria a informação mais importante (SKOPELITI et al., 2020). Estes elementos são prospectados por meio de LH, contudo, enquanto o LH busca representar o fundo marinho, quantificando e qualificando suas feições e objetos, a Carta Náutica busca representar uma superfície de segurança de navegação (também oriunda de dados de LH, porém processada de outra forma), de forma a garantir uma travessia segura da área que representa. Eis uma diferença que muitas vezes passa despercebida ao utilizador final.

Para que o LH venha a integrar a carta náutica, ele passa por um processo chamando generalização cartográfica que é a técnica de reduzir informações expostas no produto, de acordo com sua escala, sendo baseado em normas da OHI, nas boas práticas dos serviços hidrográficos e na literatura cartográfica. Ela é guiada por quatro princípios (SKOPELITI et al., 2020):

1. Requisito de legibilidade: no produto deve estar apenas informação essencial de forma clara e compreensível. Uma grande quantidade de informação dificulta sua leitura e interpretação;
2. Requisito de segurança: este princípio nunca deve ser quebrado. Ele consiste em que todas as profundidades descritas na carta não podem ter profundidades menores das estimadas no LH original. Ou seja, caso se escolham três profundidades vizinhas, de forma que cada uma venha a ser o vértice de um triângulo, não haverá sondagens mais rasas dentro da área dessa figura geométrica;
3. Requisito topológico: a topologia deve estar correta. Um exemplo clássico é a não interseção entre linhas isobatimétricas; e
4. Requisito morfológico: a morfologia do fundo marinho representada e a característica das feições devem estar preservadas.

¹⁸ Original em inglês: “*The aim of the international chart concept is to facilitate the provision of minimum sets of charts suitable for the navigational requirements of international (foreign-going) shipping.*”

Muitas vezes esses requisitos não se coadunam e, dependendo da situação, um terá preponderância sobre o outro. Contudo, como já exposto, o requisito número 2 sempre terá prioridade sobre todos os outros.

Importante ressaltar que a generalização cartográfica será de maior ou menor intensidade, dependendo da escala do produto final. Quanto maior a escala, menor será a generalização cartográfica, pois este insumo poderá ser mais detalhado, representando melhor a área.

As sondagens que constarão na carta náutica devem ser amostradas, em um processo chamado seleção de sondagens. Objetivando um LH Ordem Exclusiva ou Especial, devem ser quantificadas feições cúbicas com 0,5 e 1,0 metro cúbico de dimensão, respectivamente ((IHO), 2020). No fito de evitar feriados¹⁹ e respeitar o critério de *Nyquist*²⁰, a superfície batimétrica resultante do LH deve ter uma resolução de 0,25 m x 0,25 m (Ordem Exclusiva) ou 0,5 m x 0,5 m (Ordem Especial) (PIMENTEL, 2018), gerando uma quantidade de informações batimétricas que seria impossível representar no produto náutico²¹ sem ferir o requisito n° 1. De forma criteriosa, automática e manual (COVE; CAVANAGH; LARRIVÉE, 2020a), as sondagens são selecionadas de acordo com a característica de cada informação batimétrica²².

As sondagens são divididas em três tipos²³: prioritária, de plano de fundo e de limitações de profundidade. As **prioritárias** marcam as feições do fundo marinho, aquelas com grande variação de profundidade em relação ao que se espera do relevo marinho (baseado na interpolação entre sondagens adjacentes). Como pode vir a representar risco à segurança da navegação, sua seleção tem tendência (*bias*) para as mais rasas. Aquelas classificadas como **de plano de fundo** tem a função de representar o fundo marinho em geral, onde não exista nenhuma feição submersa

¹⁹ Na comunidade hidrográfica, “feriado” é o termo designado para descrever trechos de uma superfície nos quais suas células ou seus nós não contém nenhum valor.

²⁰ Neste critério, para que uma feição seja detectada e quantificada, devem, pelo menos, ter duas amostras que a perceberam (ALLABY, 2008).

²¹ O produto oferecido pela S-102 vem contornar essa dificuldade, criando uma *layer* de cores, de visualização opcional, na qual a superfície batimétrica estaria representada.

²² Este trabalho entenderá que informação batimétrica é a informação de sondagem ou profundidade, como as que se podem ver representadas nas cartas náuticas. Cabe também a diferenciação entre *ping* e sondagem (*sounding*). *Ping* é a informação batimétrica oriunda do ecobatímetro (bruta), enquanto sondagem é a deduzida em uma superfície ou Carta Náutica (processada).

²³ Para maior didatismo e entendimento do conceito de sondagem (*sounding*), optou-se pela classificação exposta no texto. Contudo, a OHI classifica as sondagens em “profundidades de controle (*controlling depth*)” e “críticas (*critical*)”. A primeira representa as sondagens pelas quais uma embarcação monitora o quão raso ela pode navegar. A segunda se refere às sondagens mais rasas localizadas na proximidade de uma potencial rota de navegação ((IHO), 2021).

digna de nota e onde uma interpolação linear entre sondagens adjacentes seja verossímil. Seu espaçamento fica maior conforme aumenta a profundidade da área. Nelas, também existe a tendência para escolha de profundidades mais rasas. O terceiro e último tipo é a **de limitação de profundidade**, consistindo nas sondagens mais rasas que limitam a parte mais profunda de um canal natural ou o talvegue de um rio (LOVRINČEVIĆ, 2017; SKOPELITI et al., 2020) (Figura 7).

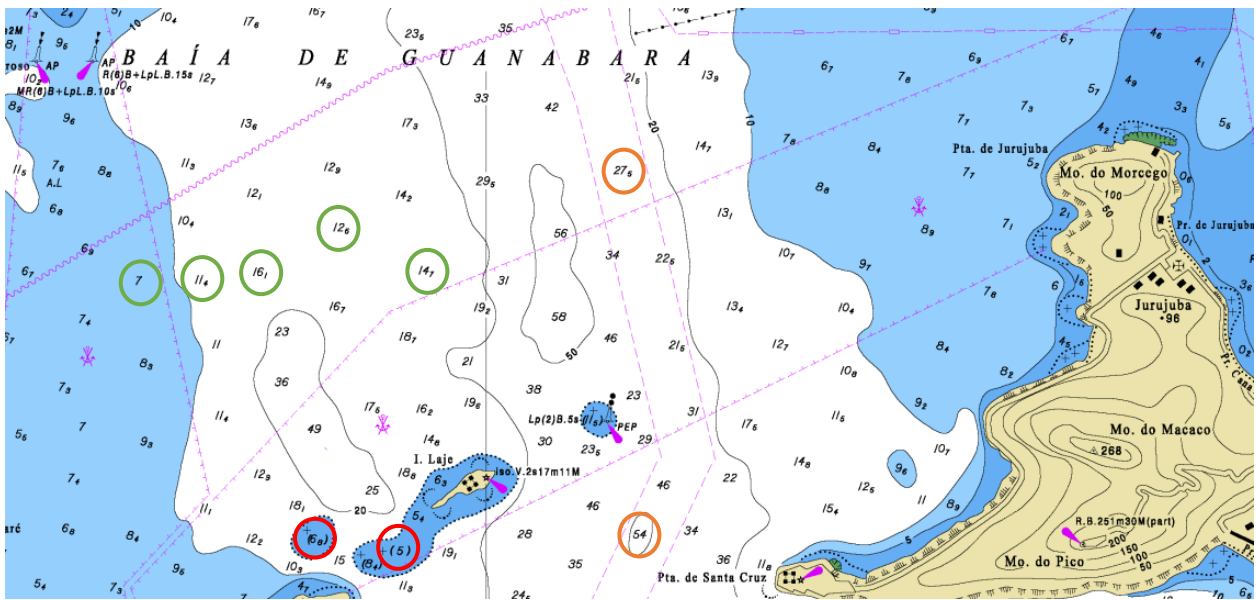


Figura 7 – Extrato da CN 1511. Nele podem-se ver exemplos dos diferentes tipos de sondagens. Dentro dos círculos vermelhos estão as **prioritárias** (que ressaltam as rochas que oferecem risco à navegação), nos círculos verdes estão as **de plano de fundo** (que são quase a totalidade) e nos de cor laranja estão as **de limitação de profundidade**, delineando o canal de acesso a Baía de Guanabara.

Como descrito no parágrafo anterior, independentemente do tipo de profundidade (mesmo as representantes das feições mais profundas na carta náutica) existe uma tendência para a representação das mais rasas. Em adicional, a OHI define como sendo o principal princípio de seleção de sondagem, o padrão de escolha das mais rasas ((IHO), 2021). Por esta razão, a carta náutica mostra uma superfície de segurança da navegação e não a do fundo marinho (Figura 8).

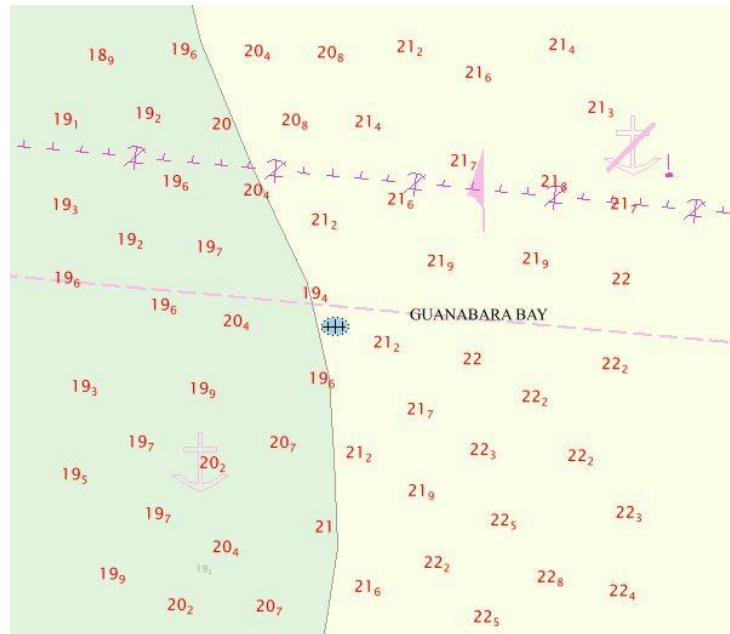


Figura 8 – Seleção de sondagens (vermelho) advindas de uma sondagem com o ecobatímetro multifeixe sobre a ENC BR501512 (Baía de Guanabara). A partir de sua análise é que definir-se-á se haverá atualização dos produtos náuticos.

Em resumo, a generalização cartográfica, em uma visão perfunctória, vai permitir com que a superfície batimétrica venha a integrar a Carta Náutica (Figura 9), envolvendo dois processos, que ocorrem na seguinte ordem: **priorizar** as sondagens mais rasas para constarem nas cartas náuticas e **diminuir** sua quantidade²⁴, mantendo coerência com o LH de origem. Quando aplicamos a generalização cartográfica nos dados adquiridos com o PDBS, podemos observar como esses processos interagem com duas características marcantes deste equipamento. A primeira seria a quantidade de *pings*. Esta tecnologia permite, para uma mesma área, uma maior estimativa de *pings* do que o ecobatímetro multifeixe. Contudo, como já visto em Pimentel (2018), o estimador de superfícies CUBE consegue lidar com esse entrave²⁵. A segunda característica é a dispersão dos dados válidos. Como ela é majorada em relação aos dados do MBES, a escolha das sondagens mais rasas faz com que uma área sondada com o PDBS apresente uma superfície batimétrica com profundidades menores (Figura 10), indo em contrapartida ao interesse de aumento do calado. Com

²⁴ Em uma superfície MBES ou PDBS de alta resolução, se cada célula fosse representada por uma sondagem, a Carta Náutica seria impossível de ser lida, pois existiriam muitas informações. Como exemplo, em uma área de 30 x 30 m, uma superfície que atende a Ordem Exclusiva teria 14.400 informações de profundidade. Esse quantitativo não pode ser representado, sendo necessário um método para redução desse número.

²⁵ O CUBE será melhor abordado no capítulo seguinte.

isso, a dispersão dos dados válidos, além de diminuir sua precisão, impossibilita o uso na Carta Náutica, pois pode vir a deixar um canal de acesso a um porto mais raso do que desejável.

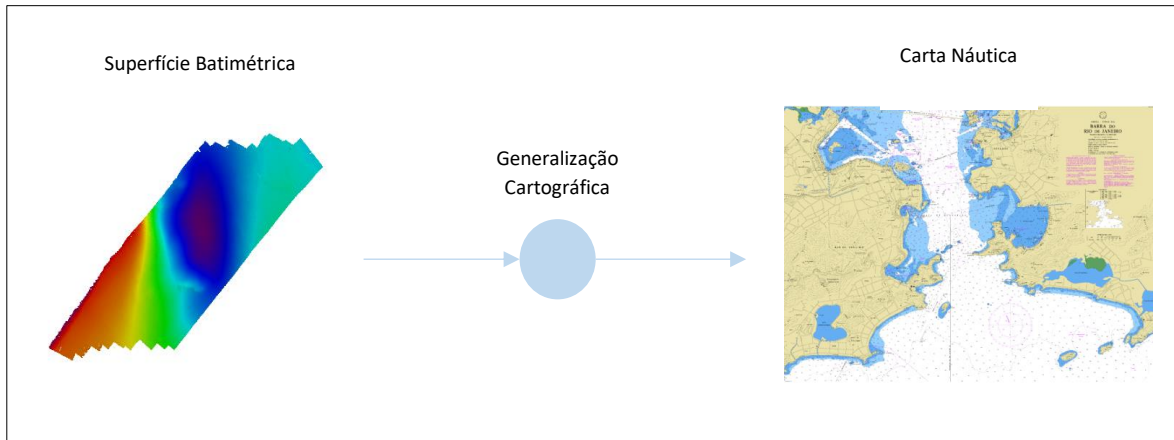


Figura 9 – Fluxo de dados de parte da produção cartográfica.

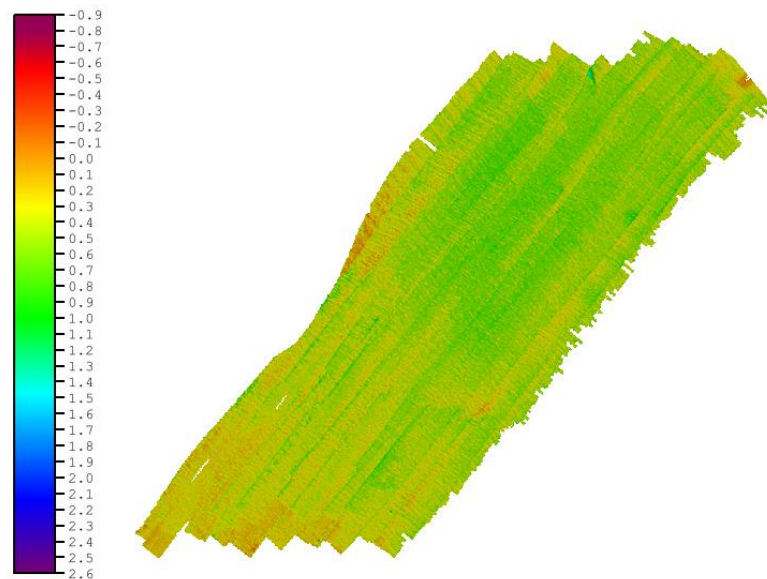


Figura 10 – Comparação entre as sondagens mais rasas oriundas do PDBS e do MBES (área 2). Para esse cálculo, foi utilizado a diferença entre as camadas SHOAL de uma superfície CUBE. Observa-se que a diferença, principalmente na parte norte, é aproximadamente 1 metro. Fonte: (PIMENTEL, 2018).

2.4. IMPACTOS DA ATUALIZAÇÃO CARTOGRÁFICA NO SERVIÇO HIDROGRÁFICO BRASILEIRO

Os serviços hidrográficos de todo o mundo, mormente os que analisam LH e produzem cartas náuticas, devem lidar com grande quantidade de dados (SKOPELITI et al., 2020). A DHN analisa LH de todo o país para verificar se os dados são relevantes para atualização cartográfica. Uma vez avaliado que os dados batimétricos trazem informações importantes para o aumento da segurança do navegante, o LH é analisado à luz dos requisitos técnicos (MAIA; FLORENTINO; PIMENTEL, 2017).

Importante ressaltar que um levantamento pode vir a alterar mais de uma carta da mesma área, dependendo da escala da carta afetada (Figura 11). Uma mesma área pode ser representada em cartas Oceânicas (1:3.500.000 a 1:10.000.000), Gerais (1:1.000.000), Costeiras (1:300.000), de Aproximação (1:75.000 a 1:100.000), de Porto e de Atracação (estas duas últimas com escala de até 1:30.000)²⁶ ((DHN), 2016).

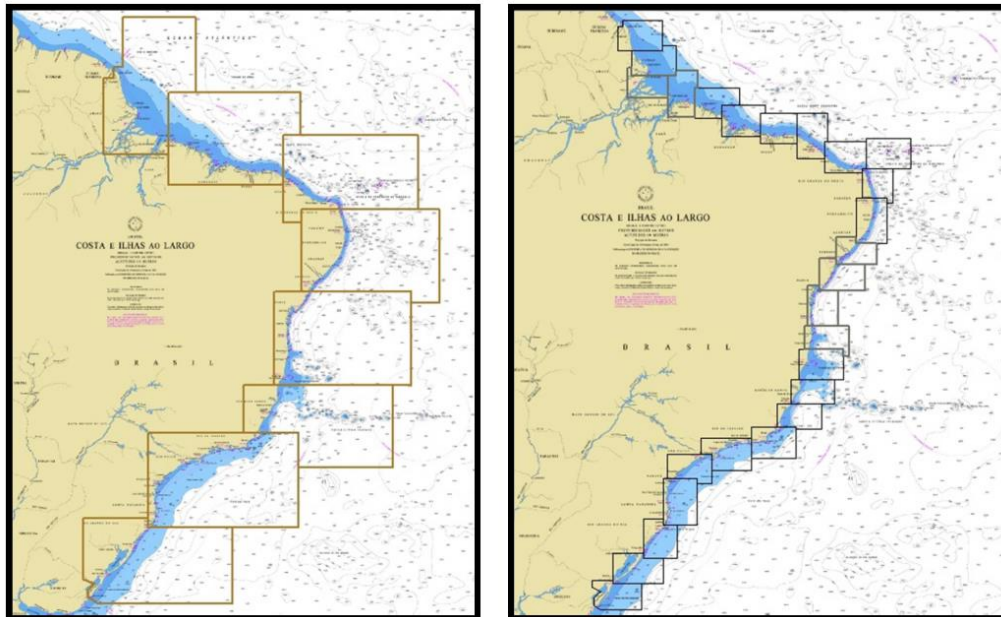


Figura 11 – Exemplo da costa do Brasil sendo representada por cartas náuticas de diferentes escalas. No primeiro quadro tem-se o esquema de ENC Gerais e no segundo para Costeiras. Fonte: ((DHN), 2016).

²⁶ O III Plano Cartográfico Náutico Brasileiro tem classificações diferentes para Cartas Náuticas em formato papel e vetorial, contudo as classes de carta seriam essas citadas. É muito comum encontrar, na literatura em inglês, a classificação: *harbour, berthing, approach, coastal, general* e *overview*.

O que muda na aplicação de cada superfície batimétrica a um produto é a escala da carta, pois uma feição pode ser representativa ou não. Um exemplo pode ser visto na Figura 12, em que uma feição rochosa é representada nas escalas 1:15.000 e 1:75.000 de diferentes formas.

A generalização cartográfica é realizada com certo automatismo, mas ainda exige muito do profissional, pois é um trabalho complexo, longo, suscetível a erros e de difícil padronização (COVE; CAVANAGH; LARRIVÉE, 2020b).

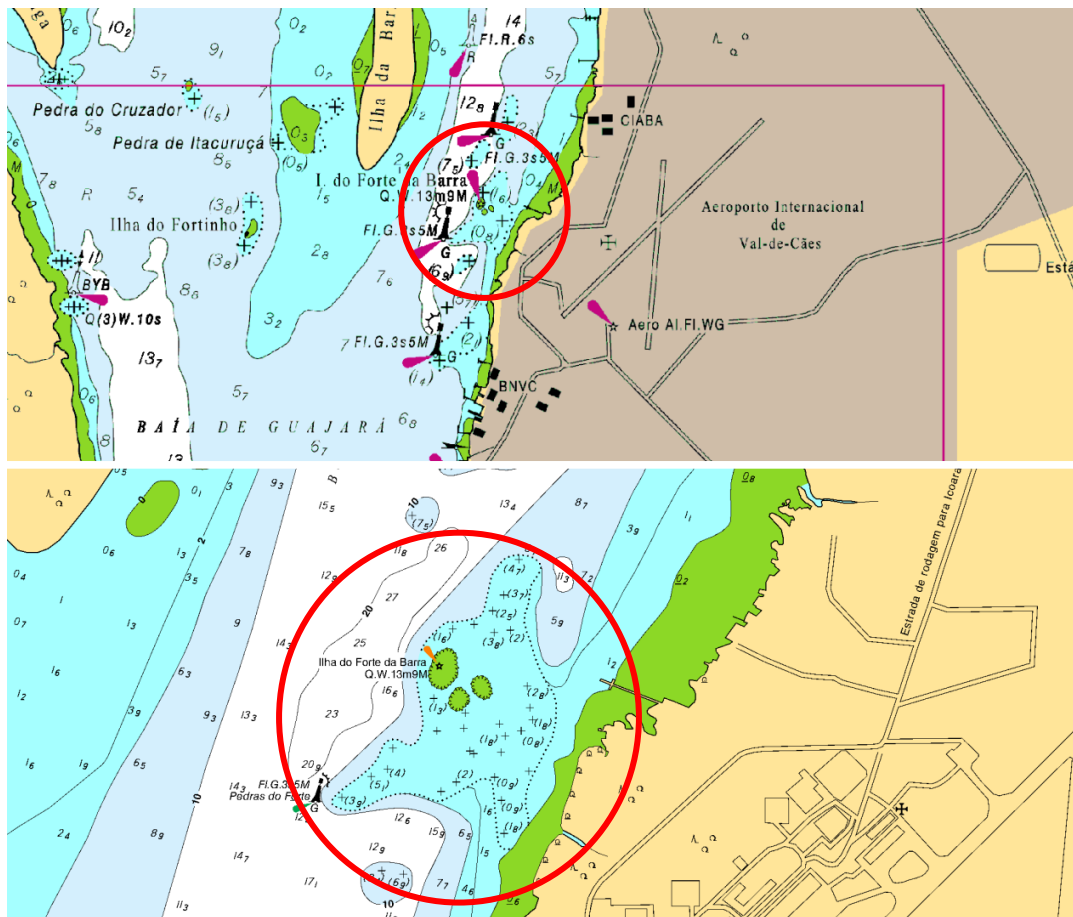


Figura 12 – Feições rochosas representada de formas diferentes, dependendo da escala. Os extratos das cartas acima são do Porto de Belém. Na CN 304 (em cima), de menor escala, observa-se menos detalhamento, já na CN 320 (em baixo), de maior escala, pode-se visualizar mais detalhamento. Tal diferença mostra como uma mesma feição, em uma mesma área, pode variar em seu desenho, sendo cada produto o trabalho de um analista.

Observa-se como o impacto de um LH relevante para a segurança da navegação é grande na linha de produção cartográfica. Em contrapartida, entidades envolvidas no ramo portuário buscam formas cada vez mais eficientes para comprovar que suas águas mantêm as características de segurança, mesmo com assoreamento e dragagem periódicas. Um levantamento com dados batimétricos em maior quantidade, mais dispersos e realizado de forma mais expedita (o que se espera do PDBS) traz desafios para os serviços hidrográficos, tanto na área de análise, quanto na produção cartográfica. Exige treinamento de pessoal, investimento em tecnologias, *softwares* e ferramental para contemplar soluções para as possíveis adversidades intrínsecas a toda evolução de tecnologia.

2.5. NOVAS TECNOLOGIAS DE PROSPECÇÃO DE DADOS PARA A CONSTRUÇÃO DA CARTA NÁUTICA

Em um contexto mundial, os oceanos cobrem aproximadamente 71% da superfície do planeta (MAYER et al., 2018), sendo que apenas 20% é mapeado com tecnologias de alta resolução (NIPPON FOUNDATION, 2017) e menos de 9% com cobertura total do solo marinho. O restante da área é estimada mediante medições de satélite, por meio de altimetria²⁷, com resolução de aproximadamente 8 km (MAYER et al., 2018). Devido ao pouco conhecimento que se tem do solo submerso, foi criada a iniciativa internacional, por meio do *Seabed 2030 Project*²⁸, (Nippon Foundation em conjunto com a GEBCO) para que os oceanos estejam mapeados com melhor resolução até 2030. Tal intento seria realizado por meio de *crowdsourcing bathymetry*²⁹ e de um planejamento de aquisição de dados dos serviços hidrográficos, fundações e agências multinacionais (NIPPON FOUNDATION, 2021).

O efeito benéfico será sentido na área de pesquisa, de planejamento estratégico e econômico (MAYER et al., 2018), entretanto a questão que surge é qual a relevância para a Carta Náutica,

²⁷ A batimetria derivada da altimetria é calculada em relação à estimativa do satélite do campo gravitacional da Terra. Importante não confundir com batimetria derivada de satélite, que é baseada em imagens satelitais.

²⁸ Por ser um assunto complexo e extenso, este trabalho não focará no Projeto *Seabed 2030*, sendo apenas usado para dar compreensão da magnitude do desafio que é o mapeamento dos oceanos, principalmente em suas áreas mais profundas, e de como a comunidade internacional está se mobilizando para resolvê-lo. Para maior entendimento, ver a bibliografia de referência usada.

²⁹ *Crowdsourcing bathymetry* é um compêndio de dados de profundidades de navios, adquiridos com instrumentos de navegação, enquanto estes meios estão em operação. Os dados podem ser usados para completar superfícies batimétricas criadas pelos serviços hidrográficos, indústrias e pesquisadores (NIPPON FOUNDATION, 2021b).

uma vez que essa carência de dados se localiza nas áreas mais distantes das regiões costeiras, sendo, conseqüentemente, em áreas mais profundas? Como afetaria a segurança da navegação?

Um quesito importante para ser levado em consideração é a confiança do navegante na carta náutica em representar as áreas mais rasas do relevo marinho. Assim, os dados que serão utilizados em documentos náuticos são avaliados e classificados em ZOC (*zone of confidence*). As incertezas e características de um LH não só interferem em seus metadados e estabelecem sua ordem de acurácia (Exclusiva, Especial, 1a, 1b e 2), mas também influenciam nos documentos náuticos subsequentes, afetando o ZOC. Sua classificação indica a acurácia mínima de posição, profundidade e cobertura do solo marinho. Seria uma classificação análoga a Ordem de Levantamento da S-44, mas aplicada a carta náutica³⁰ ((IHO), 2020). O ZOC se divide em A1, A2, B, C, D e U, onde de A1 a D tem-se um decréscimo na acurácia e na cobertura do solo e U significa dado não avaliado (*Unassessed*)³¹ (Tabela 3)³². Essa classificação visa dar segurança ao navegante e pode ser mostrada na carta por meio do diagrama de levantamentos (*source diagram* - ((IHO), 2021) ou como um atributo de objeto que indica a qualidade de dados batimétricos em uma ENC³³.

Independente do ZOC, o diagrama de levantamentos mostra a característica e os anos dos LH que deram origem a carta náutica (Figura 13). Assim, a confiança na carta náutica está intrinsecamente ligada aos LH que a deram origem. A prioridade da carta é a segurança da navegação, mas ter um produto confiável é um objetivo basilar dos serviços hidrográficos.

Tabela 3 - Parâmetros de ZOC e categorias de LH. Fonte: Adaptado de ((IHO), 2020, 2021).

ZOC	Acurácia da posição (m)	Acurácia da profundidade (m)	Cobertura do fundo	Ordem de LH	Acurácia da posição (m)	Acurácia da profundidade ³⁴ (m)	Cobertura do fundo
A1	± 5	0,5 + 1%p ³⁵	Todas as feições	Exclusiva	1	a = 0,15 b = 0,0075	Deteção de feições

³⁰ Para acesso aos parâmetros completos de LH, ver Tabela 1 da publicação S-44 da OHI ((IHO), 2021).

³¹ Para acesso aos parâmetros completos do ZOC, ver campo B-297.9 da publicação S-4 da OHI ((IHO), 2021).

³² A despeito do que possa parecer, categorias de LH não têm uma relação biunívoca com o ZOC. A diagramação da tabela foi concebida apenas para facilitar a comparação e compreensão. A ordem do LH é obtida em função da incerteza propagada e seu resultado é levado em consideração para estabelecimento do ZOC.

³³ Para a carta náutica em formato papel, não é obrigatório que o ZOC seja mostrado no diagrama de levantamentos. Já na ENC, ele é um atributo (CATZOC) ((IHO), 2000b) e contribui para um objeto (M_QUAL) ((IHO), 2000c), podendo ser visualizado no ECDIS.

³⁴ É calculada pela fórmula: $\sqrt{a^2 + (b \times p)^2}$

³⁵ Profundidade.

			significativas foram detectadas				cúbicas maiores que 0,5 m
A2	± 20	1 + 2%p	Todas as feições significativas foram detectadas	Especial	2	a = 0,25 b = 0,0075	Detecção de feições cúbicas maiores que 1 m
B	± 50	1 + 2%p	Feições não cartografadas que oferecem perigo à navegação não são esperadas, mas podem existir	1a	5 + 5%p	a = 0,5 b = 0,013	Detecção de feições cúbicas maiores que 2 m em profundidades até 40 m; 10%p para profundidades maiores que 40 m
C	± 500	2 + 5%p	Anomalias na profundidade podem ocorrer	1b	5 + 5%p	a = 0,5 b = 0,013	Não especificado
D	Pior que ZOC C	Pior que ZOC C	Grandes anomalias na profundidade podem ocorrer	2	20 + 10%p	a = 1 b = 0,023	Não especificado

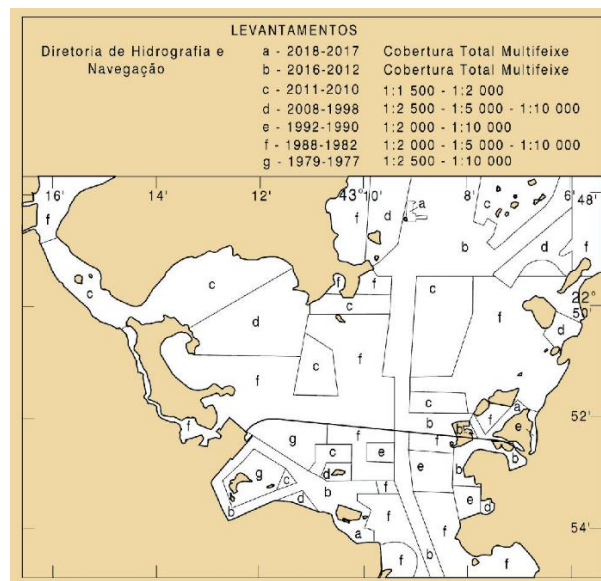


Figura 13 – Diagrama de Levantamentos da Carta Náutica 1512 – Porto do Rio de Janeiro, onde são mostrados a área, o ano e a qualidade dos LH que deram origem ao documento.

Um exemplo prático pode ser visto na Figura 14, onde um levantamento com ecobatímetro multifeixe encontrou uma profundidade de 52 metros em uma área onde estava cartografada aproximadamente 500 metros. Pela profundidade encontrada, não existe risco à navegação, mas provoca grande insegurança ao navegante constatar que o ecobatímetro de segurança está indicando profundidades 10 vezes menor da constante na carta náutica de referência. Essas situações são passíveis de acontecer em áreas cujo conhecimento batimétrico venha de informações derivadas de altimetria (satélites). No contexto brasileiro (Figura 15), tal efeito é propício de ocorrer nas áreas oceânicas e zonas de fratura, Cadeias Oceânicas, e na Antártica.

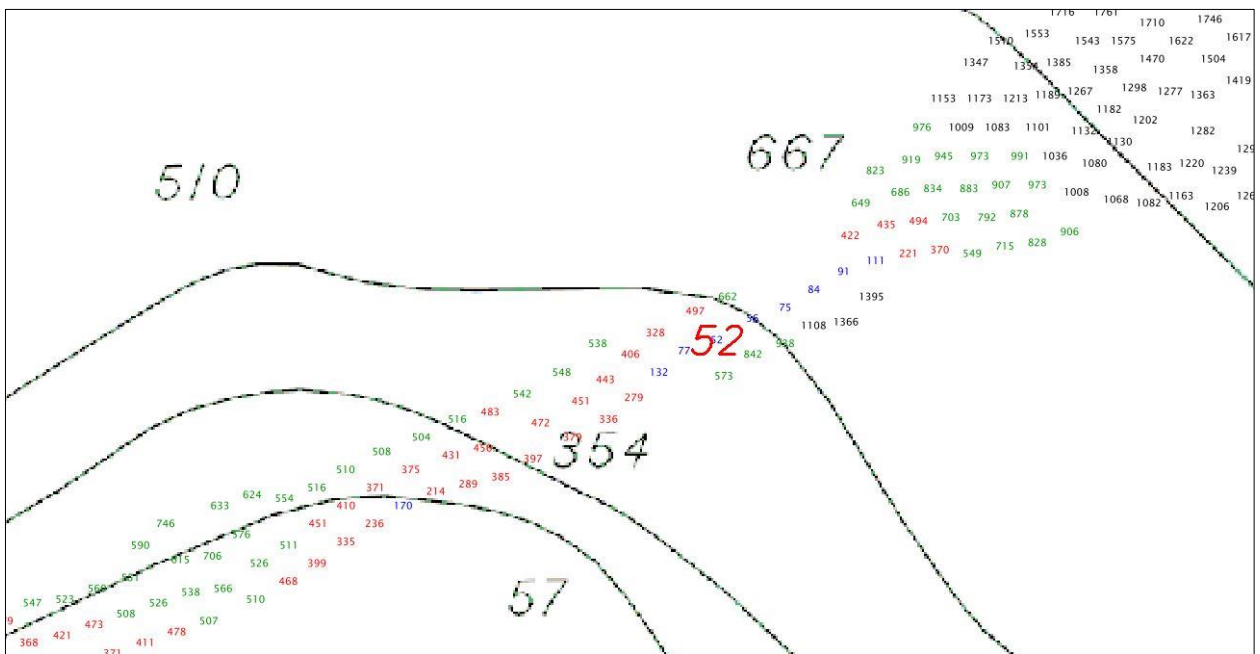


Figura 14 – Carta 22000, com sondagens de um levantamento multifeixe sobrepostas. Sobre a carta, está a seleção de sondagens com as cores separadas de acordo com as isobatimétricas. Em vermelho destacado, a menor profundidade de 52 metros encontrada.

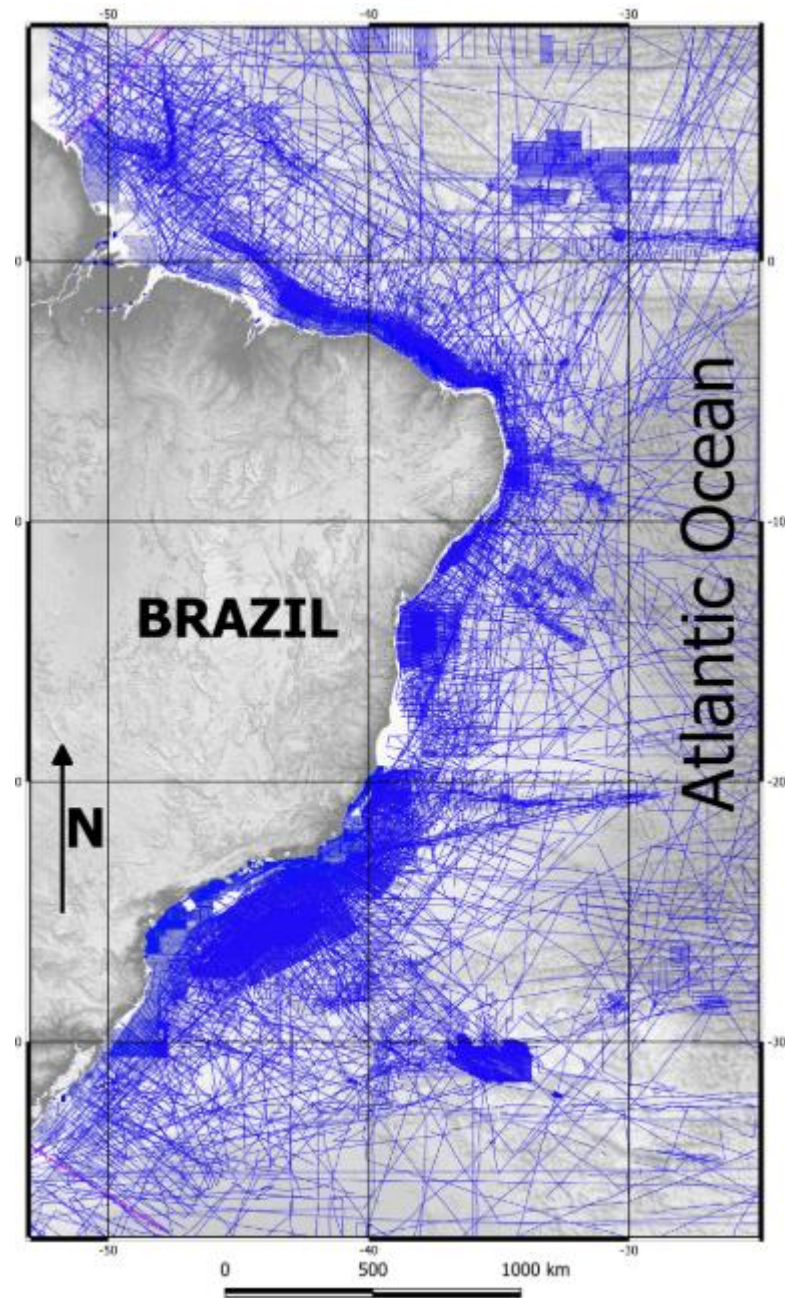


Figura 15 – As linhas azuis indicam os dados acústicos que foram utilizados na confecção da superfície LEPLAC. O restante da área foi completado com informações derivadas de altimetria do SRTM30_Plus. Fonte: (ALBERONI et al., 2019).

Iniciativas como o *Seabed 2030* demandam formas eficientes de levantamentos batimétricos. Assim, independentemente da área e das profundidades, faz-se mister buscar dados cada vez mais acurados. Em termos de tecnologias e equipamentos, pode-se destacar o LIDAR e a batimetria derivada de satélite para regiões muito próximas da costa e de difícil acesso ao

navegante, onde a claridade da água propicie uma boa penetração dos pulsos eletromagnéticos. No espectro acústico, espera-se o contínuo desenvolvimento do ecobatímetro multifeixe, aumentando sua eficiência em coleta de dados e cobertura do fundo marinho. Por sua vez, ecobatímetros menos potentes podem ser instalados em *gliders* e boias, para prospecção de dados durante a deriva.

No escopo desta Tese, como visto em Pimentel (2018), a eficiência do PDBS aumenta consideravelmente quando sondando mais próximo ao fundo marinho. Dessa forma, o *sidescan sonar* interferométrico pode ser usado em frotas de AUV (*autonomous underwater vehicle*), ROV (*remotely operated vehicle*) ou USV (*unmanned surface vehicle*)³⁶ (quando em águas rasas), sendo operado constantemente por equipes em terra, com supervisão mínima (MAYER et al., 2018), principalmente em áreas mais remotas, dando ensejo para largo uso do PDBS na produção cartográfica como um todo.

³⁶ De todos os veículos, o USV ainda é o menos testado para produção de documentos náuticos, justamente pelo fato de operar sem supervisão e controle na aquisição e por serem menores, portanto, menos estáveis e sujeitos a maiores influências de *roll*, *pitch*, *yaw* e *heave*. Soma-se ainda o problema de uma embarcação autônoma operar na superfície, em meio a diversas embarcações tripuladas. Estudos têm sido realizados para mitigar os problemas. Para maior conhecimento, ver Schmidt (2020).

3. EMBASAMENTO TEÓRICO

O objetivo último deste trabalho é criar uma metodologia que permita a aplicação dos dados batimétricos oriundos do PDBS na carta náutica. O principal entrave é a dispersão vertical dos dados, que tem como consequência os seguintes aspectos:

1. O desvio padrão médio do nó³⁷ oscila, em todas as áreas, aproximadamente 0,2 metros, redundando em uma degradação da avaliação da precisão e impossibilitando a classificação dos dados nas ordens mais restritas, segundo os critérios normativos da OHI (S-44); e
2. Em decorrência do item supracitado, em testes realizados com os dados, quando se estima a superfície mais rasa para a generalização cartográfica e aplicação dos dados na carta náutica (camada *Shoal*), observa-se que eles são consideravelmente mais rasos do que os dados da mesma área adquiridos com o MBES (Tabela 1) (PIMENTEL, 2018; PIMENTEL; FLORENTINO; NETO, 2020). Tal fato, quando aplicado aos documentos náuticos, vem a diminuir a profundidade.

A dispersão vertical³⁸ mais acentuada dos dados se deve à tecnologia de estimativa de profundidade do PDBS, sendo uma característica intrínseca ao equipamento. Para sua utilização nas cartas náuticas, são necessárias algumas mudanças de métodos e perspectivas, de forma a adaptar o uso de ferramentas já existentes. Para compreender este esforço, seguem considerações e premissas que foram utilizadas para o estabelecimento da metodologia:

3.1. DEFINIÇÕES E PREMISSAS

3.1.1. Tratamento dos dados batimétricos oriundos dos PDBS

O tema central de toda esta discussão é onde se pode atuar para que os dados batimétricos oriundos do PDBS estejam aptos para serem aplicados na cartografia náutica. Primeiramente, deve-se ter uma perspectiva de como é o fluxo dos dados, desde sua prospecção até sua aplicação prática. Por meio da Figura 16, é possível mapear as etapas do processo e analisar onde é possível e viável fazer uma intervenção.

³⁷ O desvio padrão médio do nó é a grandeza estatística calculada por meio de todas as informações de profundidades dos *pings* considerados válidos durante a fase de aquisição e processamento.

³⁸ Dispersão vertical é o espalhamento no eixo z dos *pings* considerados válidos. Pode ser calculada por meio da diferença entre as camadas *Deep* e *Shoal* de cada superfície.

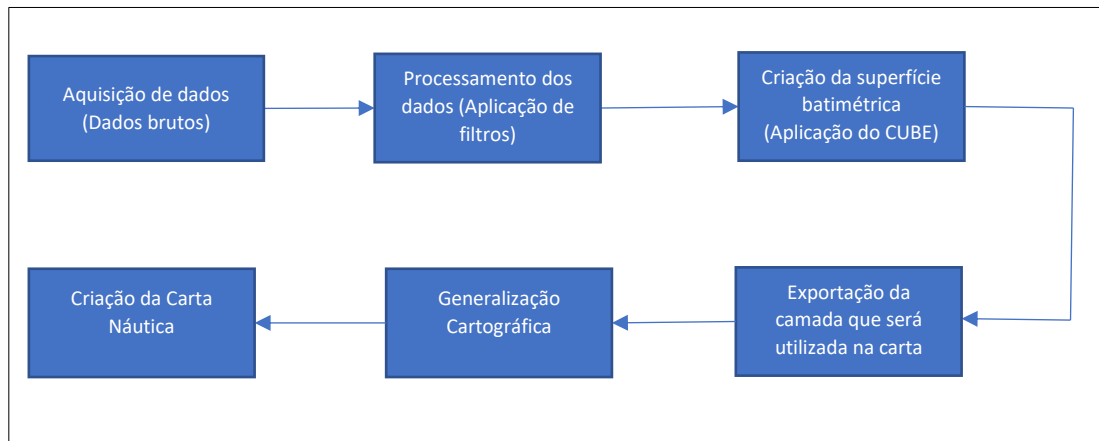


Figura 16 – Fluxo dos dados batimétricos, desde sua aquisição até a aplicação na carta náutica.

Na parte de aquisição dos dados, onde ocorre a quantificação inicial da batimetria (dados brutos), ter-se-ia que alterar o algoritmo de detecção de fundo. Tal intento se reveste de grande logística computacional, além de ter que lidar com as limitações do funcionamento do PDBS³⁹, num esforço que dificilmente seria recompensado com resultados promissores. Caso fosse uma alternativa viável, os próprios produtores de equipamentos e *softwares* já tê-la-iam realizado. Pensando numa relação de custo-benefício, abordar este passo teria baixa prioridade.

O processamento dos dados, no caso do PDBS, é realizado com aplicação de filtros sequenciais de intensidade do sinal, estatísticos e de distâncias. Servem para retirar dados espúrios causados pela coluna d'água, ruídos, pequenos alvos acima do leito marinho e soluções batimétricas que destoam da estimativa do relevo⁴⁰. O filtro de amplitude (intensidade do sinal) estabelece parâmetros dentro dos quais a intensidade do sinal será aceita (Figura 17). Qualquer batimetria advinda de um sinal com amplitude fora do intervalo estabelecido será desconsiderada. O próximo filtro é o de limite, onde se designa uma janela de profundidades estimada do fundo

³⁹ A forma como o PDBS estima o fundo foi amplamente abordada no APÊNDICE A. Porém, o que cabe analisar aqui é a forma como o equipamento estima os dados brutos, baseada apenas na diferenciação de fase do sinal de retorno, por meio de múltiplos transdutores de recepção. Tal tecnologia gera uma grande quantidade de dados com intensidade muito similares, que estando sujeitos a vários erros, dificultam a criação de um parâmetro que possa ser utilizado para refinamento da detecção do fundo.

⁴⁰ Um dos princípios que rege o delineamento do fundo marinho é a continuidade do relevo. Assim, qualquer solução batimétrica que apresente grande descontinuidade, sem qualquer conexão aparente com o relevo, tende a ser descartada.

(Figura 18). De forma análoga, qualquer batimetria fora desta janela não entra no cômputo final. Em sequência, há dois filtros estatísticos, que é uma forma de amaciamento dos dados. O primeiro é o *across track filter*, sendo estabelecido um intervalo batimétrico que se move conforme novos *pings* são adquiridos. Este intervalo oscila em torno de uma média ponderada que vai se modificando com a chegada de varreduras sequenciais (Figura 19). O último filtro estatístico é o *along track filter*. Diferente do anterior, que usa *swaths* sequenciais de forma recursiva, este faz uma média dos *pings*, em um mesmo *swath*, dentro de pequenas células de tamanho pré-estabelecidos. Importante definir que o sentido da célula também é outro. Enquanto que a célula do primeiro filtro está disposta no eixo z, a desse filtro é disposta no eixo x (*along track*) (Figura 20) (KONGSBERG MARITIME, 2014). Um exemplo dos dados com os filtros já aplicados pode ser visto na Figura 21, por meio do *software* CARIS HIPS&SIPS.

Alterar o processamento de dados é alterar os parâmetros dos filtros. A tentativa de diminuir a dispersão vertical teria que ser pelos filtros estatísticos. Quanto mais restritivos eles forem, maior a probabilidade de desconsiderar feições conspícuas ou alterações abruptas do relevo marinho. Tal providência levaria a menor dispersão dos dados, gerando um perfil com melhor aparência, contudo comprometeria a acurácia e a robustez estatística dos dados (que serão utilizadas depois para o cálculo do CUBE) (KONGSBERG MARITIME, 2014).

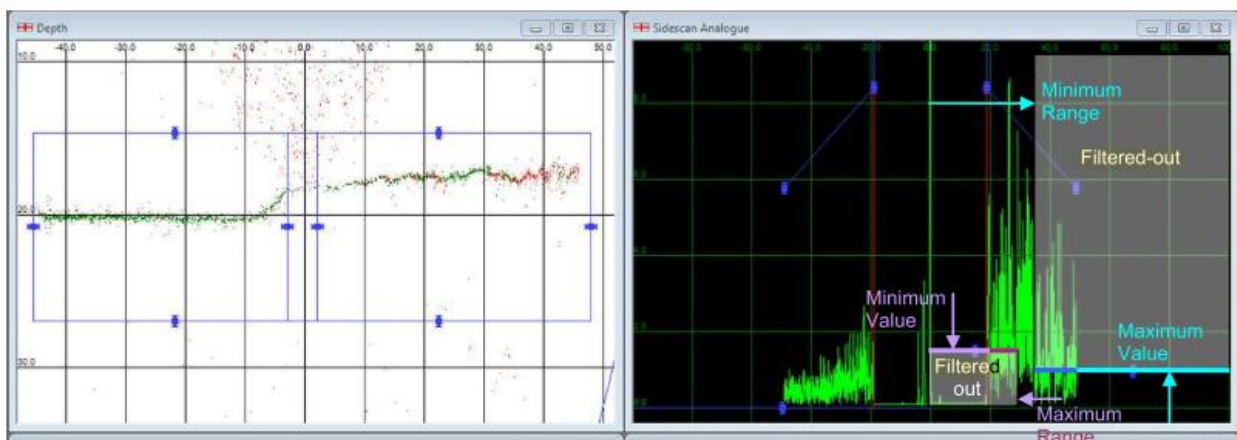


Figura 17 – Aplicação do filtro de amplitude. O primeiro quadro mostra o filtro sendo aplicado nos dados. O segundo, o histograma de intensidade do sinal do swath com os parâmetros definidos nos feixes de boreste. O intervalo entre o “Minimum Value” e o “Maximum Value” são os valores de amplitude do sinal considerados válidos. Fonte: (KONGSBERG MARITIME, 2014).

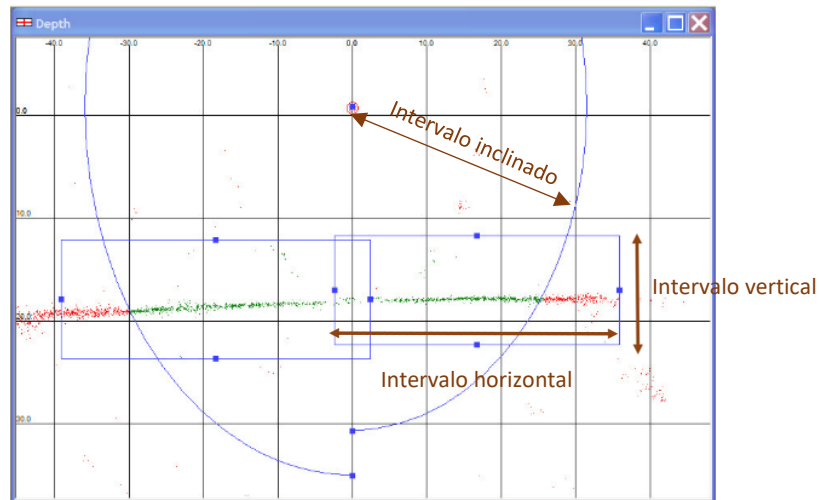


Figura 18 – Aplicação do filtro de limite, onde se estabelece o intervalo horizontal, vertical e inclinado (slant range) dos dados considerados válidos. Fonte: Adaptado de (KONGSBERG MARITIME, 2014).

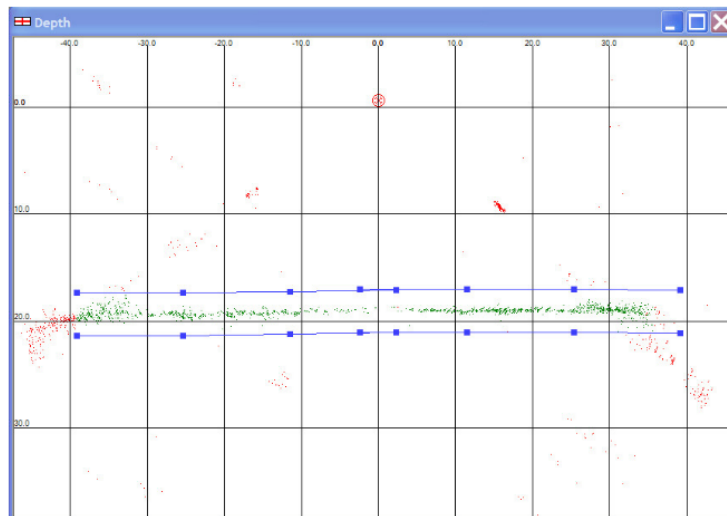


Figura 19 – Aplicação do across track filter. O intervalo é delimitado pelas linhas azuis. Elas vão se movimentando para cima e para baixo conforme os novos pings de varreduras sequenciais vão trazendo informações batimétricas novas⁴¹. Fonte: (KONGSBERG MARITIME, 2014).

⁴¹ Para exemplificar, nesse gráfico foi estabelecido um intervalo de 2 metros (linhas azuis) em torno de uma média ponderada, cujo peso é definido pelo operador. Num exemplo prático, digamos que um ping seja 5 metros. O próximo é 6 metros (se o ping chegar com um valor fora do limite de 2 metros, ele não entra no cálculo da média). Considerando uma média com peso de 50%, o valor em torno do qual o filtro vai oscilar é 5,5 metros. Assim, todos os pings com valores batimétricos acima de 7,5 ou abaixo de 3,5 metros são desconsiderados.

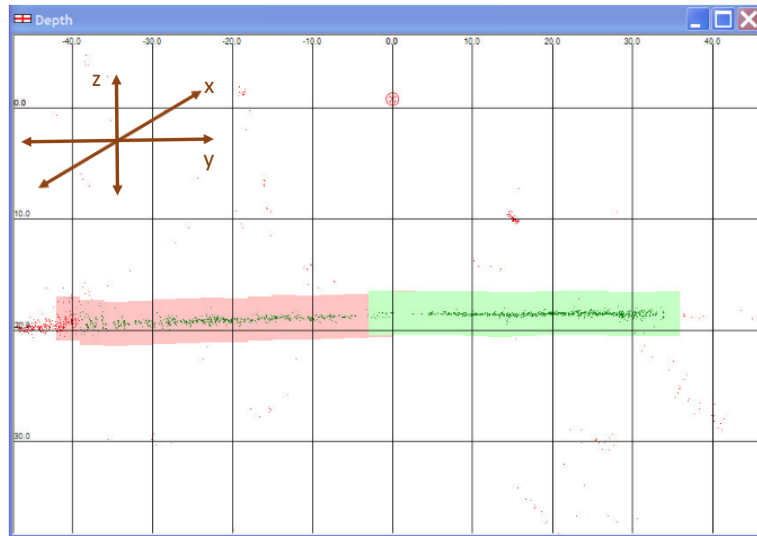


Figura 20 – Aplicação do filtro estatístico. As células têm suas dimensões definidas no eixo y e x , em torno da média dos pings de um swath. Qualquer ping que tenha seu valor fora do intervalo estabelecido para as células, será desconsiderado. Fonte: Adaptado de (KONGSBERG MARITIME, 2014).

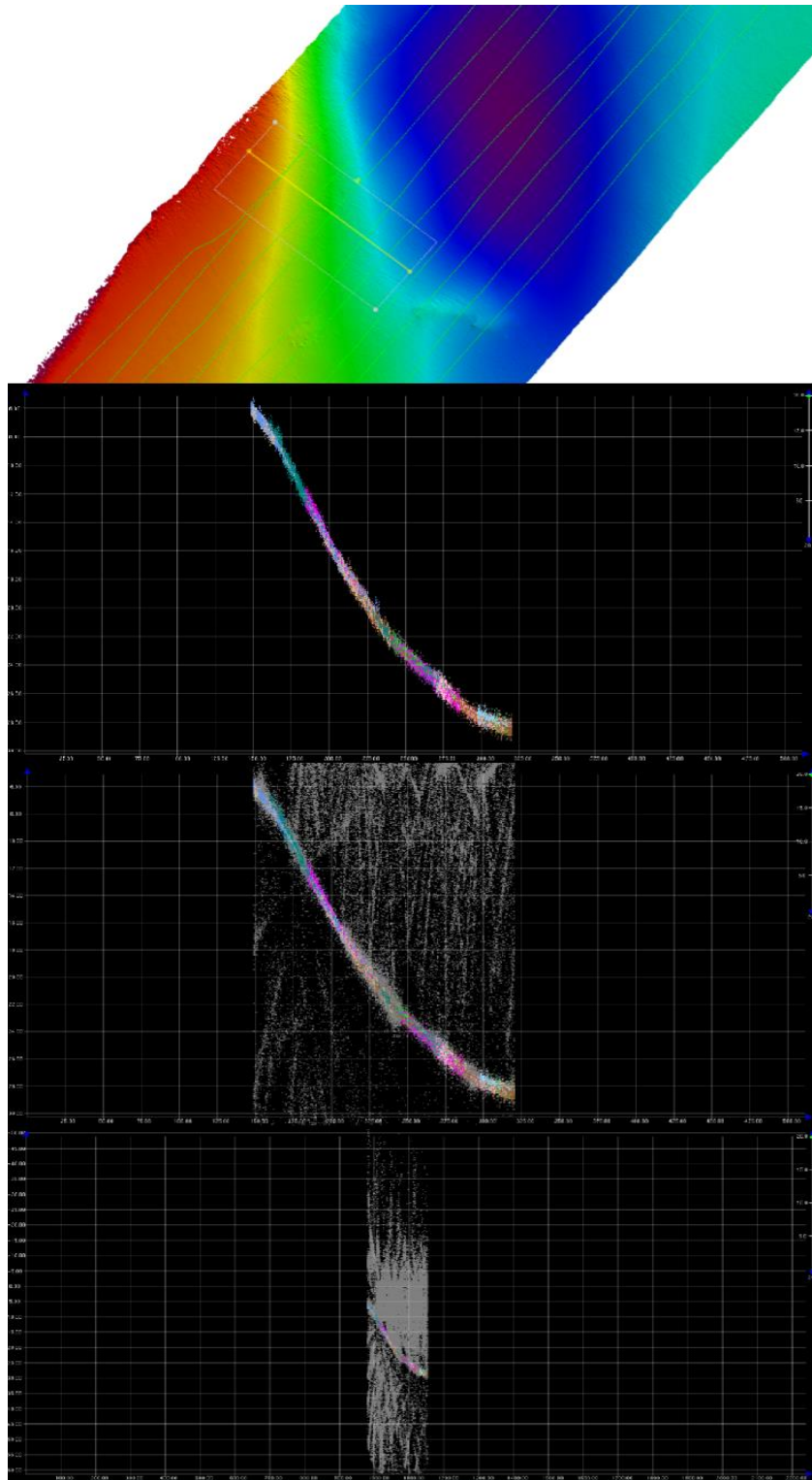


Figura 21 – Trecho visualizado com a ferramenta Subset Editor do CARIS HIPS&SIPS. O primeiro quadro mostra a superfície batimétrica em que os dados foram analisados (Área 2). O segundo mostra os dados processados. O terceiro mostra a mesma visualização com os dados descartados (cinza). No quarto quadro é retirado zoom para percepção da magnitude da filtragem.
Fonte: (PIMENTEL, 2018).

A próxima etapa é a criação de uma superfície batimétrica. Em Pimentel (2018), foi abordado a vantagem da superfície CUBE. Seus parâmetros serão melhor analisados no tópico seguinte. O que se pode alterar na criação de uma superfície CUBE são índices que causariam amaciamento dos dados (CRESPO, 2017), redundando no mesmo risco descrito no parágrafo anterior. De qualquer forma, poder-se-ia melhorar a estimativa do fundo, mas não diminuiria a dispersão vertical dos dados. A partir deste passo, não se pode mais modificar a superfície. Esta será uma constante e a alternativa é criar métodos para aproveitar os dados na construção cartográfica, mesmo com este óbice.

Considerando ainda o diagrama de blocos, as duas últimas fases (generalização cartográfica e criação da carta náutica) já trabalham com dados selecionados, sendo o conceito de dispersão vertical não mais aplicado. É uma noção *a priori*. A única etapa que ainda não foi explorada neste texto é a exportação da camada que será utilizada na carta. É justamente aí que será calcada a metodologia que possibilita a utilização do PDBS nos documentos náuticos.

Quando se estuda o problema da dispersão vertical dos dados batimétricos fora do limite preconizado, a primeira solução cogitada é o seu reprocessamento (voltar-se-ia a etapa dois do diagrama de blocos). Contudo, devido às limitações intrínsecas à tecnologia do PDBS, não foi vislumbrado como trabalhar nesta fase sem a adoção de soluções empíricas e arbitrárias que estariam calcadas em tentativa e erro. A solução foi lidar com a dispersão, atuando na camada que será utilizada para a atualização cartográfica.

3.1.2 Superfície CUBE

Laborar na camada que será exportada para a carta náutica é lidar com o CUBE. Em Pimentel (2018), foram explicadas suas camadas e como são criadas e escolhidas as hipóteses que representarão o fundo marítimo. Contudo, para entender a robustez estatística deste estimador e como é possível criar uma camada apta para utilização, faz-se necessário entender o algoritmo do CUBE.

Uma premissa importante, advinda da observação das superfícies manuseadas, é que **o CUBE pode estimar o fundo marinho, tanto para o MBES quanto para o PDBS, em todas as**

áreas analisadas, de forma muito semelhante. Tal afirmativa pode ser ratificada por meio da análise de acurácia da camada *Depth*, na qual a diferença média entre elas foi de 0,1 metros (Tabela 1). Em uma análise qualitativa, pode-se observar que essa diferença se distribui uniformemente ao longo de todas as áreas (Figura 22), com exemplo da área 1, mostrando a congruência entre as camadas.

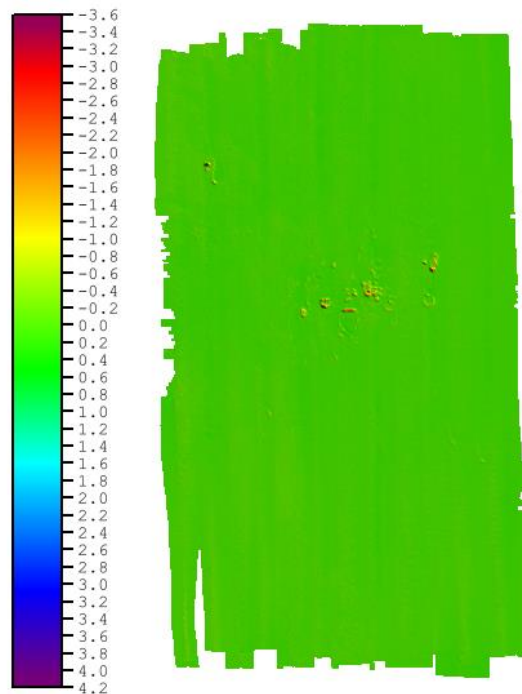


Figura 22 – Diferença entre as camadas *Depth*s das superfícies CUBE geradas a partir dos dados PDBS e MBES na área 1. Escala em metros. Fonte: Adaptado de (PIMENTEL, 2018).

Para compreensão dos valores alcançados no CUBE, faz-se mister entender as equações do seu algoritmo (CALDER; MAYER, 2003):

1. Inicialmente, os *pings* são retrabalhados, com novo cálculo de sua variância⁴² (Eq. 1):

⁴² Importante citar que no processamento de dados, cada *ping* já tem uma variância atribuída, por meio do cálculo da incerteza total propagada (*TPU – total propagated uncertainty*). Esta metodologia foi proposta por HARE (1995) e é utilizada pelo CARIS HIPS&SIPS. O CUBE usa seus resultados como *input* para a Eq. 1. Cabe ressaltar que a incerteza de cada *ping* varia em função de uma série de fatores: inclinação do ângulo de incidência do raio sonoro no solo, tamanho do *footprint*, frequência de transmissão, largura de pulso, penetração no solo, etc. Contudo, este trabalho analisará a incerteza da hipótese, que é resultante de um processo de filtragem e cálculos matemáticos. Importante destacar que durante a filtragem, os *pings* que tem uma incerteza maior do que um determinado valor são descartados

$$\begin{bmatrix} d_{ij} \\ \sigma_{ij}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_i \\ \sigma_{V,i}^2 \left(1 + \left[\frac{\delta_{ij} + S_H \sigma_{H,i}}{\Delta_{min}} \right]^\alpha \right) \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

j = número do nó;

i = número de um *ping* que contribui para o *j*-ésimo nó;

d_{ij} = profundidade em um nó, dado o *ping* que contribui para ele;

σ_{ij}^2 = variância da profundidade em um nó, dado o *ping* que contribui para ele;

ε_i = profundidade de um *ping*;

$\sigma_{V,i}^2$ = variância vertical da profundidade do *ping*;

δ_{ij} = distância entre a posição do *ping* e o centro do nó;

S_H = valor multiplicador para incerteza horizontal da distribuição normal. Aqui foi utilizado 1,96 (95%);

$\sigma_{H,i}$ = incerteza horizontal da profundidade de um *ping*;

α = expoente utilizado. Aqui foi 2; e

Δ_{min} = resolução da superfície.

Pela equação 1, pode-se verificar que a profundidade será a mesma do *ping* processado e a variância será tanto maior quanto maior forem as variâncias horizontal e vertical e sua distância em relação ao centro do nó.

2. Cálculo da profundidade do nó.

2.1. Primeiro, é atribuído um peso a cada *ping* (Eq. 2):

$$G_j[n] = \frac{\hat{\sigma}_j^2(n|n-1)}{\hat{\sigma}_j^2(n|n-1) + \sigma_j^2(n)} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

$G_j[n]$ = é o peso do *j*-ésimo nó para o *n*-ésimo *ping* considerado;

$\hat{\sigma}_j^2(n|n-1)$ = variância do nó antes da inserção do *n*-ésimo *ping*; e

$\sigma_j^2(n)$ = variância do *n*-ésimo *ping*.

pelo algoritmo do CUBE. Dessa forma, analisar a fonte de incerteza de cada *ping* acaba não tendo um valor prático na abordagem pretendida nesta Tese. Para maior compreensão deste processo, ver Pimentel (2018).

2.2. Em seqüência, é calculada o resíduo entre a profundidade já estabelecida no nó e a do *ping* (Eq. 3):

$$\epsilon_j[n] = d_j(n) - \hat{z}_j(n|n-1) \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

$\epsilon_j[n]$ = resíduo entre a profundidade do *enésimo ping* e a profundidade do nó;

$d_j(n)$ = profundidade do *enésimo ping*; e

$\hat{z}_j(n|n-1)$ = profundidade do nó antes da inserção do *enésimo ping*.

2.3. Por fim, é atualizada a profundidade (Eq. 4) e a variância do nó (Eq. 5), baseado no resíduo e no peso calculado.

$$\hat{z}_j(n|n) = \hat{z}_j(n|n-1) + G_j[n]\epsilon_j[n] \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

$\hat{z}_j(n|n)$ = profundidade atualizada do nó.

$$\hat{\sigma}_j^2(n|n) = G_j[n]\sigma_j^2(n) \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

$\hat{\sigma}_j^2(n|n)$ = variância atualizada do nó.

Caso a $d_j(n)$ seja verticalmente distante $4 \times \hat{\sigma}_j^2(n|n-1)$ (eixo z) da $\hat{z}_j(n|n-1)$, é criada outra hipótese (CALDER; MAYER, 2003) e assim o nó fica com duas hipóteses possíveis, que serão atualizadas conforme os *pings* forem sendo contabilizados. A escolha da hipótese é feita por um processo chamado resolução de ambiguidades, com critério de densidade e localidade ou uma combinação de ambos.⁴³ (CARIS, 2014).

Este trabalho não se deterá nas equações de resolução de ambiguidades, uma vez que o objetivo da explanação do cálculo das hipóteses é entender como o CUBE estima suas

⁴³ Apesar de vários trabalhos de referências explicarem como funciona a resolução de ambiguidades no CUBE, para entender como este trabalho o fez, ver Pimentel (2018).

profundidades e incertezas, quesitos essenciais para o entendimento do método. Após cada *ping* ser correlacionado a uma variância, o primeiro ganha um peso que é inversamente proporcional ao valor do segundo. Este peso serve como parâmetro para atualização do valor da hipótese. Para exemplificar, caso a hipótese tenha profundidade de 5 m e variância de 0,1 m² e seja computado um *ping* com 5,2 m e variância de 0,05 m², pode-se calcular o peso como 0,67, as novas profundidade e variância como 5,134 m e 0,067 m² respectivamente.

Assim, percebe-se que as profundidades e variâncias de uma superfície CUBE são produtos estatísticos, resultantes de um cálculo e de um filtro baseado em variâncias e diferença de profundidade dos *pings*. A grande correlação (diferença de 0,1 m) entre as estimativas de fundo marinho com os dados adquiridos com o MBES e o PDBS é uma amostra de como esse algoritmo é capaz de estimar, de forma bem semelhante, os resultados da combinação dos *pings*, mesmo que os dados do segundo sejam mais numerosos e apresentem uma dispersão vertical mais acentuada. É a partir da hipótese escolhida como representativa do relevo submerso e da sua variância que será proposto um método de determinação da superfície a ser exportada para a carta náutica.

3.1.3 Determinação da camada

Quando se refere a representação de profundidades na carta náutica, “o principal princípio é a seleção de sondagem baseada em um padrão com tendência para o mais raso.” ((IHO), 2021) (tradução livre⁴⁴). Para atingir esses objetivos, a DHN utiliza, como base para a exportação para a produção cartográfica, a camada *Shoal* da superfície CUBE (caso este tenha sido o algoritmo escolhido). Para melhor compreensão, as camadas da superfície CUBE importantes neste trabalho seguem abaixo descritas (CARIS, 2014). Elas são geradas automaticamente pelo *software* CARIS HIPS&SIPS:

- *Density* – representa a quantidade de *pings* que contribuíram para a hipótese escolhida.
- *Depth* – representa a profundidade calculada (hipótese selecionada).
- *Node Standard Deviation* – contém o desvio padrão ($1,96 \times \sigma$) de todas as profundidades que foram aceitas durante o processamento.
- *Shoal* – as profundidades mais rasas de um nó.

⁴⁴ Original em inglês: “The main principle is the selection of soundings based on a ‘shoal biased’ pattern”.

- *Standard Deviation* – contém o desvio padrão ($1,96 \times \sigma$) das profundidades que contribuíram para a hipótese escolhida.
- *Uncertainty* – representa a incerteza da hipótese escolhida.
- *Hypotesis count* – quantidade de hipóteses existente em cada nó.

É comum, em dados que apresentam pequena dispersão vertical, como os do MBES, cada nó apresentar apenas uma hipótese. Já com dados mais dispersos, como no PDBS, os nós apresentam mais de uma hipótese. Para melhor entendimento do raciocínio subjacente, observar Figura 23. Ela representa um nó de uma superfície CUBE. O da esquerda é do MBES e, como seus dados são mais coesos, só existiu uma hipótese calculada (verde). O da direita é do PDBS e, como seus dados são mais dispersos, foram calculadas três hipóteses (a escolhida e os *pings* que contribuíram para ela estão em verde e as outras, bem como seus *pings*, estão em vermelho). No MBES a camada *Shoal* coincide com o ponto mais raso da hipótese. Já no PDBS, essa coincidência não existe. O dado mais raso da hipótese não está sendo representado em nenhuma superfície.

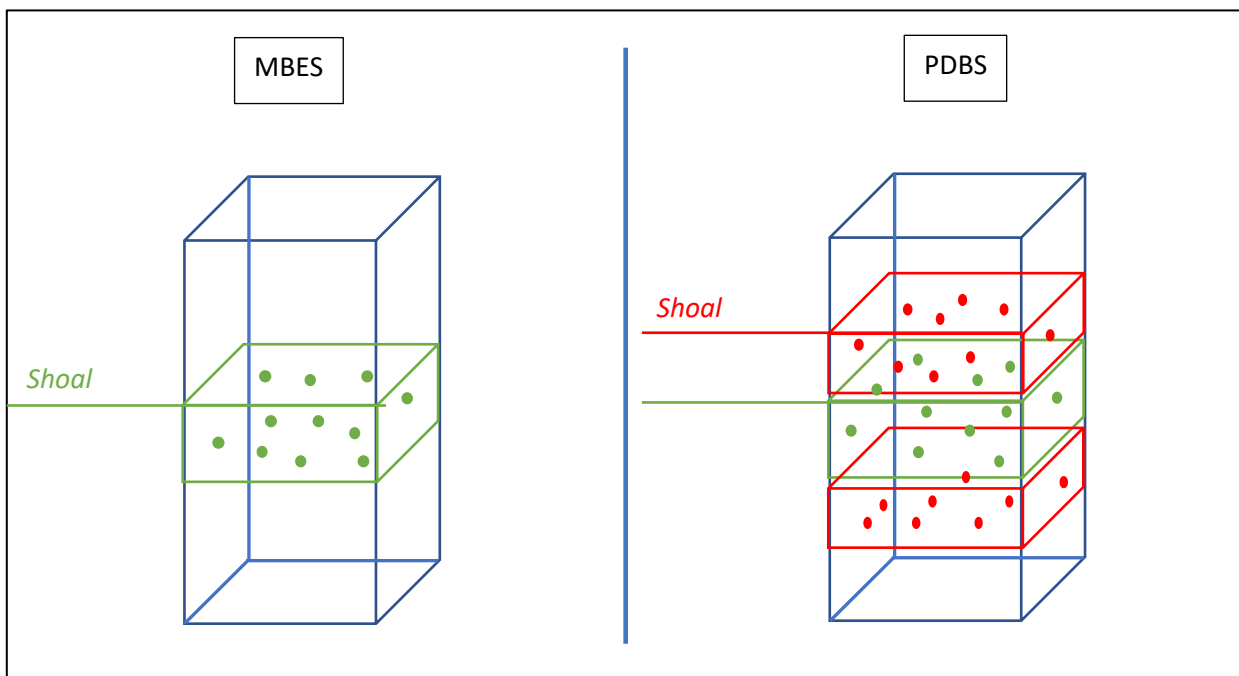


Figura 23 – Desenho esquemático do nó de uma superfície CUBE

Pode-se inferir que o trabalho do algoritmo do CUBE, em ambos os casos, serviu para estimativa correta da hipótese e, conseqüentemente, para a do fundo marinho (camada *Depth*). Contudo, no PDBS, a camada *Shoal* corresponde aos dados mais rasos considerados válidos na etapa do processamento. Ao escolhê-la, desconsidera-se a estimativa da hipótese do CUBE. A indagação que surge naturalmente é: se a hipótese do PDBS foi calculada semelhante à do MBES, não haveria um meio de utilizá-la?

Ao observar os dados (ver-se-á os dados mais detalhadamente no capítulo 4), percebe-se que os desvios padrão das hipóteses MBES e PDBS (camada *Standard Deviation*) são semelhantes. Tal fato, aliado à congruência das camadas *Depths*, permite elucubrar o seguinte procedimento:

1. Por meio de métodos estatísticos, pode-se calcular a camada representativa dos *pings* mais rasos em uma hipótese.
2. Validar, através da superfície MBES, a camada calculada com a *Shoal* ($Camada\ calculada_{MBES} - Shoal_{MBES} \rightarrow 0$).
3. De forma análoga, deve-se encontrar a superfície representativa dos *pings* mais rasos da hipótese aceita no PDBS.
4. Validar novamente, através da superfície MBES, a camada calculada com a *Shoal* ($Camada\ calculada_{PDBS} - Shoal_{MBES} \rightarrow 0$). Assim, pode-se comprovar a eficácia do método.
5. Exportar a camada calculada na superfície CUBE do PDBS para a carta náutica, pois ela é congruente com a *Shoal* do MBES.

Toda essa metodologia proposta depende do cálculo da superfície representativa dos *pings* mais rasos que contribuíram para as hipóteses, que será chamado de *Shoal_{HP}*. Considerando o espalhamento dos *pings* como Distribuição Normal, sabe-se que a média subtraída do valor do desvio padrão multiplicado por 1,96 fornece um valor no qual 97,5% dos *pings*, ao se considerar uma hipótese unilateral, estarão mais profundos (Figura 24). Assim, cria-se o conceito que o $Shoal_{HP} = Depth - Standard\ Deviation^{45}$, o que precisa ser validado, tanto no caso do MBES como no caso do PDBS.

⁴⁵ No cálculo automático da camada *Standard Deviation* pelo CUBE, os valores do desvio padrão já estão multiplicados por 1,96.

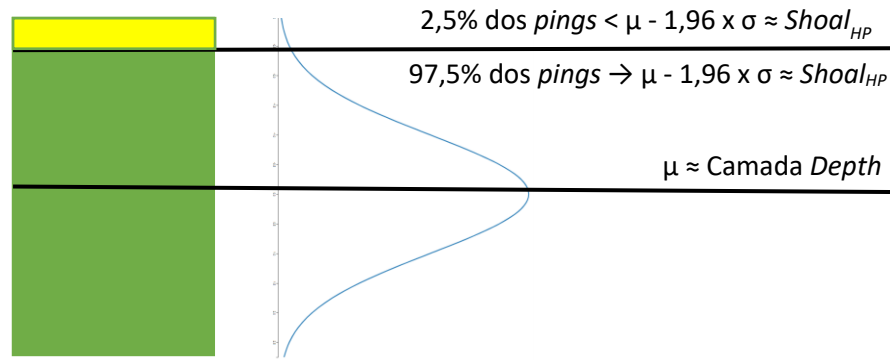


Figura 24 – Hipótese em verde, considerando a distribuição dos pings como Normal. Em amarelo, a área que ficaria fora da solução apresentada.

Contudo, faz-se necessário mostrar que uma célula tem a distribuição dos *pings* normalizada no eixo *z*. Pelo arcabouço teórico, pode-se utilizar o Teorema do Limite Central. Nele, é preconizado que toda amostra aleatória, quando suficientemente grande ($n > 30$), tende a uma distribuição normal em torno da média, independente da distribuição da população. Preconiza ainda que toda amostra de uma distribuição normal, independentemente do tamanho, também seguirá o mesmo padrão (STEVENSON, 2001).

Com relação aos dados batimétricos coletados, existem 3 tipos de erros que podem ocorrer em sua medição: os grosseiros, sistemáticos e aleatórios. O primeiro é devido a um erro do operador ou a um mal funcionamento de algum equipamento utilizado na coleta; o segundo a algum offset que não foi devidamente mapeado, causando uma tendência permanente nos dados; e o terceiro por são erros intrínsecos que não conseguem ser mapeados e retirados da amostra. O ruído, de uma forma geral, faz parte desse conjunto. Assim, um equipamento bem calibrado e um operador bem treinado já é capaz de se não anular, diminuir substancialmente os erros grosseiros e sistemáticos. Restariam apenas os erros aleatórios ((IHO, 2010), mostrando que a medição de profundidade em si é uma atividade de captação de dados aleatórios cuja média é a estimativa do fundo marinho e os ruídos se distribuem aleatoriamente em torno dela (SINTE; LLORT-PUJOL; GUÉRIOT, 2010).

Outro fator digno de nota é a quantidade de *pings* por célula. Em média, cada célula tem aproximadamente entre 100 e 500 sondagens contribuintes⁴⁶ que foram consideradas válidas, dependendo da superposição. Ao aplicar o Teorema do Limite Central, é possível verificar que se reúnem duas condições: a amostra é aleatória e $n > 30$, garantindo uma distribuição normal. Ao se processar os dados e criar a superfície com o CUBE, as sondagens que compõem a hipótese escolhida forma uma amostra de dados que tinha uma distribuição normal e por conseguinte mantém essa distribuição.

Embora a teoria estatística suporte a premissa de uma distribuição normal, este trabalho optou por analisar os dados processados de uma célula da área dois e verificar como eles se distribuíam. Foram analisadas 252 sondagens ($n = 252$), que variavam entre 38,192 m e 39,433 m. Para atestar a normalidade da distribuição, foram usados dois métodos gráficos (histograma e *qq-plot*) e um método numérico de teste de hipótese (Shapiro-Wilk)⁴⁷. O histograma apresentou a forma de uma distribuição normal (Figura 25), bem como o gráfico *qq-plot* (Figura 26) apresentou os dados sendo distribuídos ao longo de uma reta, o que configura a normalidade da distribuição. Por fim, o teste de Shapiro-Wilk, considerado um dos testes mais robustos para verificação de normalidade de uma amostra, apresentou um resultado positivo (Tabela 4).

Dessa forma, tanto lastrado na teoria estatística, quanto na análise dos dados propriamente ditos, mostra-se que a distribuição de profundidades dentro de uma hipótese segue o padrão de uma distribuição normal.

⁴⁶ Adota-se o termo contribuintes pelo fato de que nem toda a sondagem que contribui para a hipótese de um nó se localiza geograficamente naquela célula. *Pings* de células vizinhas também contribuem, desde que a incerteza vertical propagada não seja maior do que o limite especificado pelo CUBE.

⁴⁷ Os gráficos e o teste de hipóteses foram feitos no programa Excel 365, por meio do Plug-in *Real Statistics*.

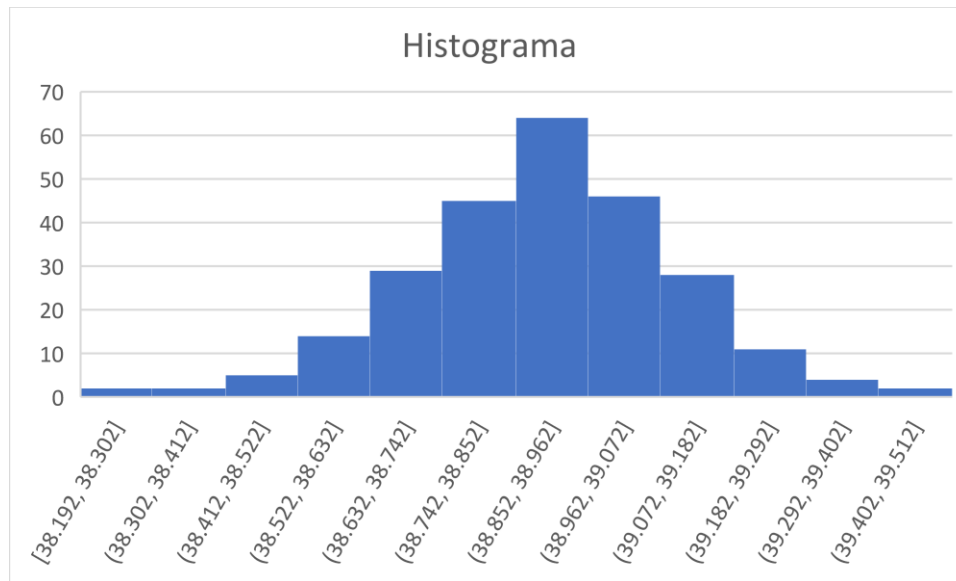


Figura 25 - Histograma

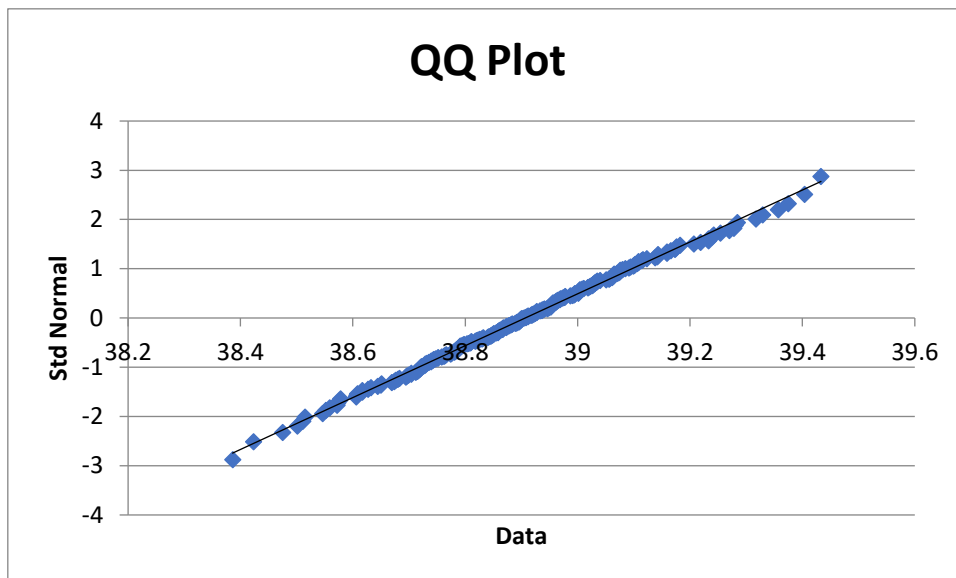


Figura 26 – Gráfico QQ Plot

Tabela 4 – Valores resultantes do Teste Shapiro-Wilk

Shapiro-Wilk Test	
W-stat	0.997235
p-value	0.946713

alpha	0.05
normal	yes

Uma vez tendo definido estatisticamente a superfície de interesse, pode-se estabelecer as operações matemáticas e validações a serem realizadas, em forma de diagrama de blocos sequenciais (Figura 27).

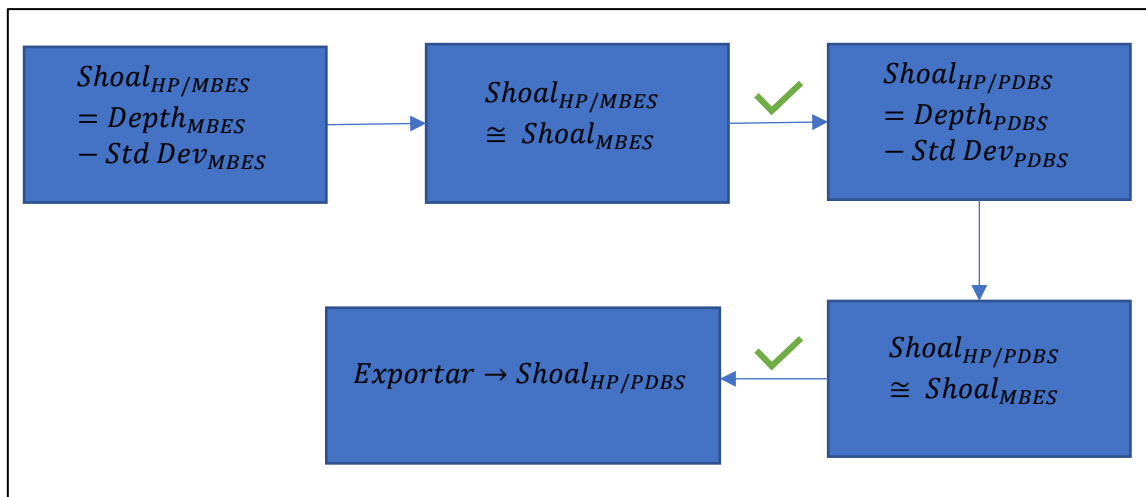


Figura 27 – Diagrama de blocos com a metodologia proposta. A camada Standard Deviation está representada por “Std Dev”. O símbolo em verde indica o resultado positivo para a validação, feita por meio da comparação entre superfícies.

Este recurso estatístico permite que seja exportada a camada representativa dos dados mais rasos da hipótese, sendo utilizado em superfícies nas quais o CUBE determinou mais de uma hipótese como possível. A metodologia pretende permitir a utilização de superfícies que tiveram origem a partir de dados verticalmente dispersos, possibilitando a utilização do PDBS na atualização cartográfica.

3.2. METODOLOGIA

O raciocínio e as equações mostradas no item anterior compõem a metodologia de tratamento de superfície. Dessa forma, é possível exportar uma camada, a partir do resultado do algoritmo do CUBE. A principal premissa que deu ensejo ao arcabouço delineado foi: **no que pese**

a dispersão dos dados, a camada *Shoal_{HP/PDBS}*⁴⁸ pode ser exportada para a carta náutica, ao invés da camada *Shoal*, em aproveitamento do resultado do CUBE.

Os dados deste trabalho se compõem de 5 áreas, onde foram realizadas sondagens com o ecobatímetro multifeixe e o sonar de varredura lateral interferométrico. Nelas, as superfícies MBES serão utilizadas para validação da camada *Shoal_{HP/PDBS}*. O que se pretende demonstrar é que a carta náutica pode ser atualizada com esta camada, ao invés da *Shoal_{PDBS}*, que é o procedimento atualmente adotado. Uma vez que foi estabelecido o arcabouço teórico, falta a aplicação nos dados.

O objetivo do próximo capítulo é aplicar a metodologia nos dados batimétricos utilizados no Curso de Mestrado e, de forma empírica, validar a sistemática descrita acima e mostrar que ela pode ser aplicada em dados verticalmente dispersos, mormente nos oriundos do PDBS, independentemente de qualquer dado para comparação.

⁴⁸ No texto só foi explicado o que significa a *Shoal_{HP}*. Quando essa camada for derivada dos dados MBES, usar-se-á a notação *Shoal_{HP/MBES}*, quando for derivada do PDBS, será *Shoal_{HP/PDBS}*.

4. RESULTADOS

Este capítulo descreverá a aplicação da metodologia, exposta no capítulo anterior, nas superfícies produzidas a partir dos dados adquiridos com o PDBS e as comparará com as do MBES. As superfícies batimétricas aqui perscrutadas foram amplamente analisadas durante a dissertação de Mestrado (PIMENTEL, 2018).

Todas as áreas passarão pelos mesmos tipos de ensaios, nos quais será verificado se a camada calculada $Shoal_{HP/PDBS}$ é capaz de servir de insumo para atualização de documentos náuticos. As ferramentas utilizadas, majoritariamente, serão diferença entre superfícies, histogramas e apreciação dos perfis, onde serão aplicados todos os passos descritos na Figura 27. A partir da análise dos resultados, buscar-se-ão conclusões que ratifiquem ou não a eficácia da metodologia.

4.1. ÁREA 1

Esta área foi utilizada para realizar um teste da capacidade de detecção de alvos submersos (rochas). Uma das premissas da teoria é que a superfície do PDBS tenha mais de uma hipótese de profundidade e a do MBES tenha apenas uma. Tal informação pode ser vista abaixo. Pela Figura 28, pode-se verificar que a quantidade de hipóteses da superfície PDBS oscila entre 3 e 8, enquanto a do MBES está uniformemente centrada no valor unitário (pequenas exceções existem e são esperadas nas bordas das rochas detectadas).

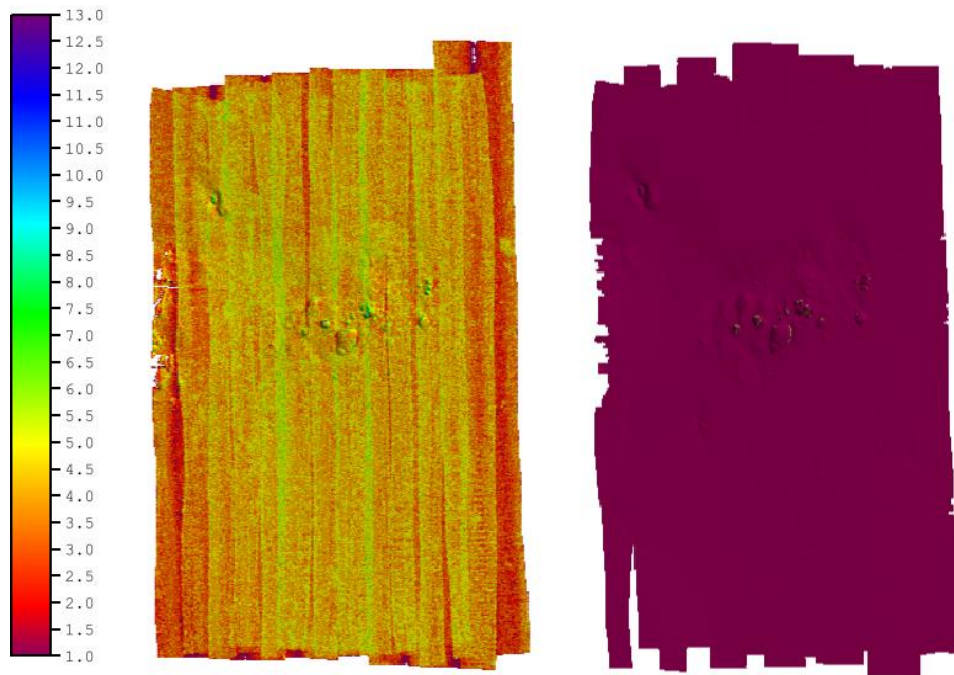


Figura 28 – Superfícies com a visualização da quantidade de hipóteses (camada *Hypothesis_Count*). A escala está em número de hipóteses. A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES.

Outra premissa é que o valor de profundidade (Figura 29), bem como seu desvio padrão (Figura 30), são estimadas de formas semelhantes para ambas as tecnologias. Na visualização do desvio padrão, percebe-se a variação em torno de 0,1 m no PDBS e entre 0 e 0,1 m no MBES, mostrando um maior valor para o interferométrico, o que, pelas equações vistas no CUBE, é esperado⁴⁹.

⁴⁹ Uma tônica que pode surgir é conjecturar se o desvio padrão não poderia representar uma tendência (*bias*) na superfície. Pelas diferenças entre camadas *Depths*, realmente se observa uma tendência para profundidades mais rasas no PDBS (média igual a 0,1 m). Contudo, o cálculo do desvio padrão em cada tecnologia é realizado por meio da incerteza amostral dos *pings* de cada sensor (PEREIRA, 2016), de forma separada, sem análises cruzada. Nesse caso, o desvio padrão, sem a média, não fornece informações sobre a existência um *bias*.

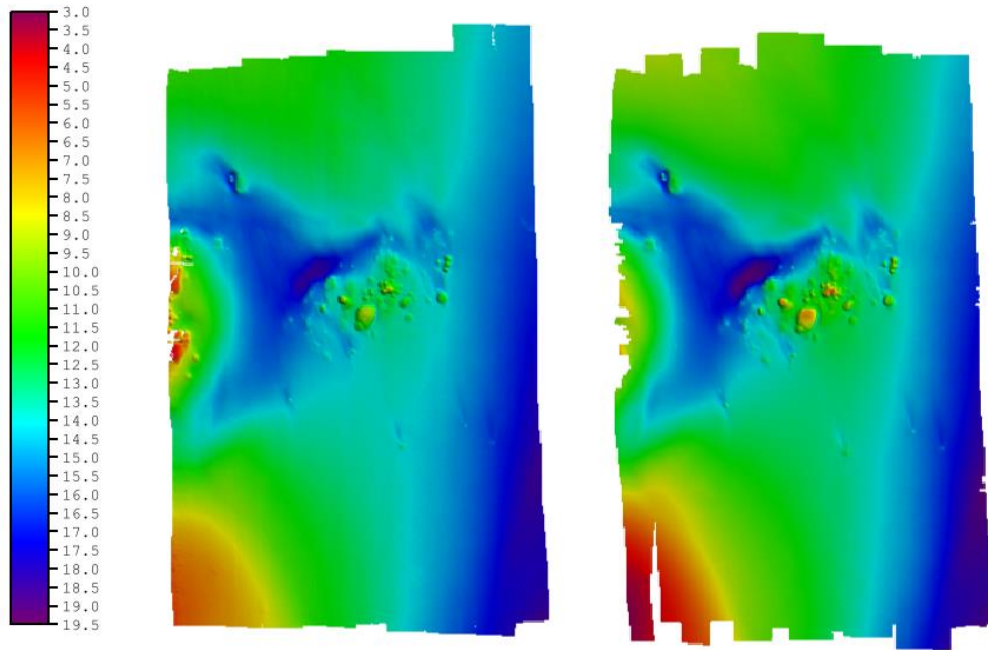


Figura 29 - Superfícies com a visualização da profundidade (camada Depth). A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES. Escala em metros.

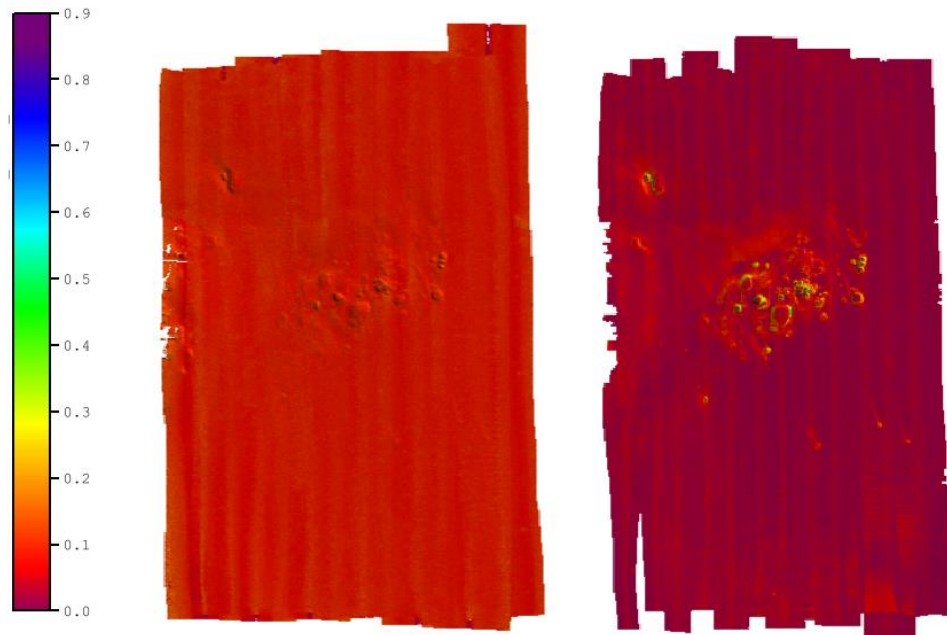


Figura 30 – Superfícies com o desvio padrão (1,96x) da profundidade da hipótese (camada Std_Dev). A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES. Escala em metros.

O próximo passo é criar a camada $Shoal_{HP/MBES}$ e compará-la com a $Shoal_{MBES}$, para verificar se são congruentes, ou seja, se os valores são semelhantes (Figura 31).

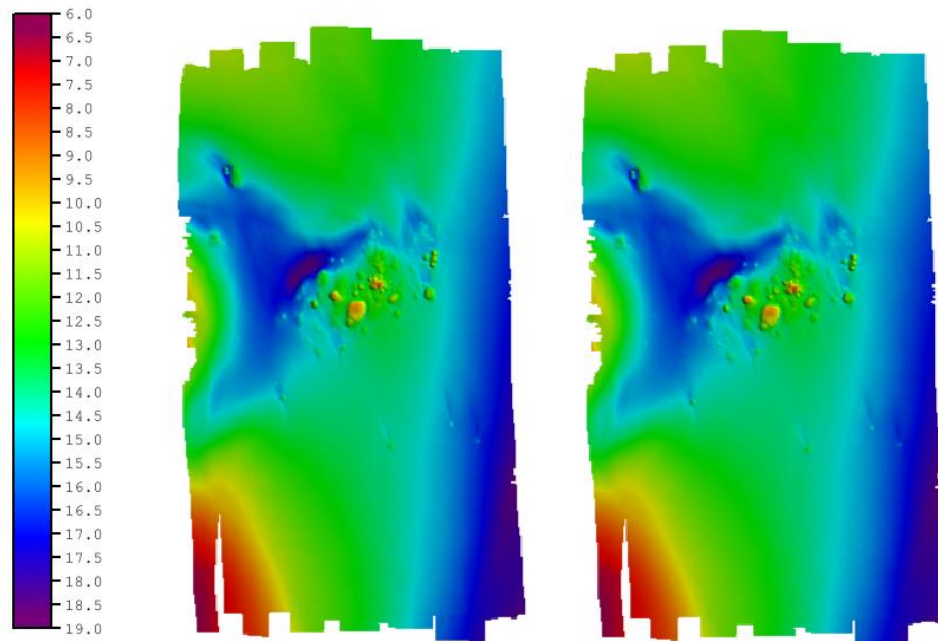


Figura 31 – Camadas da superfície MBES. A da esquerda é a camada Shoal, a da direita é Shoal_{HP}. Escala em metros.

Tem lugar, agora, a primeira validação. A Figura 32 representa uma camada calculada, na qual os valores da $Shoal$ são subtraídos dos da $Shoal_{HP/MBES}$. Presume-se que estes resultados tendam a 0 m, os quais podem ser visualizados na figura. Uma das células, escolhidas a acaso, mostra que essa diferença é 3,2 cm. Uma análise mais detalhada pode ser realizada por meio de histograma (Figura 33) e do cálculo da média de todos os valores das células, que foi 2,9 cm.

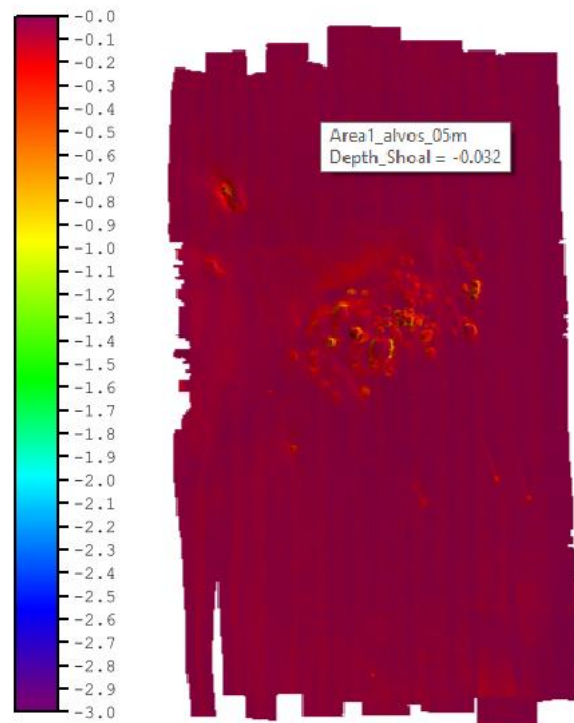


Figura 32 – Diferença entra as camadas Shoal e Shoal_{HP} da superfície MBES. Escala em metros.

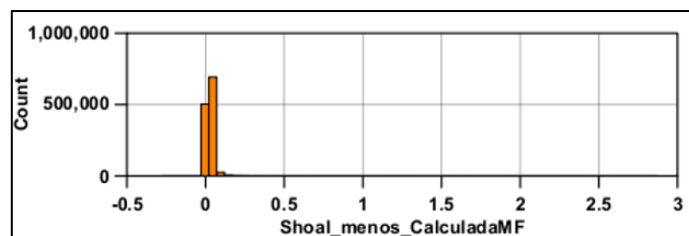


Figura 33 – Histograma da diferença entra as camadas Shoal e Shoal_{HP}. O tamanho de cada faixa de comparação é 5 cm. Escala em metros.

Uma vez averiguado que a validação teve um resultado favorável, quando aplicado no MBES, segue a próxima etapa, que é o cálculo da Shoal_{HP/PDBS}. Em comparação com a Shoal_{PDBS}, nota-se uma suavização do relevo (Figura 34)⁵⁰, devido a utilização da estimativa do CUBE como base de cálculo.

⁵⁰ Na visualização por meio de figuras, a suavização da superfície é difícil de ser percebida. Porém, ao manuseá-la em *software*, pode-se verificar melhor este efeito.

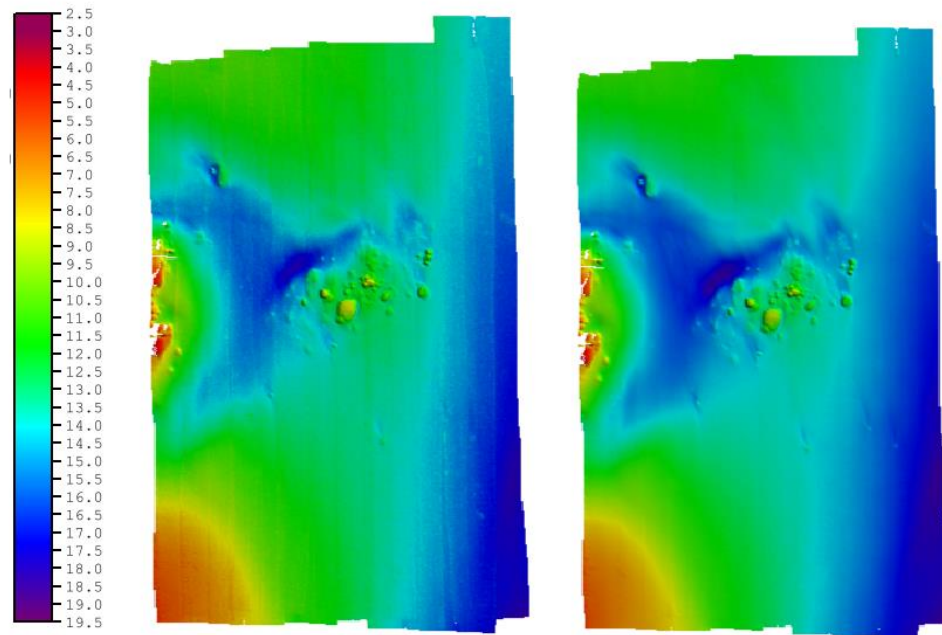


Figura 34 - Camadas da superfície PDBS. A da esquerda é a camada Shoal, a da direita é Shoal_{HP}. Escala em metros.

Procede-se a próxima verificação, a comparação entre $Shoal_{HP/PDBS}$ e $Shoal_{MBES}$. Para melhor compreensão da aplicação da metodologia, é mostrado, na Figura 35, as superfícies ($Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$) e ($Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$). Pode-se visualizar que, de maneira mais uniforme, a primeira superfície oscila no zero. De forma análoga à primeira comparação entre superfícies, as diferenças podem ser mais bem visualizadas por meio de histogramas (Figura 36) e médias das diferenças, sendo a da primeira superfície 0,1 m e a da segunda 0,6 m. No histograma da superfície ($Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$), quando comparado ao da ($Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$), observa-se que é mais delgado, apresentando maior uniformidade e que seu valor central se aproxima mais do zero.

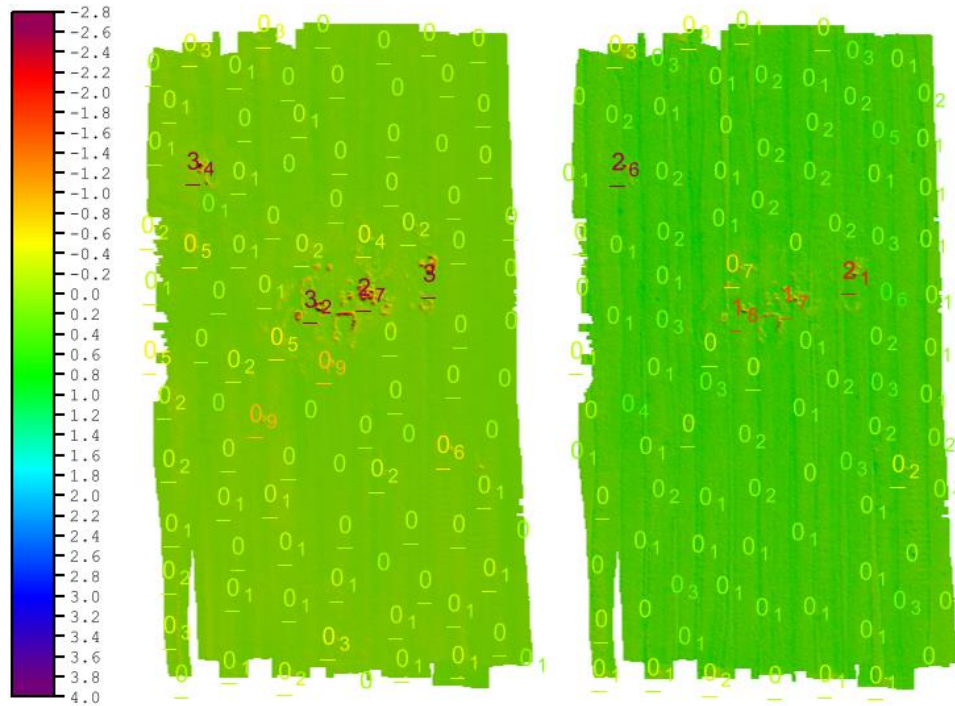


Figura 35 – Superfícies diferença. A da esquerda é Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}. A da direita é Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}. Escala em metros. Os dígitos funcionam como uma seleção de sondagens, mostrando os pontos onde as diferenças possuem maior valor.

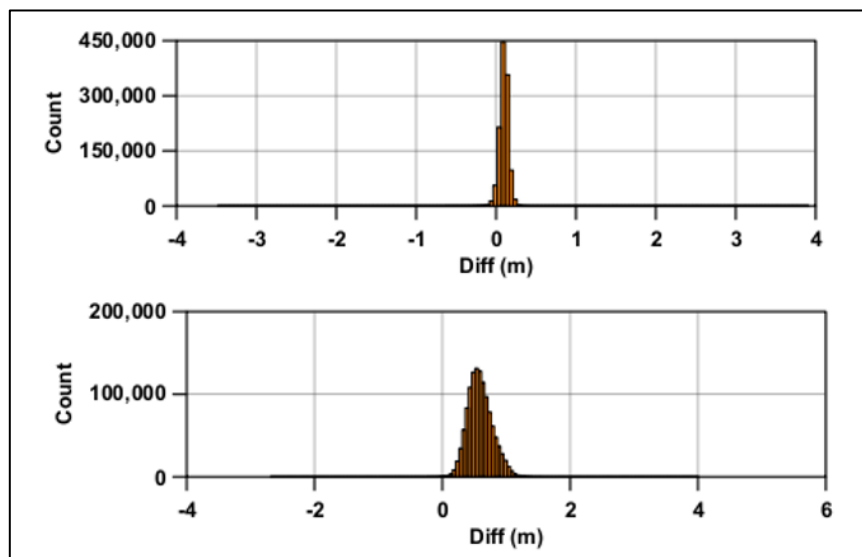


Figura 36 – Histograma dos valores das células das superfícies diferenças. A de cima é Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}. A de baixo é Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}. O tamanho de cada faixa de comparação é 5 cm. Escala em metros.

Entretanto, em outras partes da superfície sugerida pela metodologia, encontram-se valores mais discrepantes, principalmente nas feições mais conspícuas. Essa diferença é facilmente perceptível no gráfico de perfil (Figura 37 a Figura 42). No perfil 1, é mostrada a parte plana, onde a semelhança entre a superfície calculada e o *Shoal* do multifeixe é grande. Nos perfis 2 e 3 já se tem a análise das rochas⁵¹. Aqui é possível observar como as bordas⁵² dessas feições são quantificadas de maneira mais adversa do que na área plana, com os perfis apresentando comportamentos mais erráticos. A partir dessa análise, seleciona-se apenas a borda de uma das rochas para a confecção do perfil.

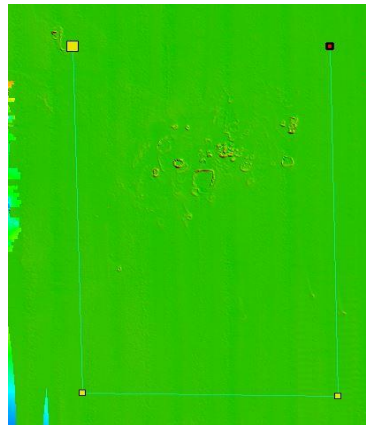


Figura 37 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 1.

⁵¹ Para visualização, foram eleitos dois perfis de áreas rochosas, com o objetivo de mostrar que a dificuldade de quantificação da borda não é exclusividade de uma determinada rocha, mas um efeito generalizado, que corre nessas feições. Para uma maior generalização, pode-se focar na superfície diferença, em que o efeito é observável em todas as rochas.

⁵² A título de parametrização, foi considerado como borda de rocha a área de transição na qual os perfis iniciam sua mudança para a área mais rasa ou mais profunda, até sua estabilização no próximo patamar.

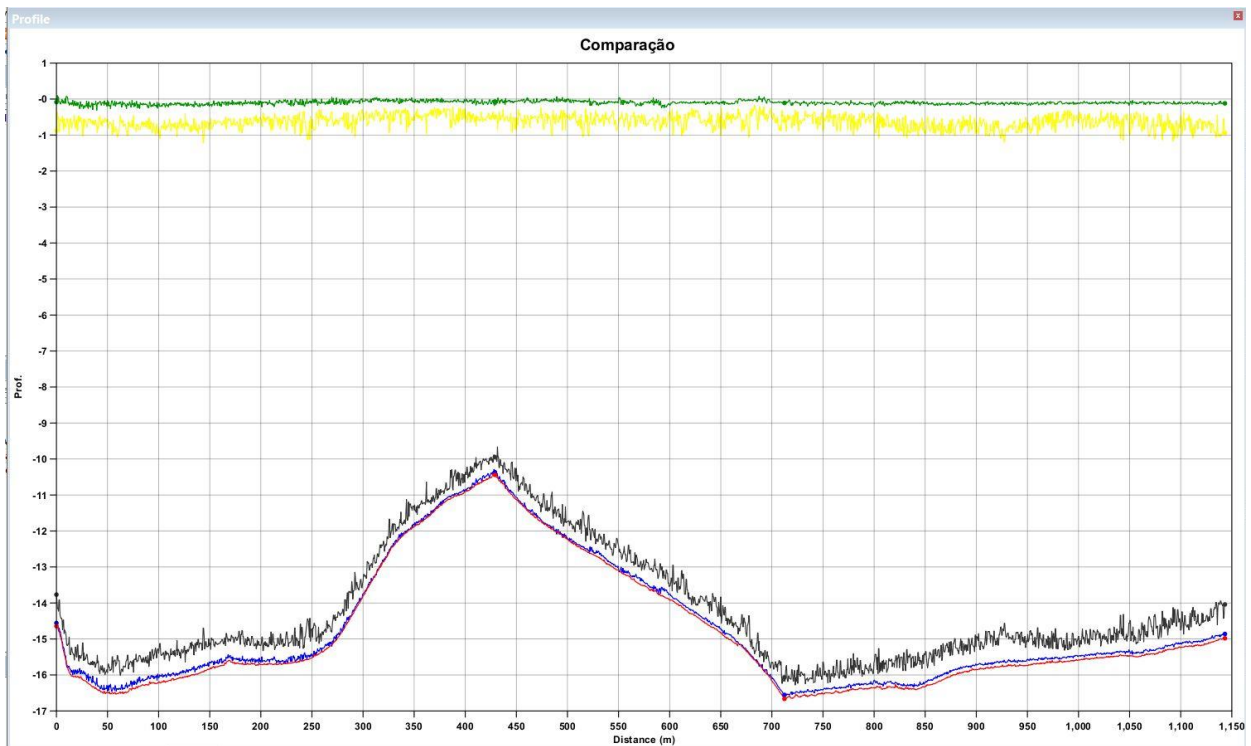


Figura 38 – Perfil 1. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

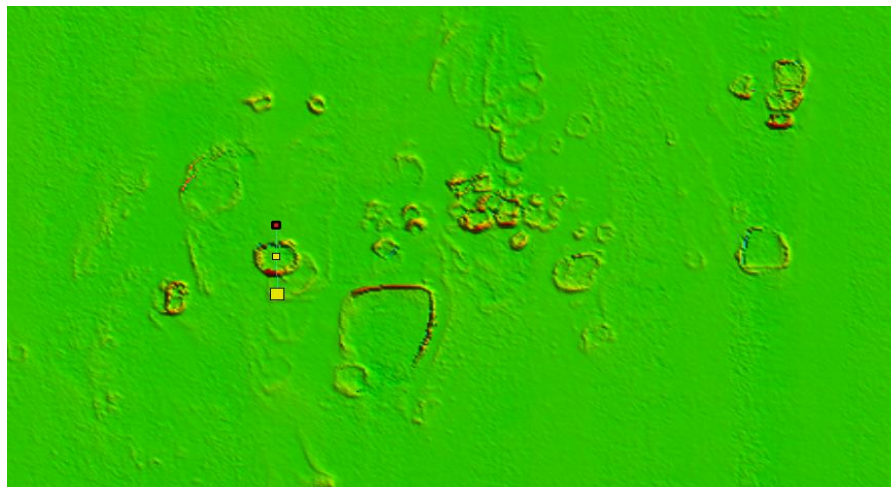


Figura 39 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 2.

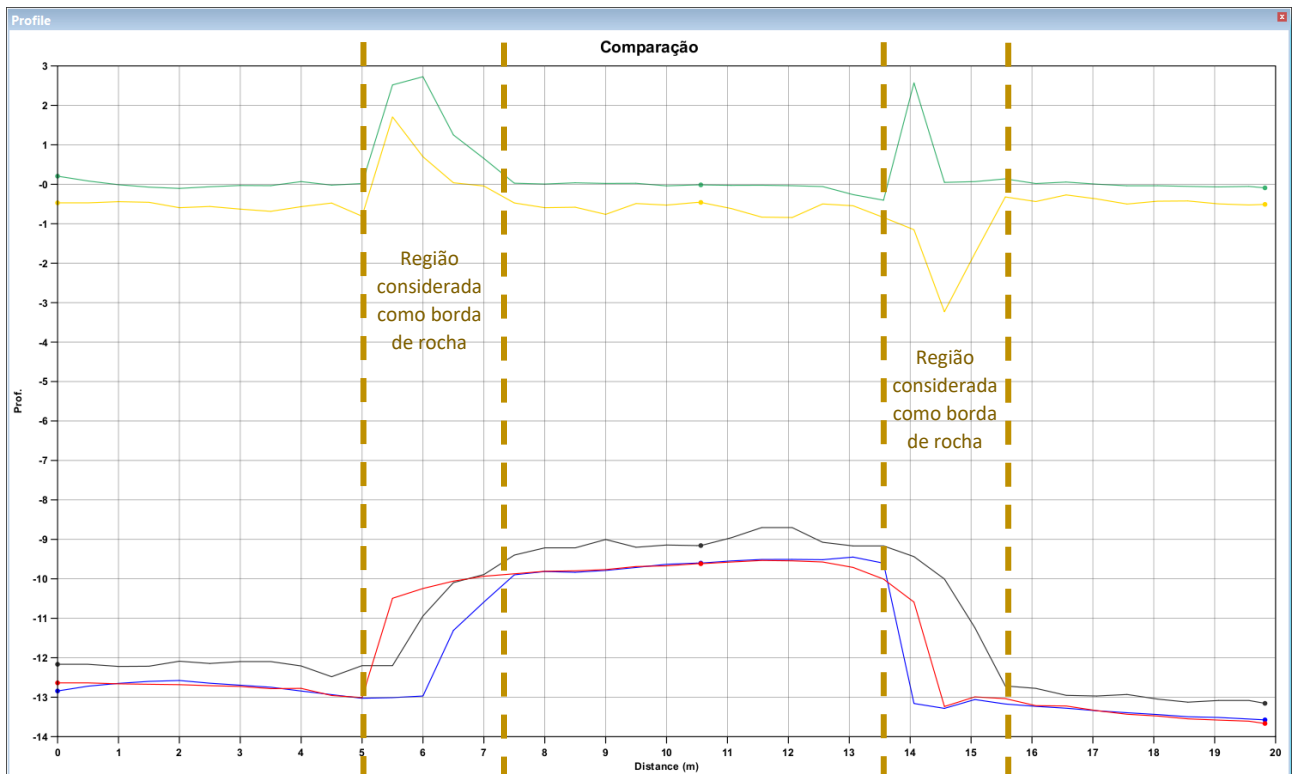


Figura 40 – Perfil 2. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

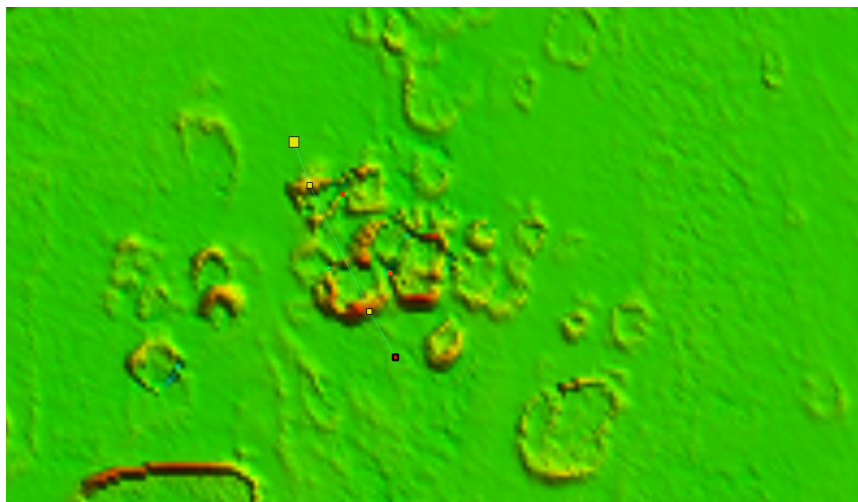


Figura 41 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 3.

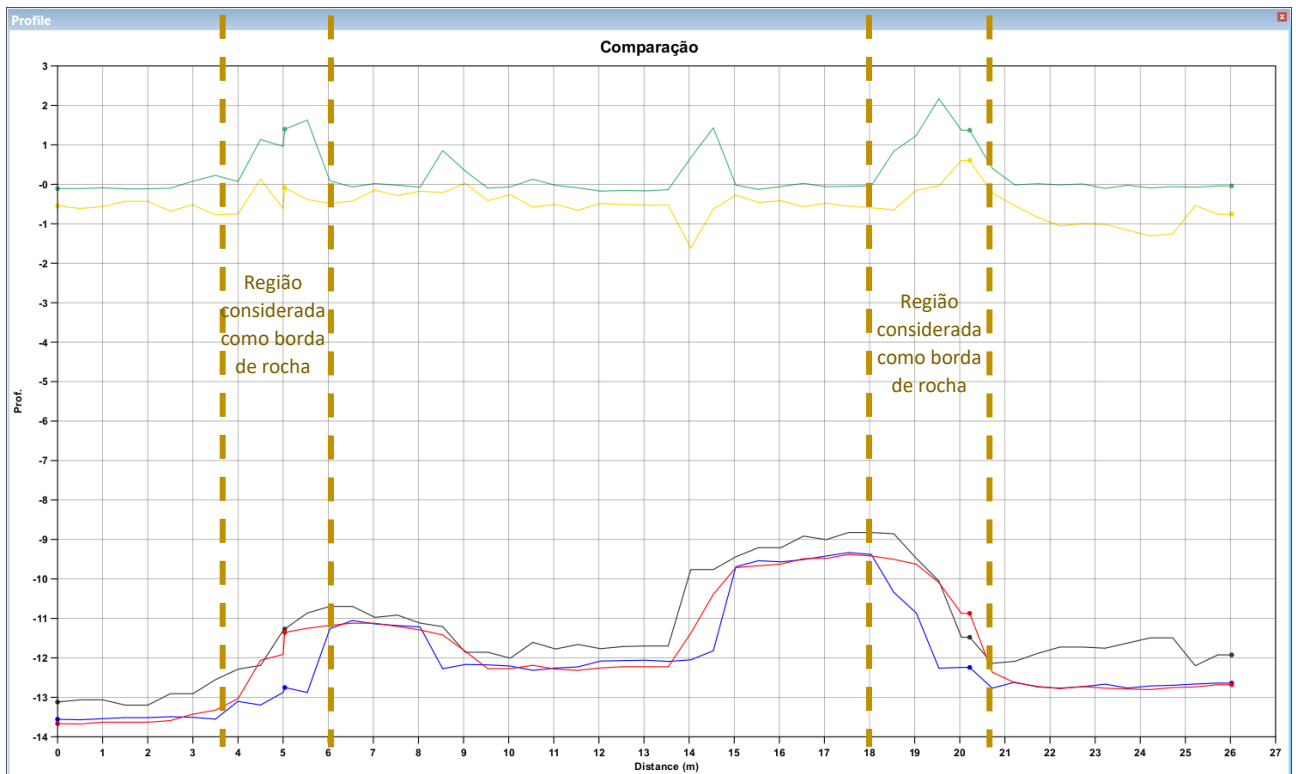


Figura 42 – Perfil 3. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

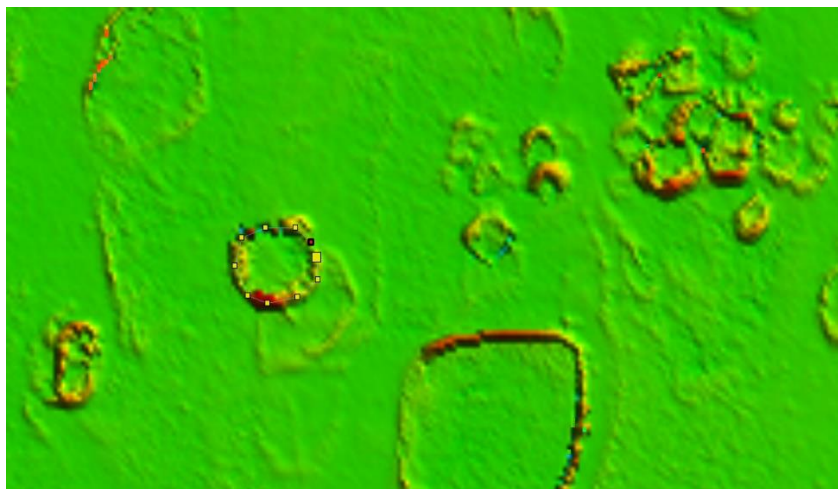


Figura 43 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 4. Este perfil foi realizado apenas na borda da rocha.

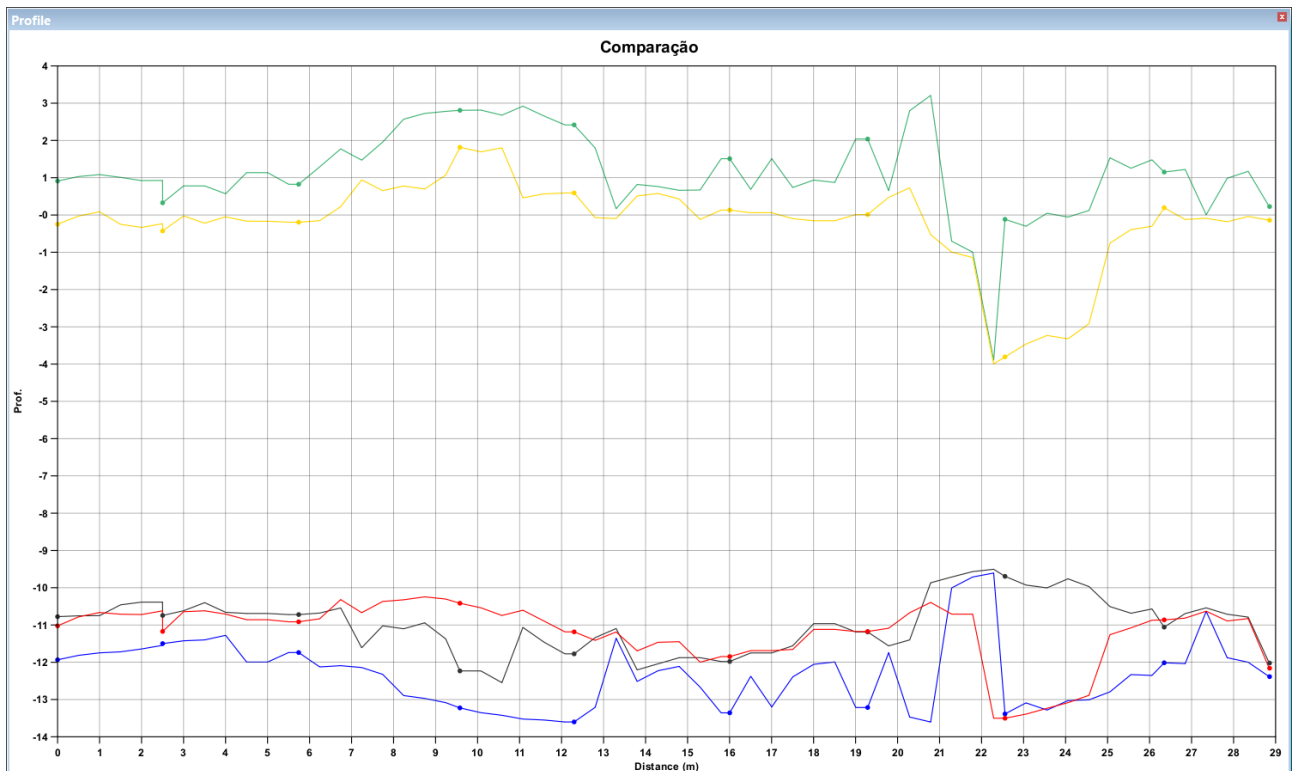


Figura 44 – Perfil 4. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

Observa-se nessas regiões uma grande diferença de valor, inclusive com o $Shoal_{HP/PDBS}$ apresentando uma diferença maior do que o $Shoal_{PDBS}$, o que, em uma primeira impressão, apresenta uma incongruência. Analisando mais a fundo a situação em lide, destaca-se essa dissimilitude na Tabela 5 e na Figura 45.

Tabela 5 – Comparação entre as superfícies analisadas. As áreas em análise estão assinaladas na figura abaixo.

Camada	Borda (m)	Topo (m)
$Shoal_{HP/PDBS}$	13,247	9,601
$Shoal_{PDBS}$	12,4	9,2
$Shoal_{MBES}$	10,7	9,6
$Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$	2,5	0,0
$Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$	1,7	0,5

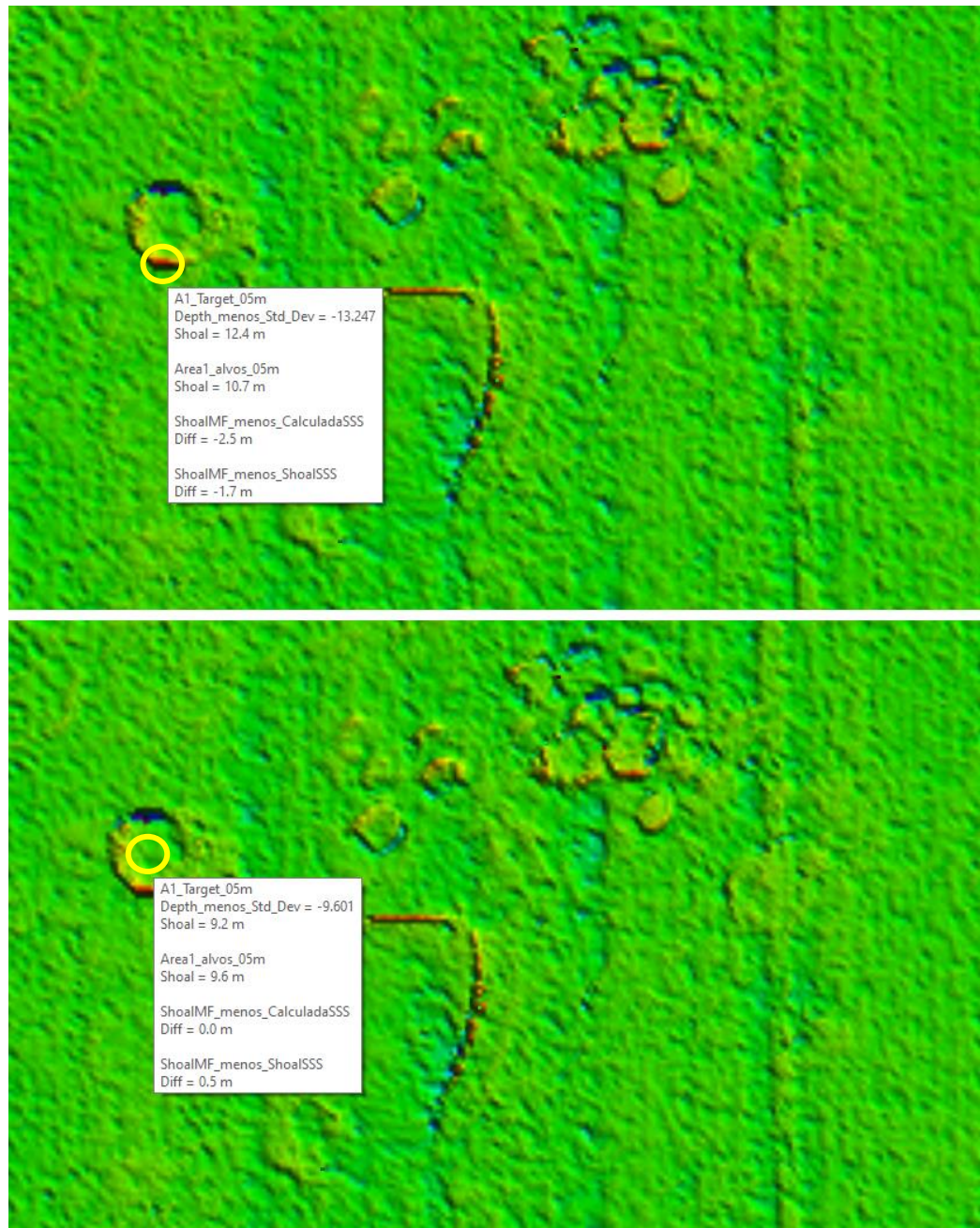


Figura 45 – Comparação entre os valores da borda de uma rocha de formato circular e o seu centro. O círculo em amarelo destaca as áreas mensuradas e também tem seus valores discriminados na tabela acima.

Observa-se que os valores inesperados se encontram na borda da rocha. Já foi apontado em Pimentel (2018) a impossibilidade de o PDBS quantificar áreas muito íngremes, muito devido ao *layover effect*. Porém o topo da rocha já tem seus números dentro do esperado. Importante ressaltar

que na etapa de generalização cartográfica, onde os valores mais rasos são ressaltados e resto desconsiderado, os valores da borda (não confiáveis) seriam preteridos em prol dos do topo, justamente por apresentarem menor profundidade. Dessa forma, áreas de transição muito abruptas do relevo marinho tendem a ser desconsideradas na produção cartográfica⁵³.

4.1.1 Conclusões da Área 1

Ao investigar esta área e levando em consideração sua característica marcante (presença de rochas) é possível chegar as seguintes conclusões:

1. Toda a metodologia descrita no capítulo anterior foi seguida, sendo suas premissas verificadas e as validações realizadas com sucesso;
2. A superfície calculada *Shoal_{HP/PDBS}* apresentou grande aderência à *Shoal_{MBES}*, estando apenas 10 cm centímetros mais rasa que esta última. Na metodologia atual, onde se usa a *Shoal_{PDBS}*, este valor aumenta para 60 cm;
3. A partir desta métrica, pode-se visualizar que a metodologia sugerida neste trabalho é capaz de diminuir a diferença entre a superfície considerada padrão para a construção da carta náutica e a que se pretende avaliar em 50 cm, valor já considerado expressivo para a batimetria de regiões onde a folga abaixo da quilha seja crítica; e
4. Nas áreas onde os valores se apresentaram fora do esperado – borda de feições –, o PDBS não apresenta uma boa performance. Contudo, essa desvantagem se esmaece devido ao processo de generalização cartográfica, permitindo o uso desta superfície. No exemplo acima, as profundidades que seriam exportadas para a carta náutica seriam as do topo da rocha, valor que as superfícies *Shoal_{MBES}* e *Shoal_{HP/PDBS}* apresentam resultados semelhantes, desconsiderando-se os valores da borda.

⁵³ Ainda que o efeito de *layover* possa ser desconsiderado na carta náutica, surge a natural dúvida se também poderá ser desconsiderado na S-102. No caso das rochas sondadas, observou-se uma imprecisão em suas bordas, quando muito íngremes (inclinação > 85,7°), ao longo de uma distância de 1 m (Pimentel, 2018). Considerando o valor de redução gráfica 0,28 mm (valor da classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica para documentos digitais (PEC-PCD) (Santos et al, 2016)), em escalas ≤ 1:3.571, essa diferença não tem representação. Assim, em escalas maiores, a rocha não teria seu formato e dimensões completamente representados, porém a menor profundidade ainda estaria representada. Dessa forma, a utilidade da S-102, que é aumentar a segurança da navegação ainda estaria preservada.

4.2. ÁREA 2

A área 2 foi concebida para avaliar a capacidade de resolução de diferentes inclinações. Na aplicação do método, é necessário verificar a quantidade de hipóteses para cada tecnologia. Na superfície construída a partir do PDBS, pela escala apresentada, é possível visualizar que a quantidade de hipóteses, majoritariamente, oscila entre 3 e 6, enquanto no MBES este valor é uniformemente unitário (Figura 46).

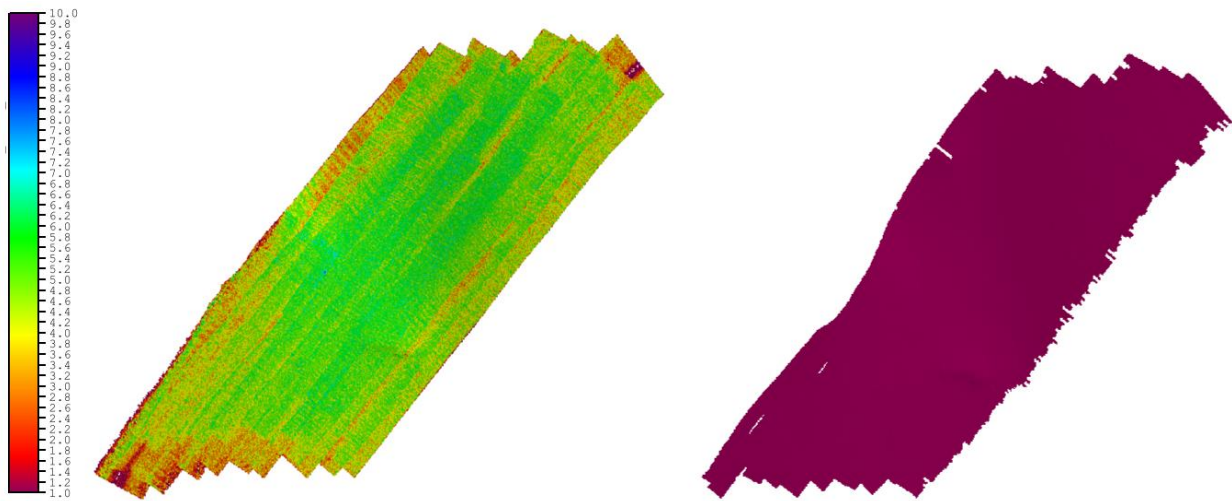


Figura 46 - Superfícies com a visualização por quantidade de hipóteses (camada Hypothesis_Count). A escala está em número de hipóteses. A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES.

Prosseguindo, de maneira análoga à Área 1, faz-se a verificação de estimativa de profundidades e do desvio padrão da hipótese (Figura 47 e Figura 48). Pela disposição de cores, é possível perceber que a estimativa de profundidades é bem semelhante, enquanto o desvio padrão do PDBS oscila em torno de 0,1 m e a do MBES tem seu valor entre 0 e 0,1 m.

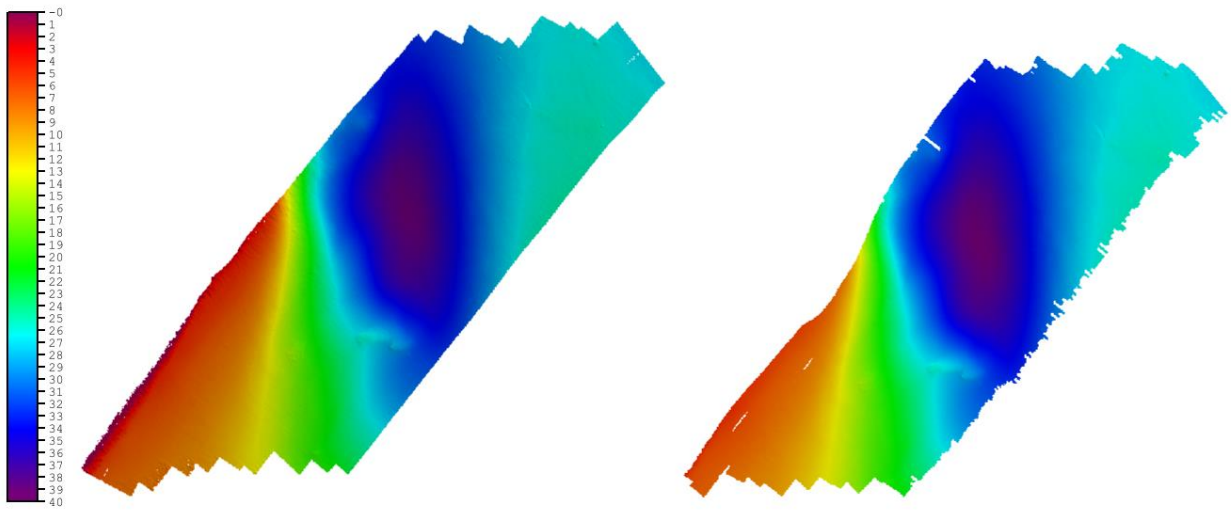


Figura 47 - Superfícies com a visualização da profundidade (camada Depth). A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES. Escala em metros.

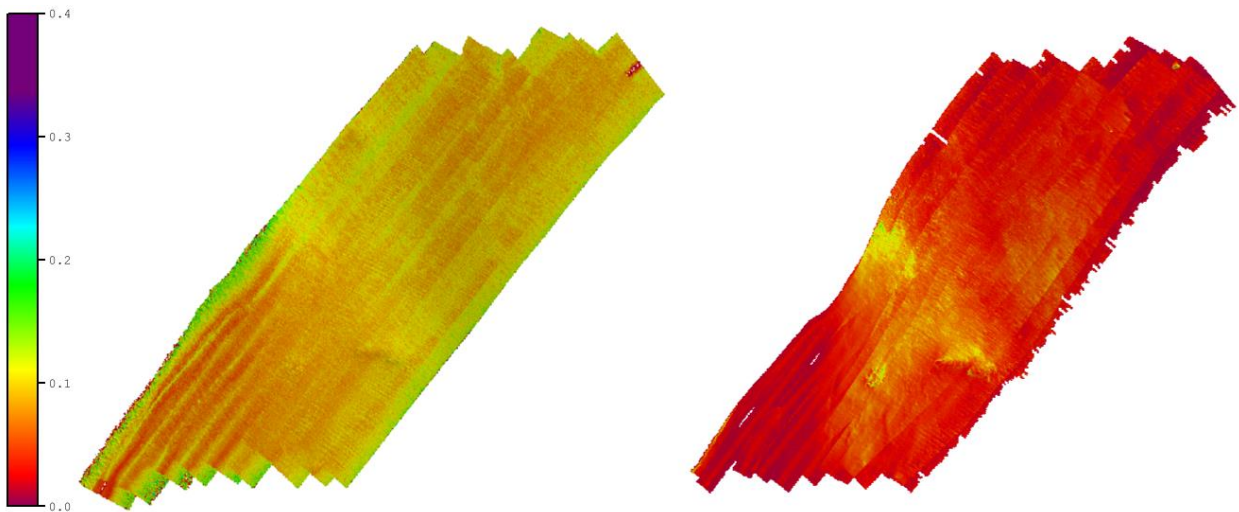


Figura 48 - Superfícies com o desvio padrão (1,96x) da profundidade da hipótese (camada Std_Dev). A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES. Escala em metros.

Uma vez averiguada a quantidade de hipóteses, a estimativa de profundidade e seu desvio padrão, calcula-se a $Shoal_{HP/MBES}$, comprando-a com a $Shoal_{MBES}$ (Figura 49).

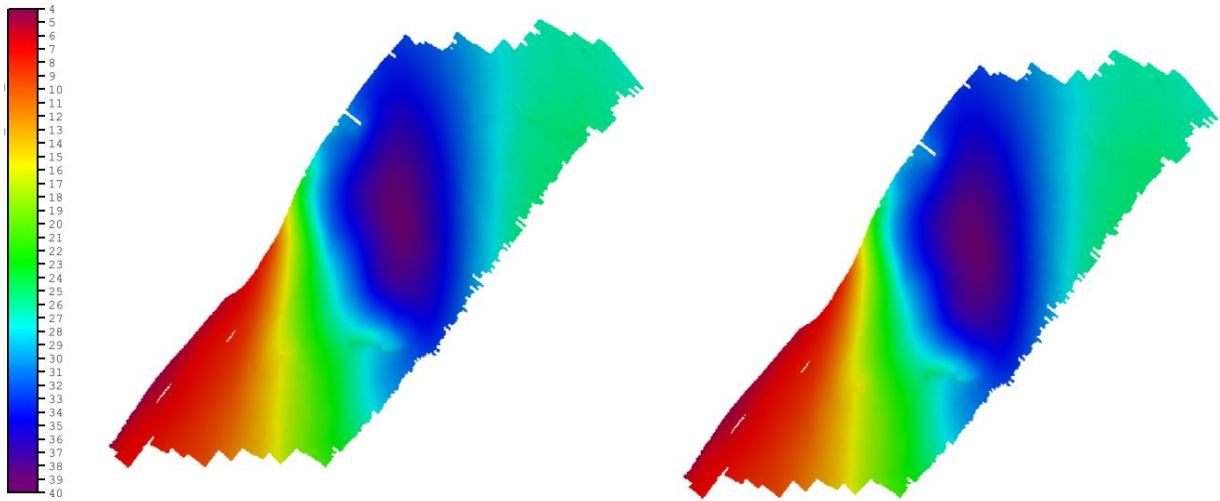


Figura 49 – Camadas da superfície MBES. A da esquerda é a camada Shoal, a da direita é Shoal_{HP}. Escala em metros.

Prossegue-se com a primeira validação (Figura 50). Pela camada de diferença entre os valores de *Shoal* e *Shoal_{HP}*, é perceptível que eles variam de 0 a 0,05 m, sendo que nas partes de maior inclinação, chegam a 0,1 m. Uma das células, escolhidas a acaso, mostra que essa diferença é 0,8 cm. A média da diferença é 0,041 m e pelo histograma (Figura 51), pode-se observar a distribuição dos valores das células.

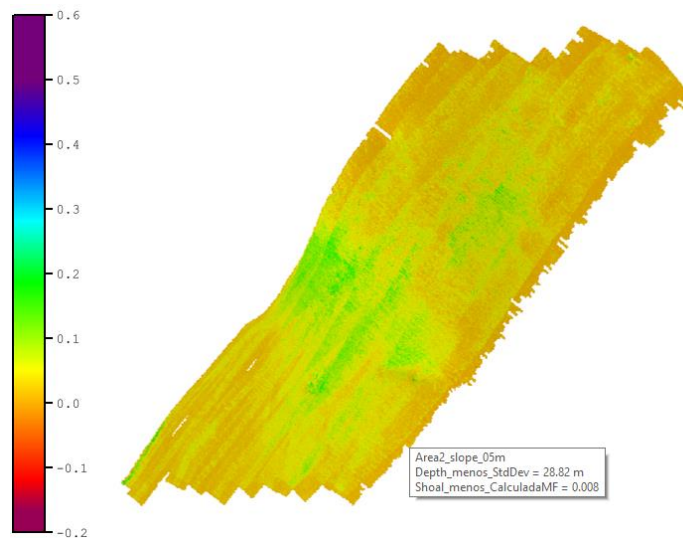


Figura 50 – Diferença entra as camadas Shoal e Shoal_{HP} da superfície MBES. Escala em metros.

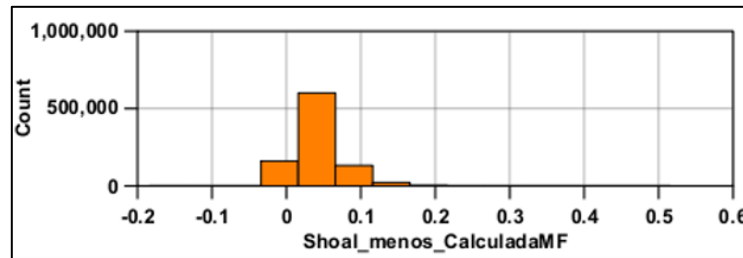


Figura 51 – Histograma da diferença entre as camadas Shoal e Shoal_{HP}. O tamanho de cada faixa de comparação é 5 cm. Escala em metros.

Com a primeira validação sendo positiva, é continuada a aplicação da metodologia, calculando-se Shoal_{HP/PDBS} (Figura 52). De forma análoga à área analisada anteriormente, percebe-se um amaciamento da superfície calculada.

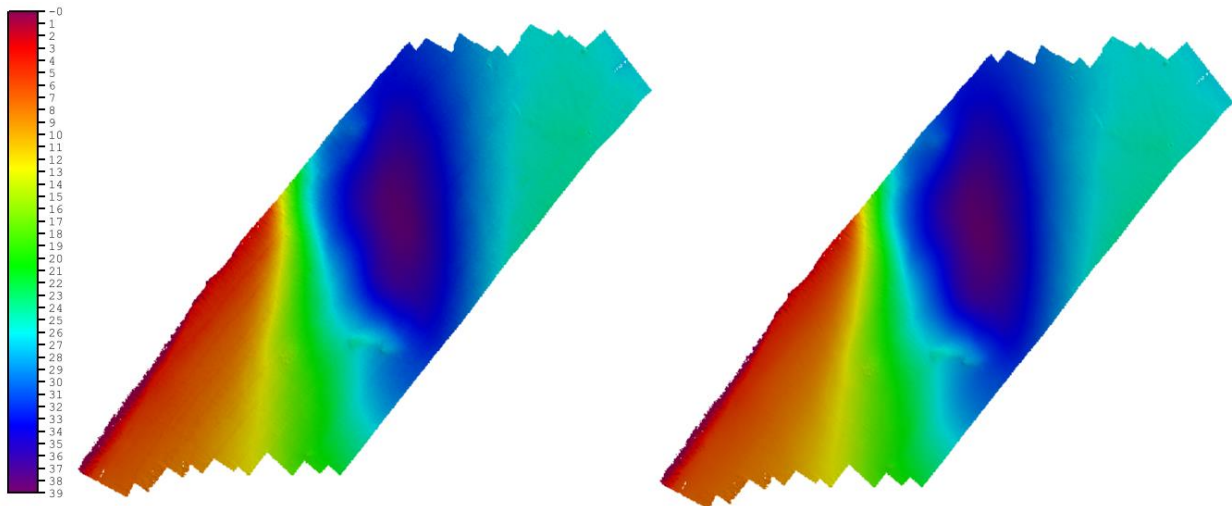


Figura 52 – Camadas da superfície PDBS. A da esquerda é a camada Shoal, a da direita é Shoal_{HP}. Escala em metros.

Por último, procede-se a verificação final, na qual a superfície Shoal_{HP/PDBS} é comparada ao Shoal_{MBES}. De maneira semelhante ao item anterior, foi computada a superfície diferença entre o Shoal_{MBES} e o Shoal_{PDBS}, para melhor compreensão da dessemelhança entre ambas (Figura 53). Tal fato é notável pela dissimilitude das cores predominantes em cada uma. Na primeira, é perceptível a cor predominante é o amarelo / verde / marrom, mostrando uma oscilação de diferença centrada no 0 m. Na segunda, a coloração predominante é verde / azul, denotando uma oscilação em torno

de 0,5 m. Para melhor mensuração, a média das diferenças da primeira superfície é 0,1 m, enquanto a segunda é 0,7 m. Na análise dos histogramas (Figura 54), observa-se o mesmo efeito da área 1.

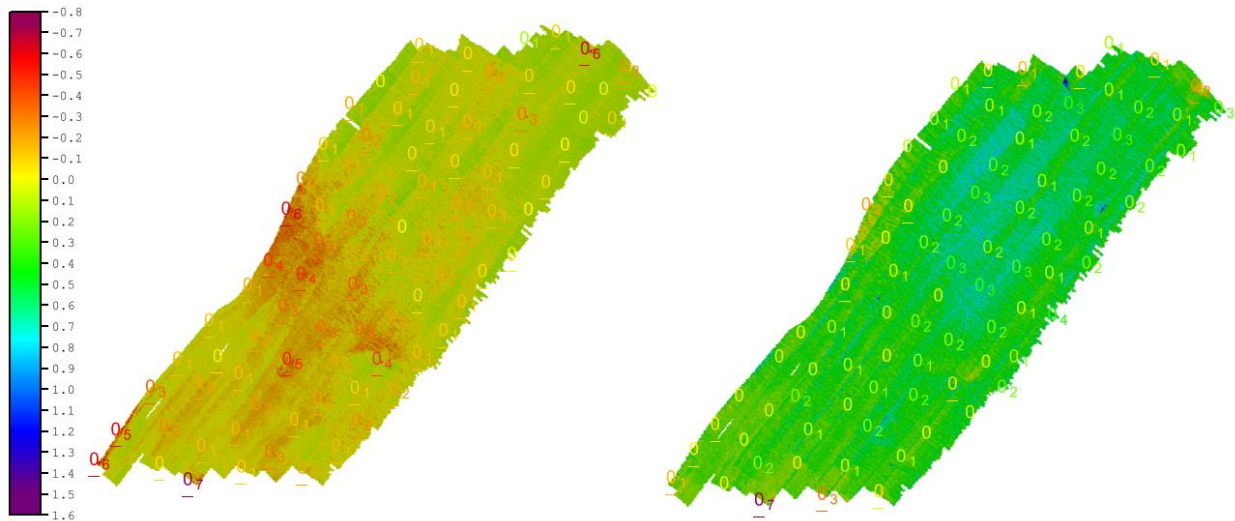


Figura 53 – Superfícies diferença. A da esquerda é $Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$. A da direita é $Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$. Escala em metros. Os dígitos funcionam como uma seleção de sondagens, mostrando os pontos onde as diferenças possuem maior valor.

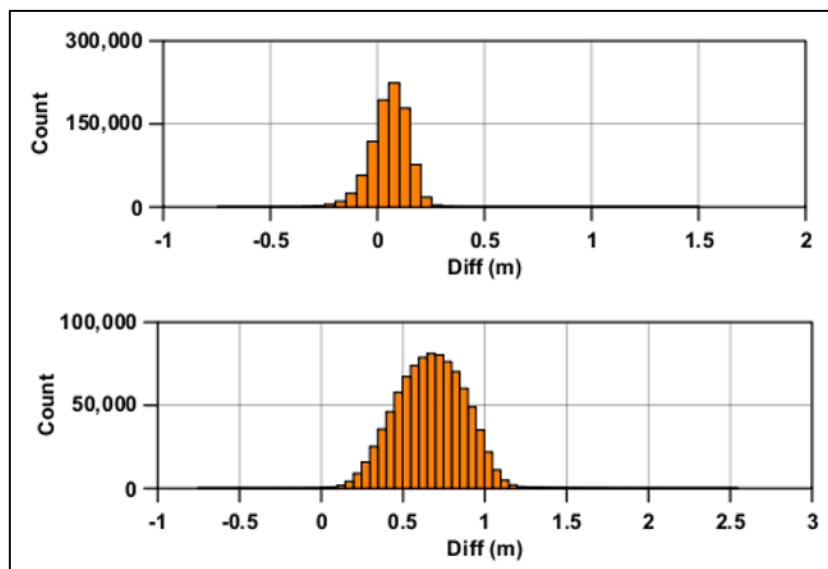


Figura 54 – Histograma dos valores das células das superfícies diferenças. A de cima é $Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$. A de baixo é $Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$. O tamanho de cada faixa de comparação é 5 cm. Escala em metros.

Uma ferramenta de análise, que foi amplamente utilizada na Área 1, é a verificação de perfis escolhidos em áreas de maior incerteza. Na Área 2, observa-se um padrão mais homogêneo nas superfícies diferenças. Assim, foram escolhidos 3 perfis: cortes majoritariamente vertical e horizontal das regiões de maior gradiente e um em uma área plana (Figura 55 a Figura 60). Em todos os perfis, verifica-se o mesmo padrão de comportamento, corroborando com o que foi apresentado no diagrama de cores das superfícies. Isto indica que, tanto em áreas planas quanto em áreas de inclinações mais suaves, o método se aplica com grande eficiência.

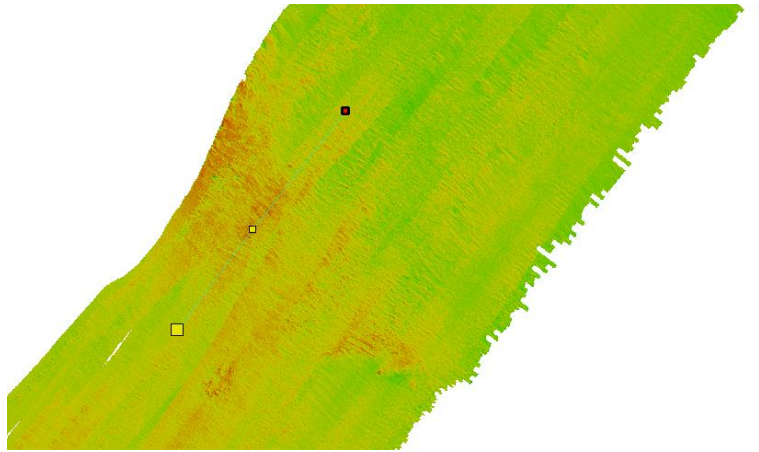


Figura 55 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 1.

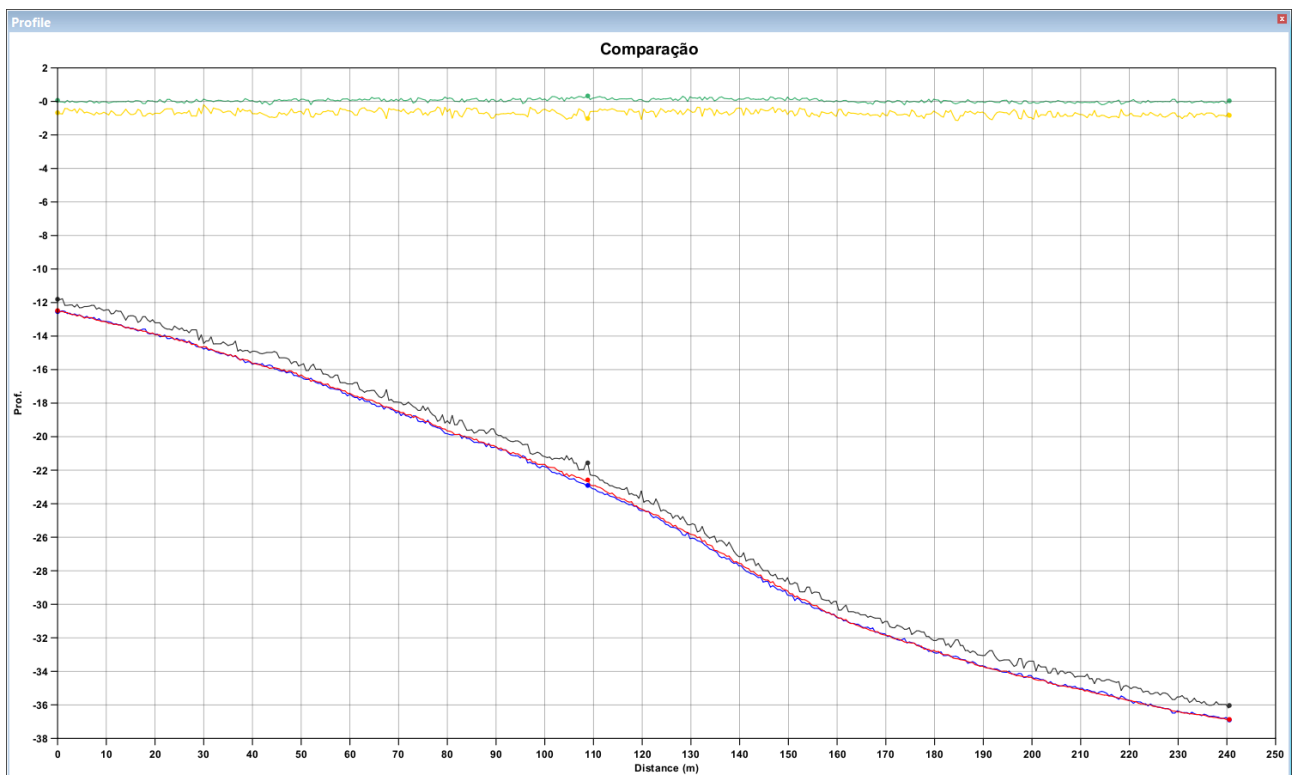


Figura 56 – Perfil 1. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

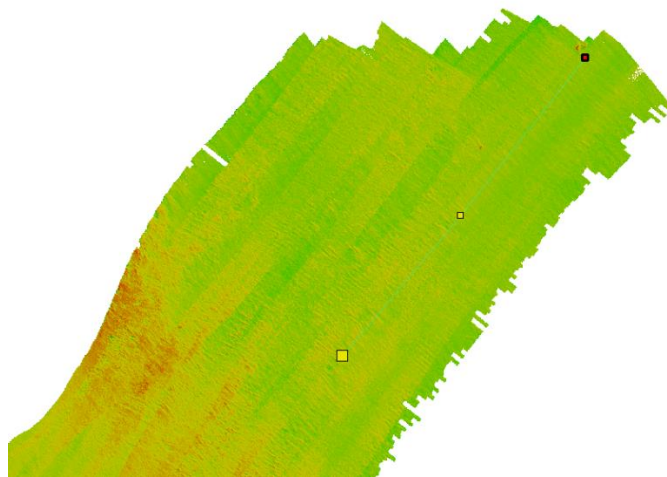


Figura 57 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 2.

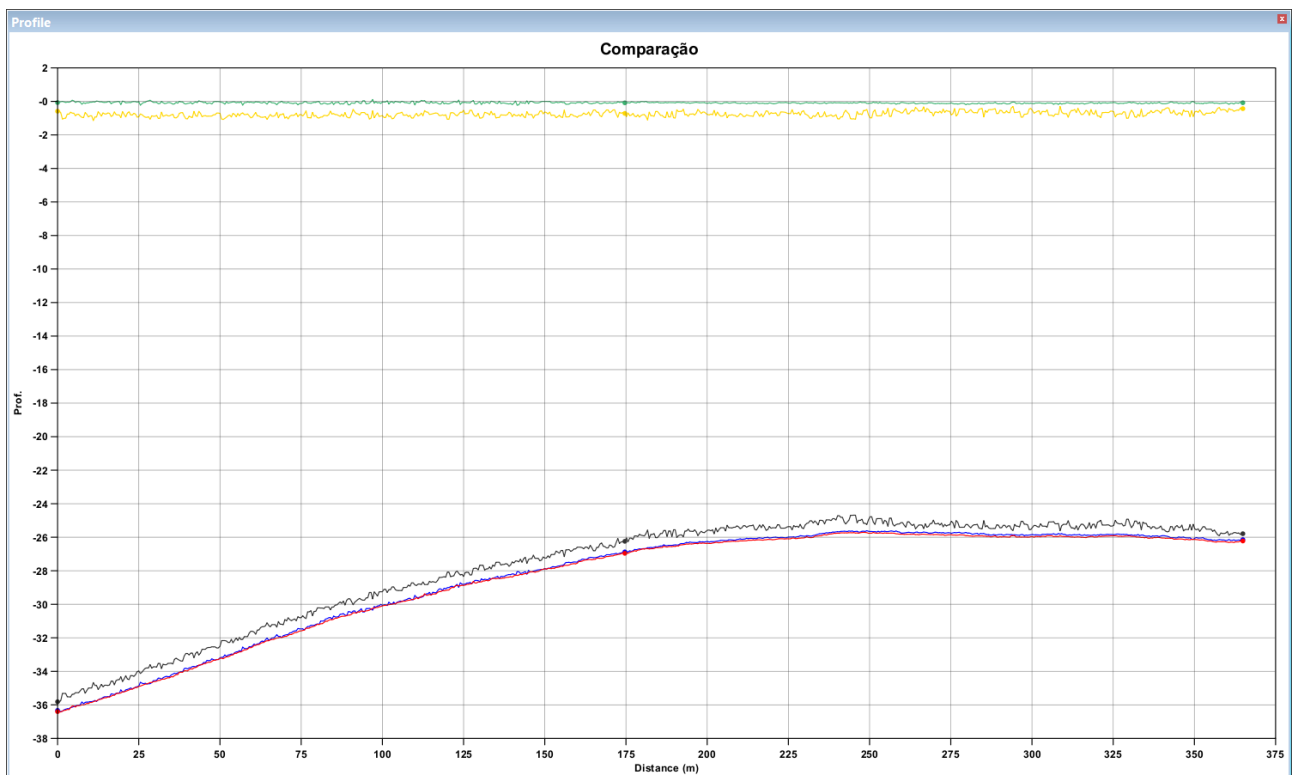


Figura 58 – Perfil 2. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

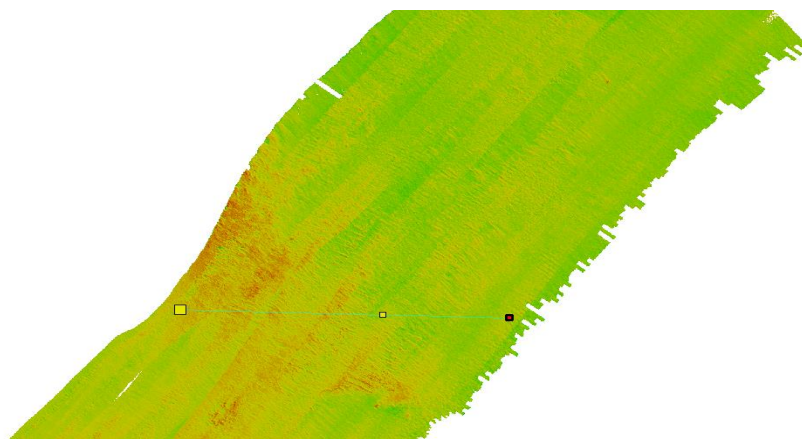


Figura 59 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 3.

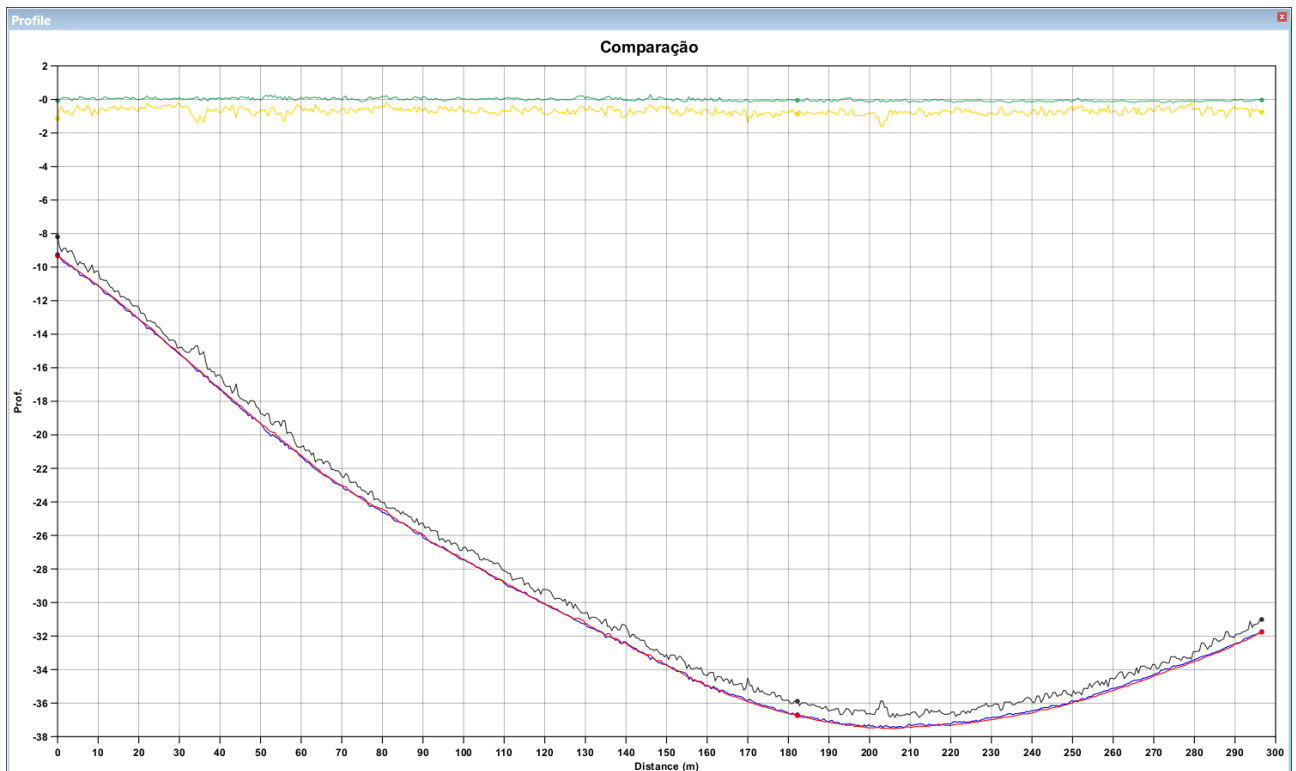


Figura 60 – Perfil 3. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

4.2.1 Conclusões da Área 2

Após verificação detalhada da Área 2, chega-se às seguintes conclusões:

1. Os itens 1 a 3 elencados no campo 4.1.1 (Conclusões da Área 1) mantêm sua pertinência para esta área, com um aumento no efeito de aderência da superfície $Shoal_{HP/PDBS}$ de 0,7 m para 0,1 m, mostrando uma melhora de 0,6 m; e
2. As variações da inclinação do solo marinho vão de 0° a 10° (PIMENTEL, 2018). Nesses gradientes mais suaves, observa-se a mesma performance alcançada nas áreas planas. Tal ocorre devido a sobreposição de linhas, o que gera *pings* resultantes de ângulos de ataque⁵⁴ diferentes. Enquanto uns *pings* sofrem com os ruídos, *layover*, *baseline decorrelations* e

⁵⁴ É o ângulo formado entre o fundo marinho e a eixo de propagação da frente sonora. Varia em função da inclinação do fundo e da posição (em x, y e z) do PDBS. Quando existe superposição de *pings* decorrentes de varreduras diferentes, o ângulo de ataque também variará. Para maiores aprofundamentos, ver APÊNDICE A.

shiftings footprint, outros não, mantendo a qualidade da sondagem⁵⁵. Ou seja, os efeitos citados estão presentes, porém foram totalmente suprimidos na aplicação de filtros e no processamento do CUBE, permanecendo os *pings* que representam o fundo marinho. Dessa forma, em áreas deste tipo, com inclinações mais suaves, não há limitações na aplicação da metodologia para a estimativa do fundo marinho, principalmente na extração de seus dados mais rasos (*Shoal*), que é a origem dos dados que servirão de subsídios para os documentos náuticos.

4.3. ÁREA 3

A área 3 foi concebida para avaliar a capacidade de quantificação de objetos submersos que se pronunciam para fora da superfície da água. Nesse objetivo, foram utilizados alguns pilares da Ponte Rio-Niterói.

Para iniciar a metodologia, como premissa inicial, a quantidade de hipóteses pode ser verificada abaixo (Figura 61). Interessante notar que na superfície MBES, o valor, como nas áreas anteriores, é 1. Já no PDBS, os valores oscilam entre 1 e 6, contudo na área dos pilares da ponte, a quantidade de hipóteses atinge as marcas de 20 a 38.

⁵⁵ A existência de ruídos, *layover*, *baseline decorrelation effect* e *shifiting footprint effect* são efeitos intrínsecos da tecnologia do PDBS e afetam a precisão e acurácia da sondagem. Existem situações que aumentam ou diminuem suas ocorrências. Para maior conhecimento desses efeitos, ver APÊNDICE A.

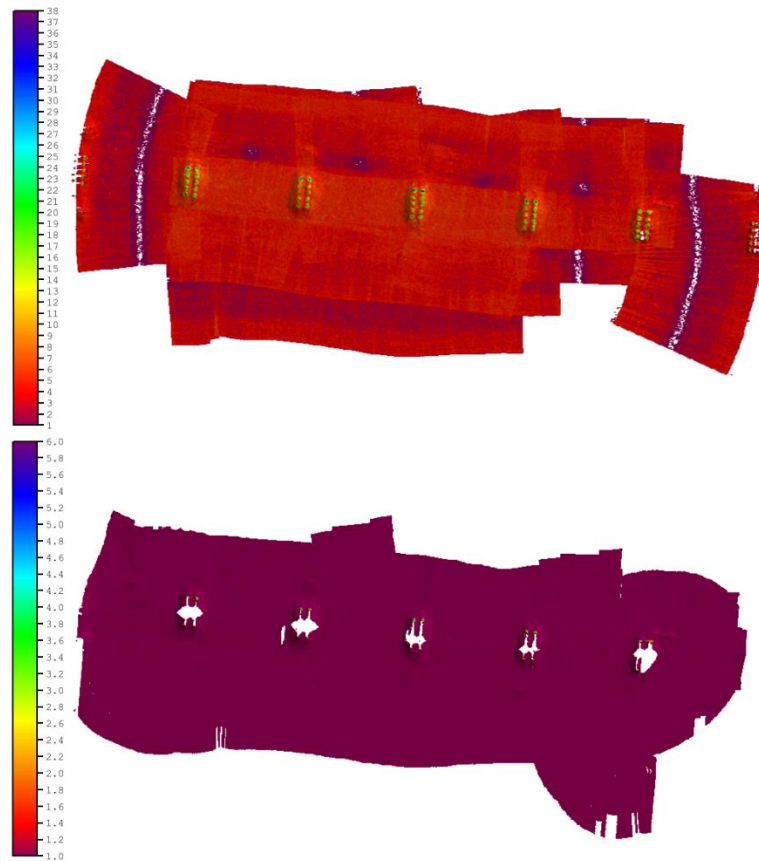


Figura 61 – Superfícies com a visualização por quantidade de hipóteses (camada Hypothesis_Count). A escala está em número de hipóteses. A de cima é a do PDBS e a de baixo do MBES.

Um efeito esperado, já observado e analisado durante a pesquisa desenvolvida na dissertação de Mestrado (PIMENTEL, 2018), é a capacidade do PDBS quantificar melhor os pilares, de forma não só a representá-los⁵⁶, mas também calcular as profundidades mais rasas (Figura 62). Como estes objetos possuem grande projeção vertical, o CUBE cria várias hipóteses para fazer a representação batimétrica, podendo ser visualizado pela diferença de escala de profundidade: enquanto o mínimo do MBES é 7,5 m, do PDBS é 1 m.

⁵⁶ Na superfície MBES, o centro dos pilares não foi imageado.

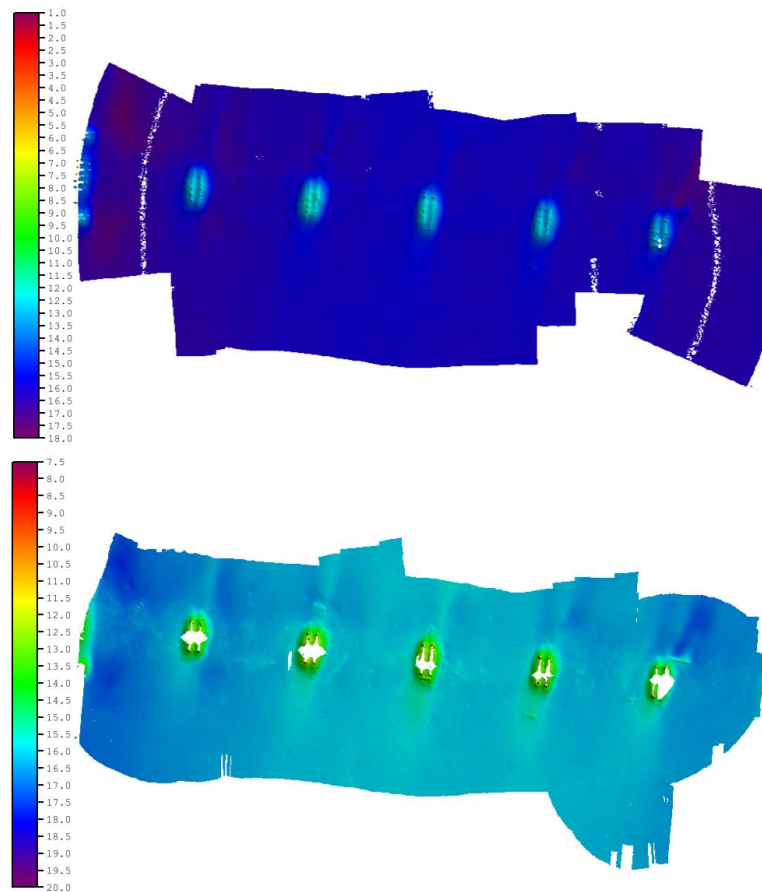


Figura 62 – Superfícies com a visualização da profundidade (camada Depth). A de cima é a do PDBS e a de baixo é do MBES. Escala em metros.

Pela figura acima, as superfícies aparentam estimar o fundo marinho de forma diferente, contrariando uma das premissas, porém isto se deve a diferença de escala. Quando se colocam ambas as superfícies em uma mesma escala de cores⁵⁷, observa-se que são congruentes (Figura 63). A variação ocorre por causa da estimativa dos pilares.

⁵⁷ Em um primeiro momento, pode parecer sem sentido colocar as superfícies batimétricas em escalas diferentes, uma vez que tal procedimento não foi adotado em nenhuma área. Contudo, o objetivo foi manter o didatismo em apontar a diferença de profundidade mais rasa encontrada com cada tecnologia.

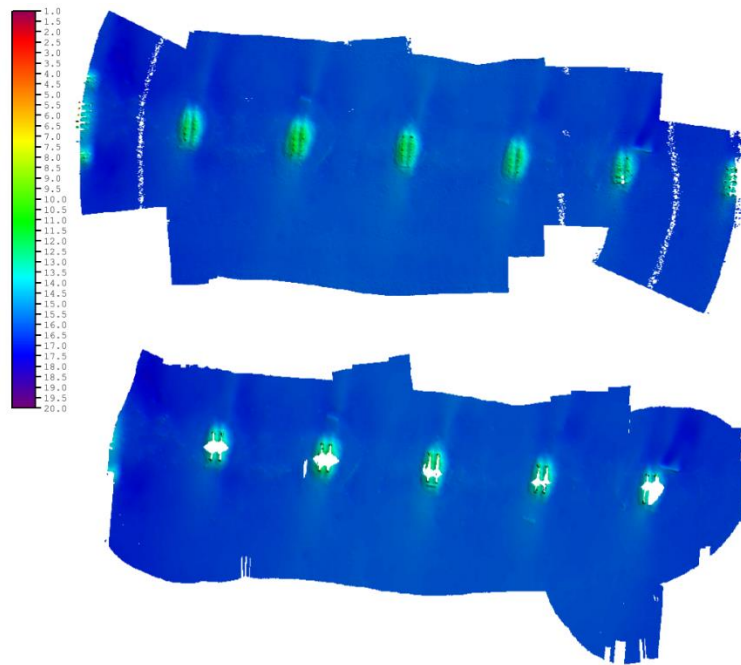


Figura 63 - Superfícies com a visualização da profundidade (camada *Depth*). A de cima é a do PDBS e a de baixo é do MBES. Escala (uniformizada) em metros.

Após a verificação das premissas, calcula-se a incerteza ($1,96\sigma$) da camada *Depth* de cada superfície (Figura 64). Os valores para o PDBS oscilam entre 0 e 0,3 m e os do MBES entre 0 e 0,1 m (exceção feita aos pilares que, devido à dispersão vertical dos dados batimétricos, tem a incerteza do valor da hipótese escolhida acrescida significativamente).

Um dado que vem a causar estranheza é, na região central dos pilares, a incerteza da superfície MBES ser maior do que a do PDBS (quadrado da Figura 64, sendo ampliado na figura seguinte). Na Figura 65, foram ampliadas a escala de cores da feição em estudo. No MBES, os valores de incerteza oscilam entre 0,5 e 0,7 m e no PDBS é aproximadamente 0,1 m. A explicação reside na tecnologia de cada equipamento e no próprio método do CUBE. Por ser um método eminentemente estatístico, quanto mais dados, mais robusto é o resultado, tendo maior quantidade de informações, conseqüentemente, mais hipóteses e menor incerteza em cada uma. Assim, como o interferométrico tem grande quantidade de dados batimétricos bem espaçados verticalmente, sua superfície possui mais hipóteses, porém com incertezas menores. Já o multifeixe é capaz de fornecer uma menor quantidade de informações distribuídas ao longo do eixo z, gerando menos

hipóteses e com maior incerteza, pois acaba faltando robustez estatística⁵⁸. Tais efeitos redundarão em diferenças que serão estudadas mais à frente, quando o método proposto for aplicado.

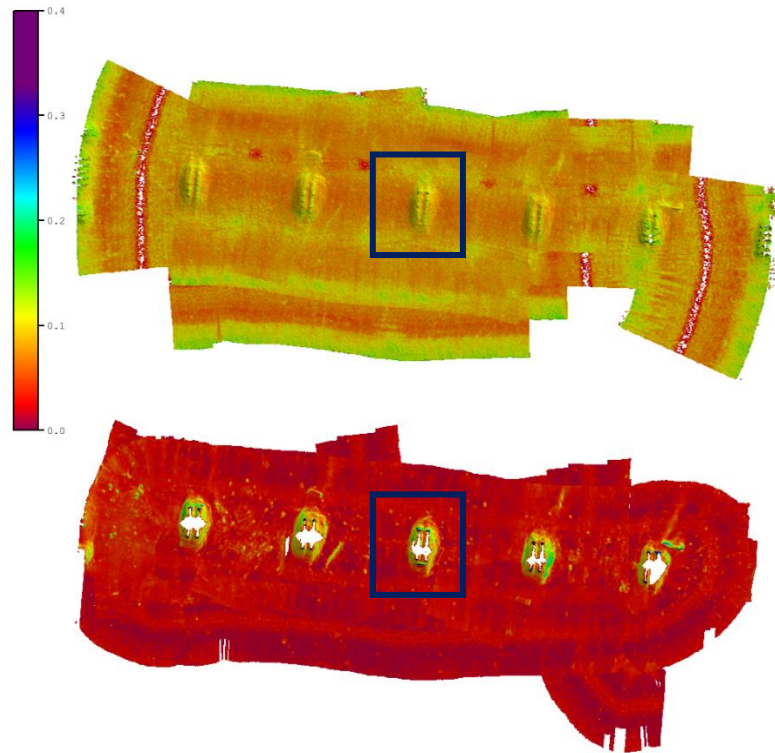


Figura 64 – Superfícies com o desvio padrão (1,96x) da profundidade da hipótese (camada *Std_Dev*). A de cima é do PDBS e a de baixo é do MBES. Escala em metros.

⁵⁸ Tal fato pode ser observado em uma abordagem quantitativa, ao se observar as Eq. 2 e 5, constantes no capítulo 3. Pela Eq. 2, é perceptível que quanto mais *pings*, menor será o $G_j[n]$. Consequentemente, ao estudar a Eq. 5, perceber-se que quanto menor esta grandeza, menor a incerteza da hipótese. Em uma estimativa numérica imagina-se 2 hipóteses do CUBE. A primeira composta por 2 *pings* de incerteza 0,1 m e a segunda por 5 *pings* com a mesma incerteza de 0,1 m. A primeira hipótese teria uma incerteza de 0,05 m e a segunda de 0,02 m.

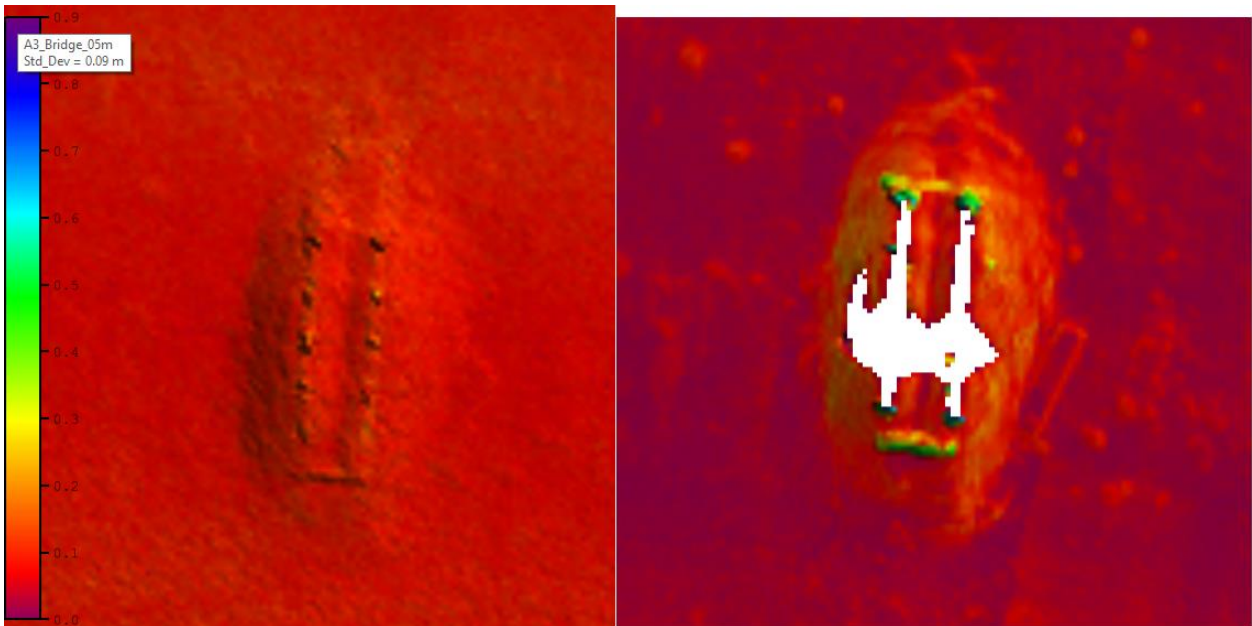


Figura 65 – Pilar central da superfície. A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES. Escala em metros

A próxima etapa é calcular a camada $Shoal_{HP/MBES}$ e compará-la com a $Shoal_{MBES}$ (Figura 66). É visível, por meio da escala de cores, que a diferença entre as superfícies varia entre 0 e 0,1 m (Figura 67), com a média de 0,037 m. A distribuição dos valores das células pode ser melhor observada por meio do histograma (Figura 68). Exceção é a região dos pilares⁵⁹.

⁵⁹ A não conformidade da região dos pilares pode ser verificada tanto na superfície quanto no histograma (observar a escala do histograma). Contudo, por apresentar poucas células que contemplam este efeito, elas acabam não sendo representativas no histograma. Como no MBES os dados apresentam menor dispersão vertical, a diferença entre o $Shoal$ e a camada calculada são pequenas. Este efeito será melhor visualizado quando a comparação abarcar a camada $Shoal$ do PDBS.

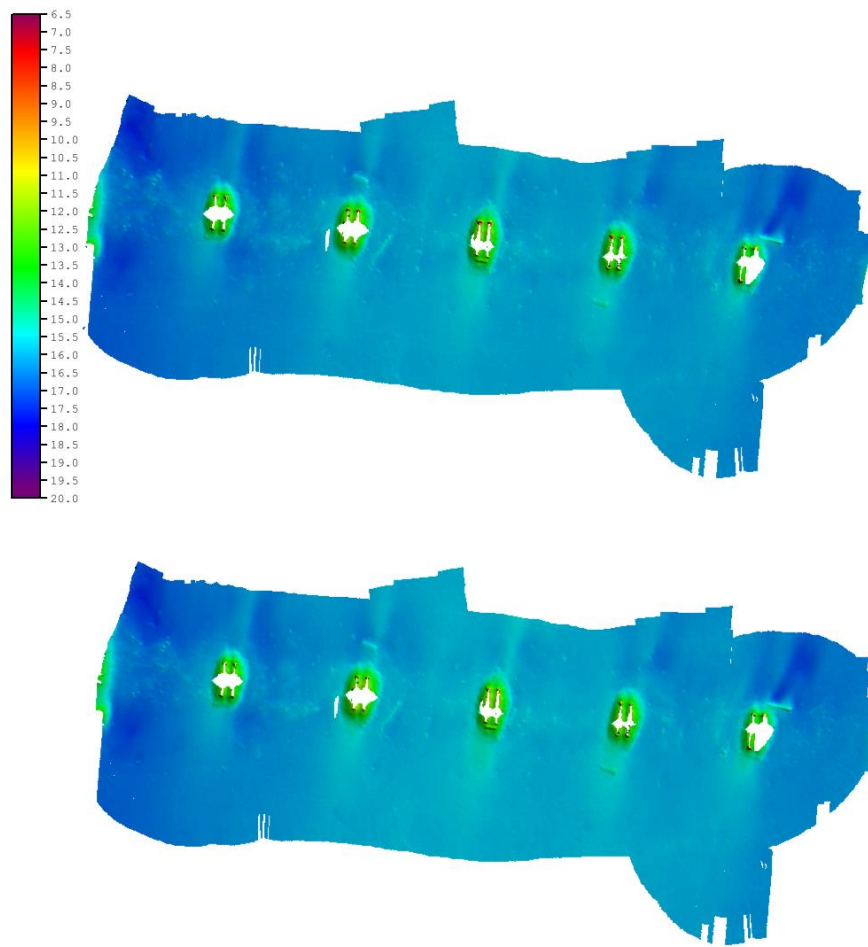


Figura 66 – Camadas da superfície MBES. A de cima é a camada Shoal, a de baixo a é ShoalHP. Escala em metros.

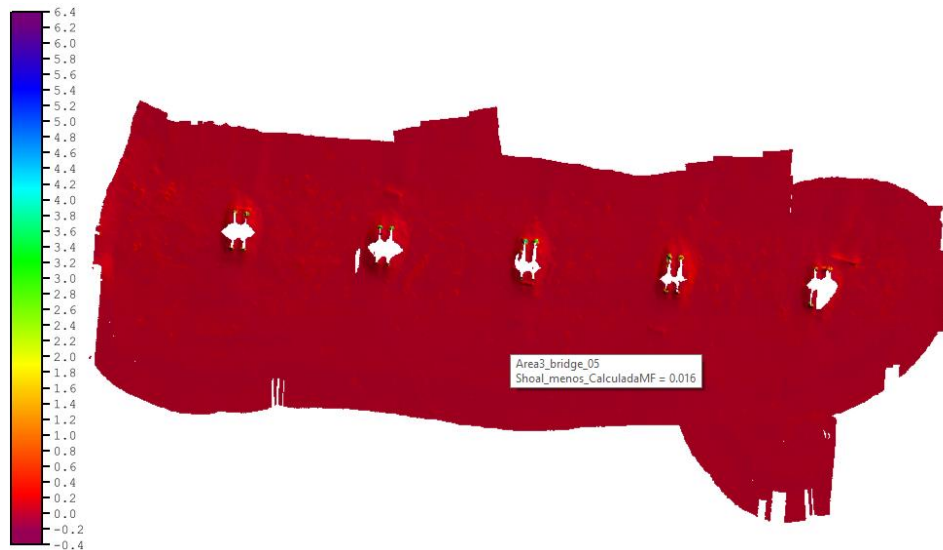


Figura 67 – Diferença entra as camadas Shoal e Shoal_{HP} da superfície MBES. Escala em metros.

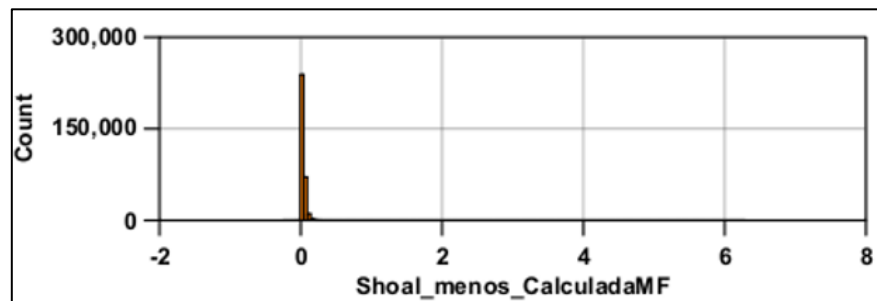


Figura 68 – Histograma da diferença entra as camadas Shoal e Shoal_{HP}. O tamanho de cada faixa de comparação é 5 cm. Escala em metros.

Depois de realizada a primeira validação, aplica-se a metodologia à superfície do PDBS. Pela cor, predominantemente azul escuro, observa-se que as camadas são semelhantes, contudo, os pilares apresentam, mais uma vez, dados intrigantes. Na camada *Shoal*, os pilares têm seus valores remetido a profundidades de 0,5 m, enquanto a *Shoal_{HP}/PDBS* tem como valores batimétricos de 11 a 12 m (Figura 69). Como essas feições saem à superfície da água, sabe-se que a primeira está mais perto de uma representação real.

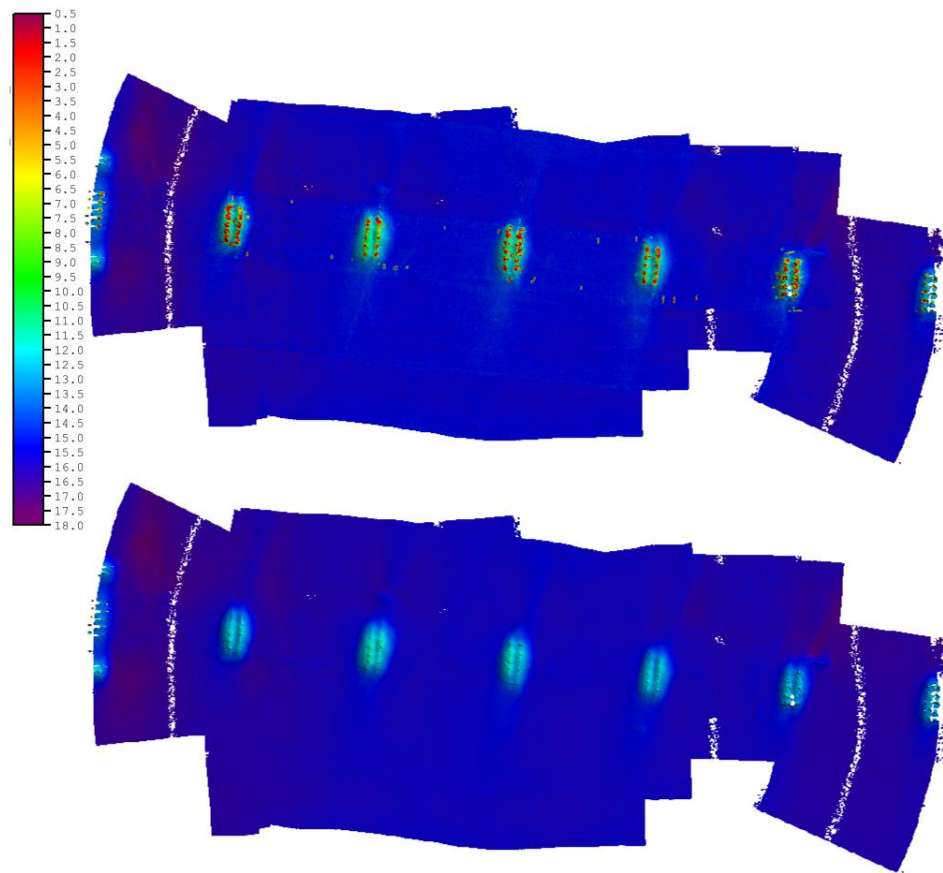


Figura 69 – Camadas da superfície PDBS. A de cima é a camada Shoal, a de baixo é Shoal_{HP}. Escala em metros.

Pela comparação de diferença entre superfícies (Figura 70), é possível ver uma pequena vantagem para a Shoal_{HP/PDBS}, pois seus valores se aproximam mais do zero. Tal fato pode ser melhor verificado por meio de histogramas (Figura 71) e da média das diferenças (0 m na primeira e 0,5 m na segunda).

Um aspecto que já foi abordado na nota de rodapé nº 52 e merece mais amplas considerações é a representação dos pilares da ponte, nos histogramas. Esta diferença não é tão visível no histograma da superfície Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}, porém quando se verifica a Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}, ela é mais perceptível (círculo vermelho na Figura 71), pois o PDBS é capaz de quantificar os pilares até quase a superfície do mar, sendo refletido nos valores da camada

Shoal_{PDBS}. Como o *Shoal_{HP/PDBS}* é formada por meio das hipóteses do CUBE, ela não contempla as menores profundidades⁶⁰.

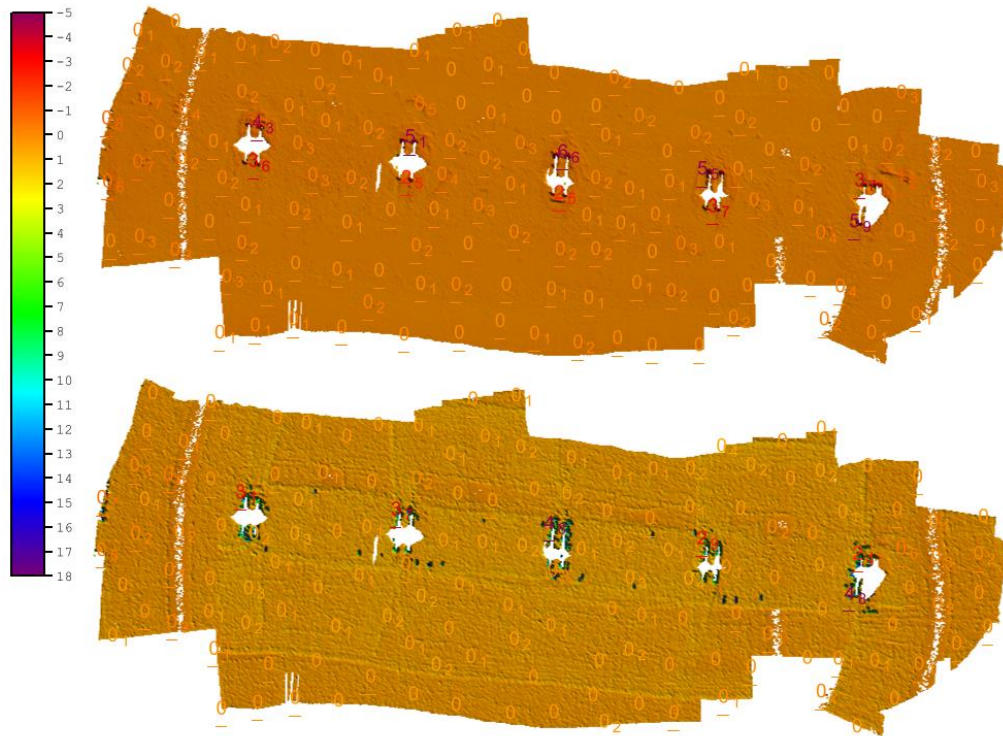


Figura 70 – Superfícies diferença. A de cima é *Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}*. A de baixo é *Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}*. Escala em metros. Os dígitos funcionam como uma seleção de sondagens, mostrando os pontos onde as diferenças possuem maior valor.

⁶⁰ Tal fato é uma limitação do algoritmo CUBE. Contudo, se é uma limitação ao método proposto, será explorado nas conclusões dessa área.

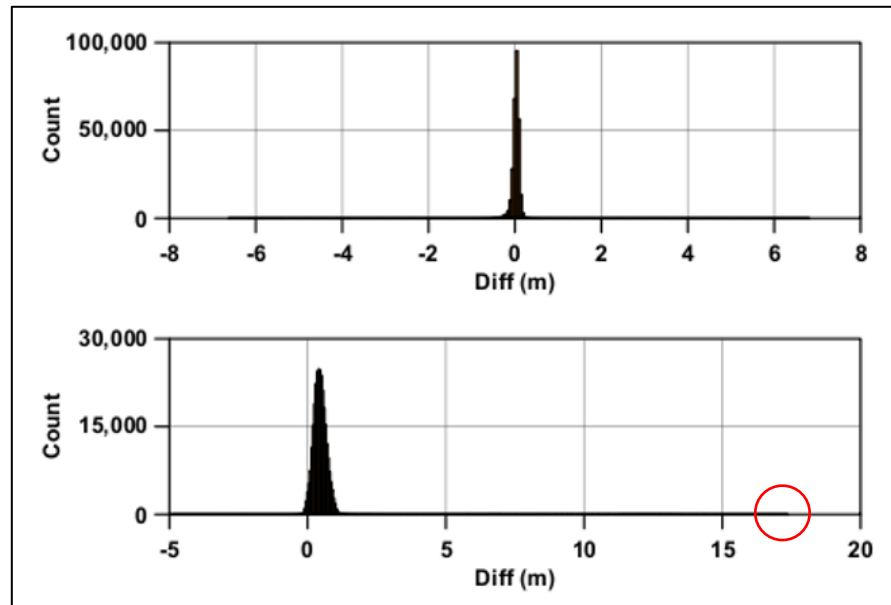


Figura 71 – Histograma dos valores das células das superfícies diferenças. A de cima é *Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}*. A de baixo é *Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}*. O tamanho de cada faixa de comparação é 5 cm. Escala em metros.

Para análise das feições mais significativas, far-se-á uso dos perfis (Figura 72 a Figura 77). O primeiro e o segundo apresentam cortes horizontal e vertical, englobando os pontos de maior diferença das superfícies. O terceiro é um corte no meio da feição. Em todos, observam-se efeitos semelhantes: na parte plana, correu o mesmo que já foi observado em todas as áreas: o aumento da coerência entre a camada calculada e a que já é consagrada para exportação de dados para a Carta Náutica. Já na região do pilar, é visto que a camada *Shoal_{PDBS}* é capaz de quantificar os pilares até quase a superfície (se aproximando bastante do real), a camada *Shoal_{MBES}*, apesar de quantificar o início da feição, não é capaz de acompanhá-la até a linha d'água, inclusive abrindo feriados, numa limitação da tecnologia do MBES. A camada *Shoal_{HP/PDBS}* não gera feriados, mas, por partir de um cálculo estatístico da camada *Depth*, não conseguiu quantificar os pilares com a mesma performance da camada *Shoal_{PDBS}*.

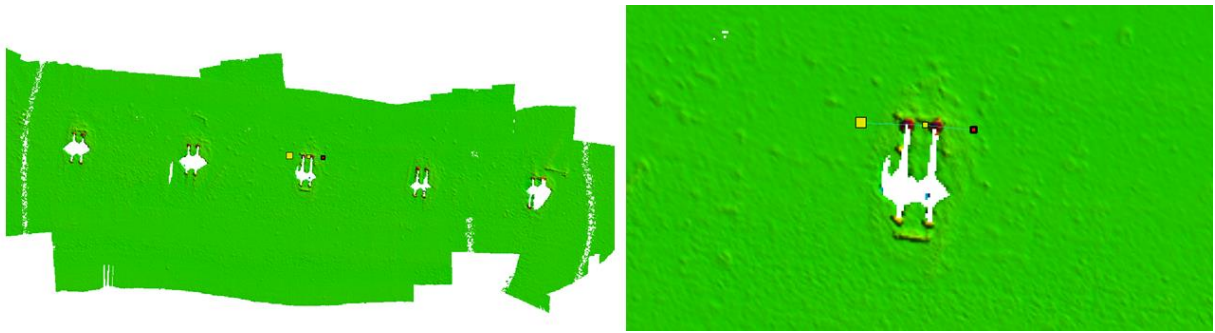


Figura 72 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 1. Para melhor visualização da área que foi analisada, optou-se por mostrar dois quadros. O primeiro mostra a área como um todo, o segundo o pilar central ampliado. Todos os perfis subsequentes serão do perfil central.

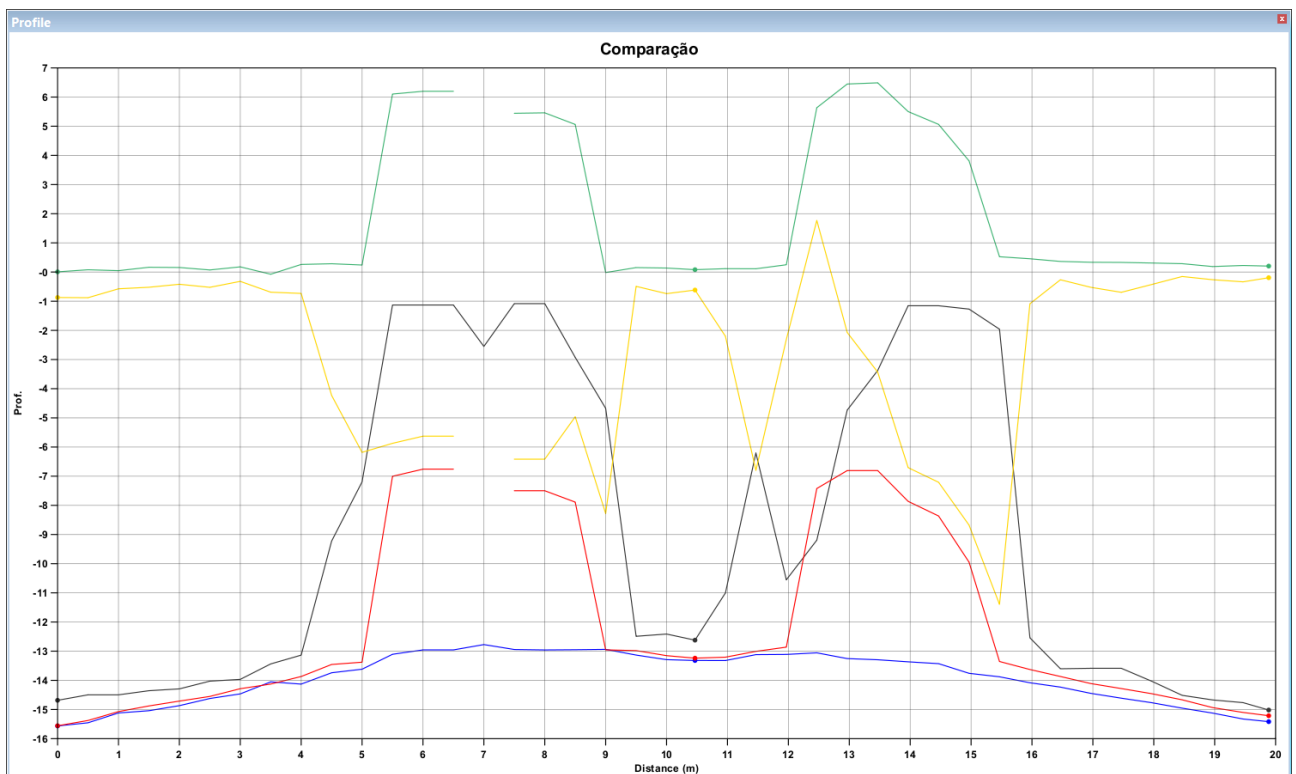


Figura 73 – Perfil 1. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

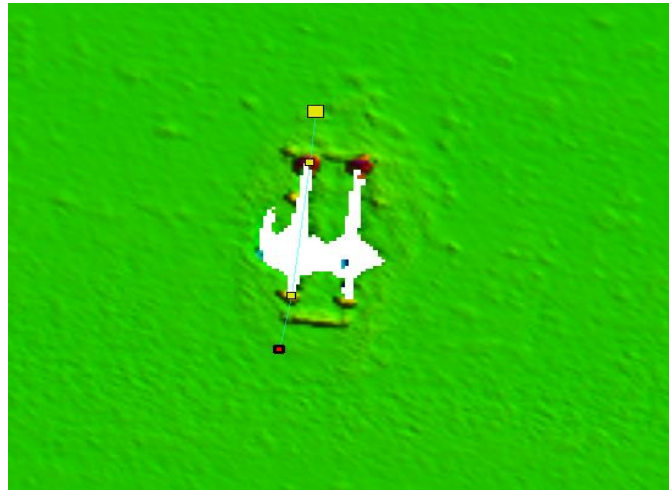


Figura 74 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 2.

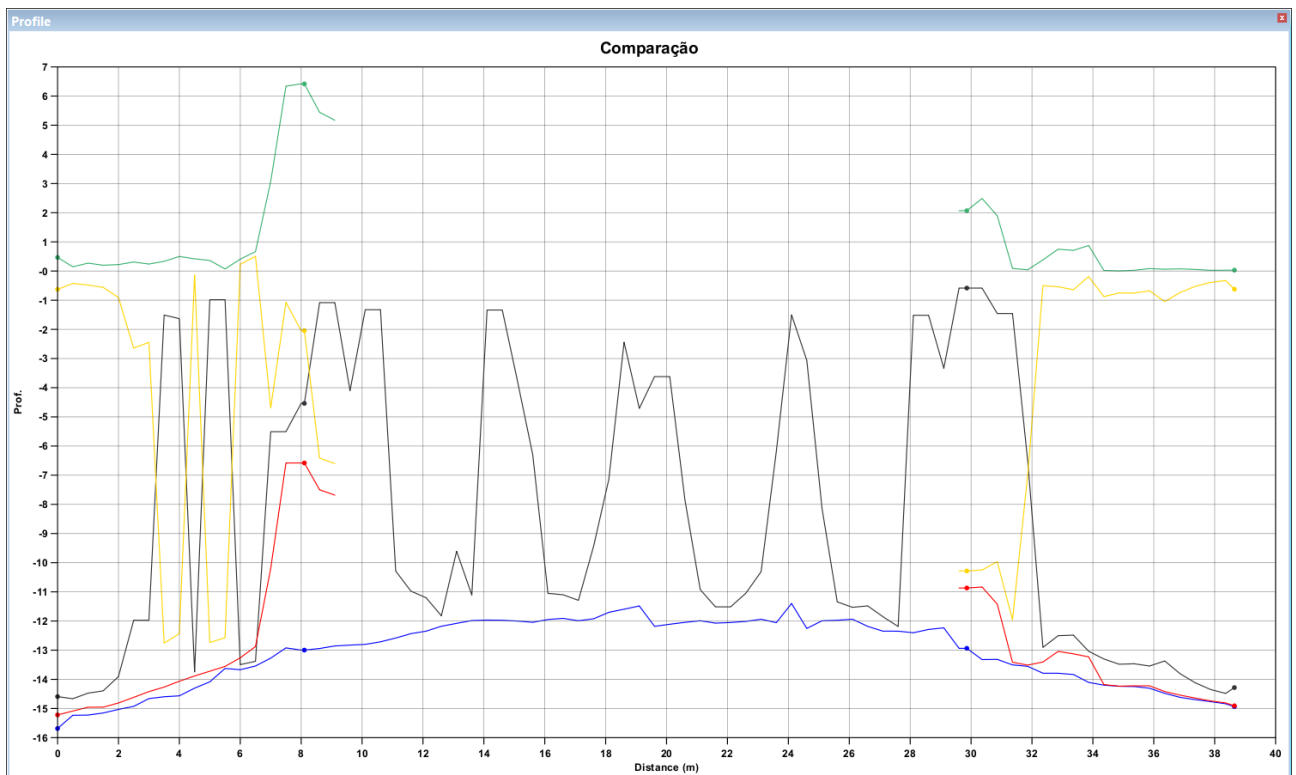


Figura 75 – Perfil 2. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

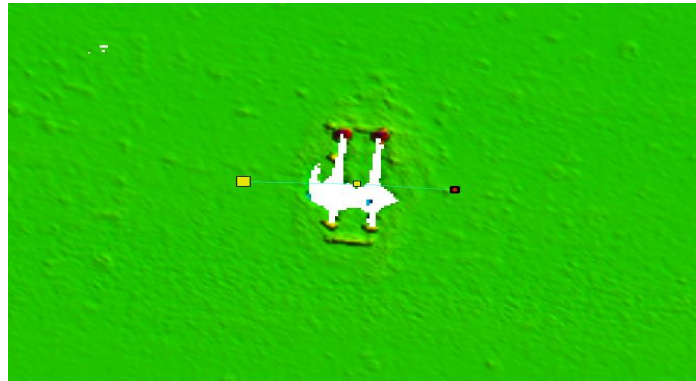


Figura 76 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 3.

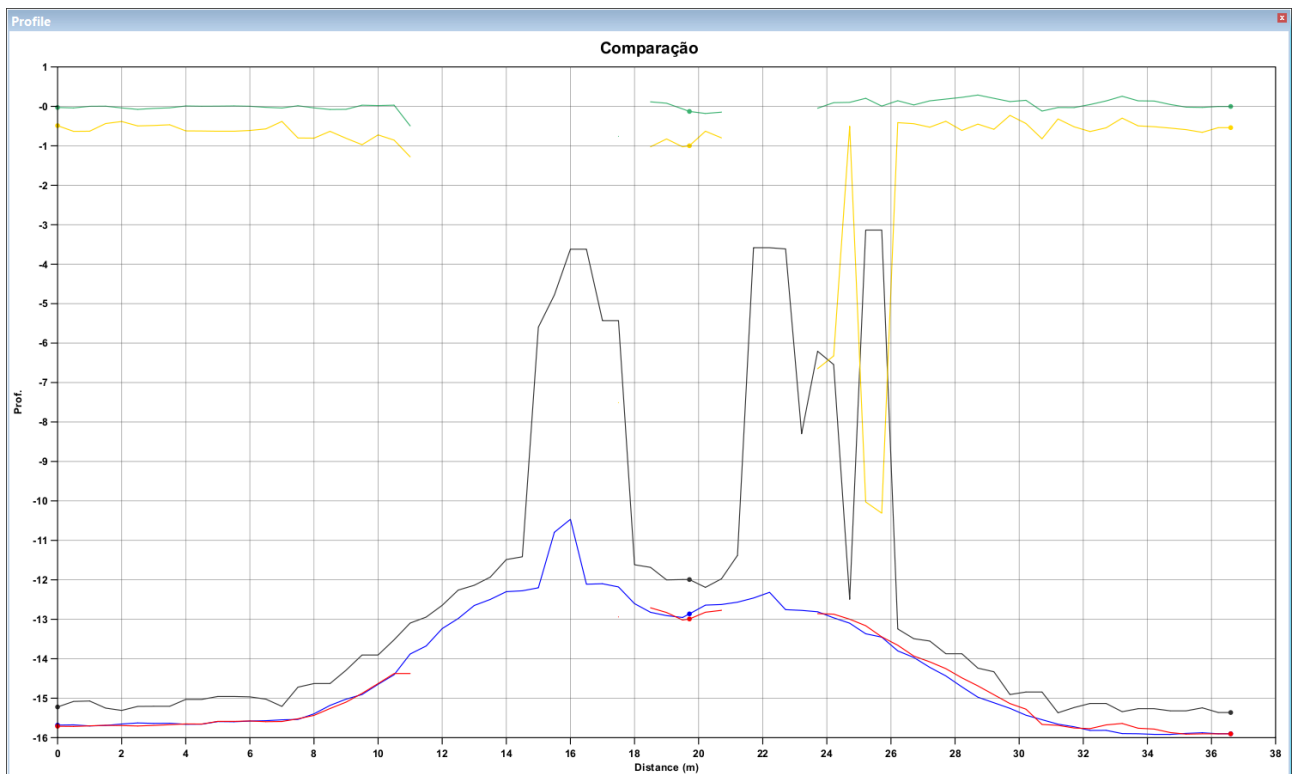


Figura 77 – Perfil 3. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

4.3.1 Conclusões da Área 3

Após a visualização dos resultados pelas ferramentas de comparação, pode-se concluir o seguinte:

1. Nas áreas planas, a superfície calculada $Shoal_{HP/PDBS}$ pôde melhor estimar os dados a serem exportados para a Carta Náutica do que a $Shoal_{PDBS}$;
2. Nas áreas de grande variação vertical, ao utilizar o método, perde-se uma das grandes vantagens do interferométrico que foi apontada em Pimentel (2018), que é a capacidade de bem estimar feições que se pronunciam para fora da linha d'água;
3. Esta conclusão é perceptível por meio da visualização da Figura 69, na qual a camada $Shoal_{PDBS}$ estimou os valores de batimetria dos pilares da ponte até quase a superfície (0,5 m), enquanto a camada $Shoal_{HP/PDBS}$ estimou essas mesmas feições como tendo entre 11 e 12 m;
4. Diferentemente da área 1, não é possível o imageamento do topo das feições, de forma que as áreas mais inclinadas sejam absorvidas pela generalização cartográfica e a representação gráfica permaneça a mesma nas duas tecnologias. Ao contrário, o valor ficará com sua representação aquém do que se sabe ser real;
5. A pergunta que surge é se tal fato é uma limitação ao método proposto. Para responder a esta pergunta é necessário ter em mente o objetivo: a construção da Carta Náutica;
6. Ao construir a carta náutica, os pilares seriam encobertos pela simbologia de ponte (símbolos D-20 a D-24, (DHN), 2014)) (Figura 78). Sua batimetria não seria colocada na carta, pois sabe-se que seu valor é 0 m, ou seja, ele se projeta para além da superfície da água. Tal *modus operandis* não se limita a ponte, cabendo para qualquer material que venha a ser percebido para fora da água, sendo representado por um símbolo específico e não pelo seu valor batimétrico;
7. Por isso, em situações como essas, o método pode ser aplicado, pois os limites das feições serão determinados por outras formas, mormente imagem satélite, aerofotogrametria ou rastreamento GPS;
8. Entretanto não significa que esta vantagem do interferométrico é descartada. Em situações de estudo da morfologia do fundo, feições submersas ou para condição de contorno de modelos, é útil que todas as feições venham a ser representadas; e
9. Ainda em LH, visando a segurança da navegação, e em cartografia, tal vantagem é útil para detecção de objetos que sejam muito pronunciados no eixo Z e que tenham uma pequena seção reta na projeção no plano XY (horizontal) (Figura 79). Nessas situações, dificilmente o topo da feição seria imageado e ele seria apenas percebido por sua projeção vertical, sendo provavelmente quantificado apenas na $Shoal_{PDBS}$. Objetos que se encontram nessa situação são

os mastros de navios naufragados (cascos soçobrados) que possam vir a se tornar perigos à navegação. Tal aspecto será abordado no próximo item.

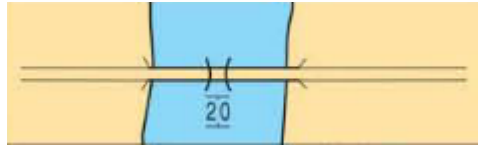


Figura 78 – Exemplo de simbolização de “ponte fixa com vão livre vertical” de 20 m. Símbolo D-22. Fonte: ((DHN, 2014).

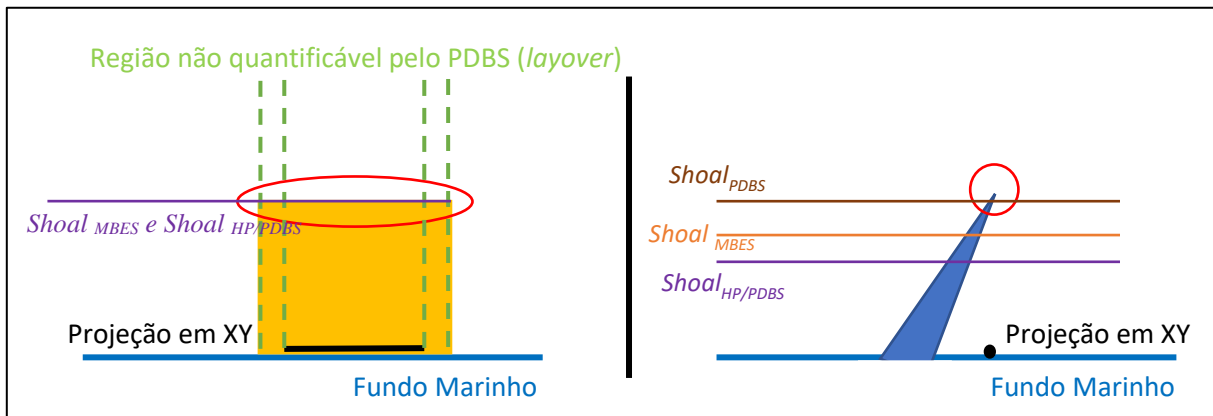


Figura 79 – Detecção de objetos submersos. Desenho esquemático de como é a projeção do topo de uma feição no plano XY, simulando uma rocha (esquerda) e um mastro submerso (direita).

4.4. ÁREA 4

A área 4 foi projetada para avaliar a capacidade em representar objetos naufragados que tenham uma projeção vertical pronunciada, mas sem chegar ao lume d’água, como no caso da área anterior. Para tal, foi imageado um casco soçobrado.

Enquanto a superfície oriunda do PDBS apresenta, em média, entre 2 e 8 hipóteses, a do MBES tem seu valor centrado em 1 (Figura 80), com variações na área da feição de interesse, com esse número variando entre 2 e 4⁶¹.

⁶¹ A questão da quantidade de hipótese, apresentada como premissa, será mais bem debatida na seção seguinte, a 4.4.1. Em nenhuma área ainda, o CUBE, para o multifeixe, tinha calculado mais de 1 hipótese para a estimativa de profundidade. Como ver-se-á adiante, foi necessário a adoção de procedimentos novos em prol de não negligenciar a

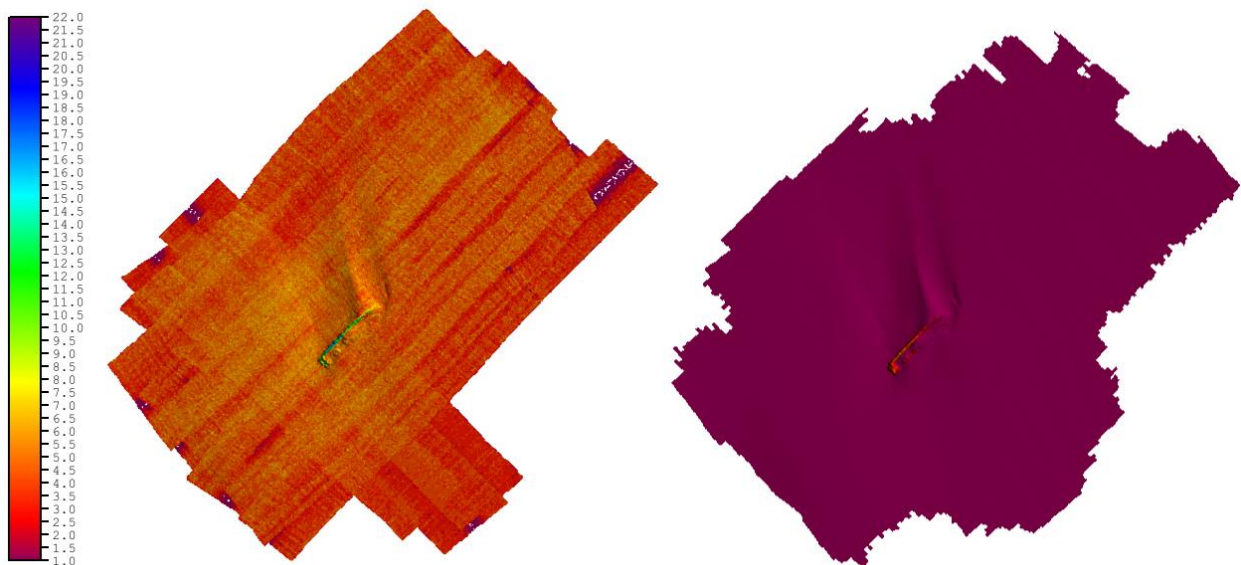


Figura 80 – Superfícies com a visualização por quantidade de hipóteses (camada Hypothesis_Count). A escala está em número de hipóteses. A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES.

Em termos da estimativa da batimetria local, é possível observar grande similitude entre as superfícies (Figura 81), com o desvio padrão da hipótese oscilando em torno de 0,1 m no PDBS e entre 0 e 0,1 m no MBES (Figura 82). Exceções são perceptíveis no objeto submerso.

segurança da navegação. Assim, infere-se que em áreas onde o MBES encontra mais de uma hipótese, soluções análogas terão que ser adotadas.

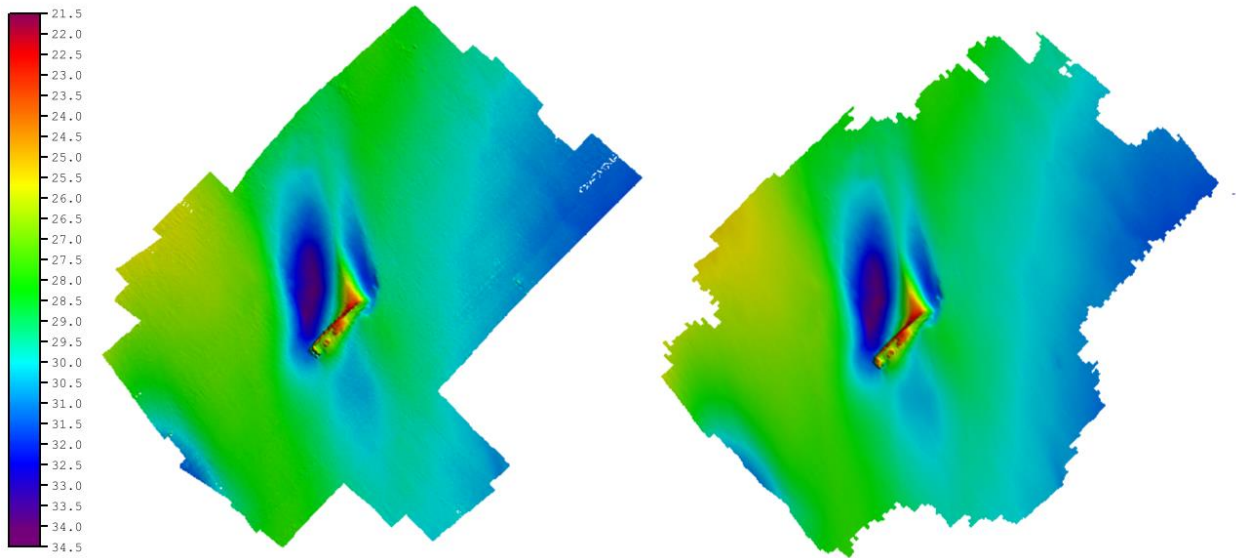


Figura 81 – Superfícies com a visualização da profundidade (camada Depth). A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES. Escala em metros.

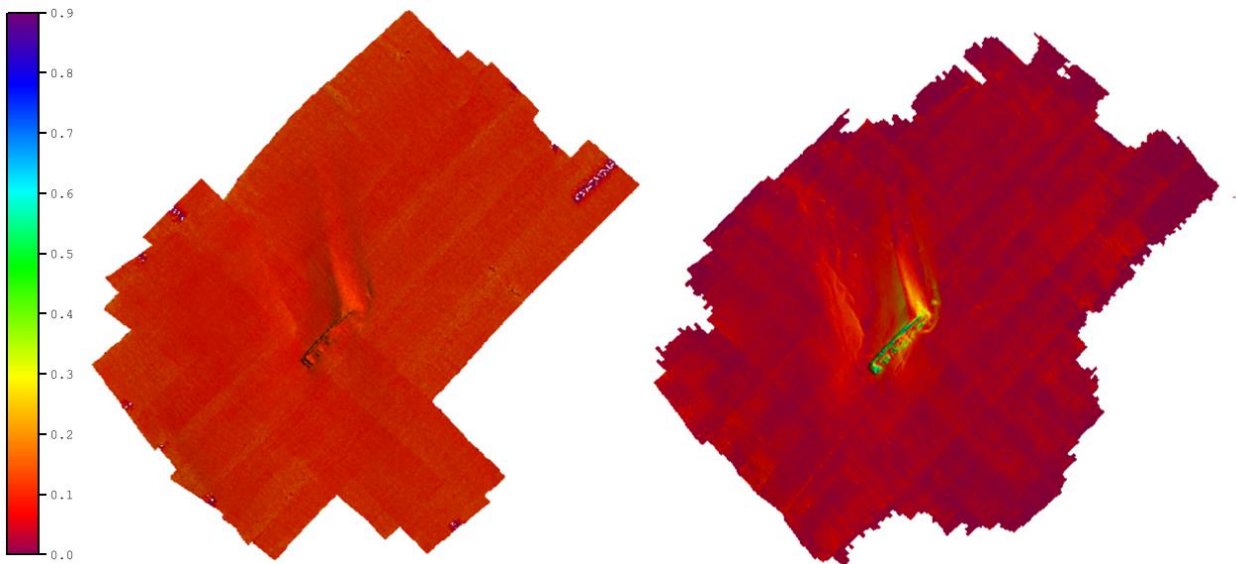


Figura 82 – Superfícies com o desvio padrão (1,96x) da profundidade da hipótese (camada Std_Dev). A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES. Escala em metros.

A próxima etapa é o cálculo da camada $Shoal_{HP/MBES}$ (Figura 83) e verificar sua coerência com a $Shoal_{MBES}$ (Figura 84). A média das diferenças é 0,036 m, com a dispersão dos seus valores

explicitada por meio do histograma (Figura 85). Nesta área, nas proximidades das partes conspícuas do casco soçobrado, é possível observar as diferenças oscilando majoritariamente entre 4 e 6 m (segundo quadro da Figura 84). Por mais que se observe que o histograma mostre que a maioria dos valores se concentrem no 0 (o que corresponde a parte plana), não se pode desconsiderar a presença de grandes diferenças, principalmente neste passo da metodologia, onde esta verificação é vital para o prosseguimento de sua aplicação.

Observa-se que a primeira validação se mostrou positiva para quase toda a área, sendo, contudo, necessário ter cautela para com a feição de interesse. Pode-se dizer que ela foi validada com ressalvas, o que faz sentido, pois uma das premissas, que é a quantidade de hipóteses do MBES ser 1, também não se consolidou, exatamente nas mesmas localidades em que as diferenças possuem o valor aumentado. Assim, optou-se por continuar a aplicação da metodologia, com o casco permanecendo sob análise.

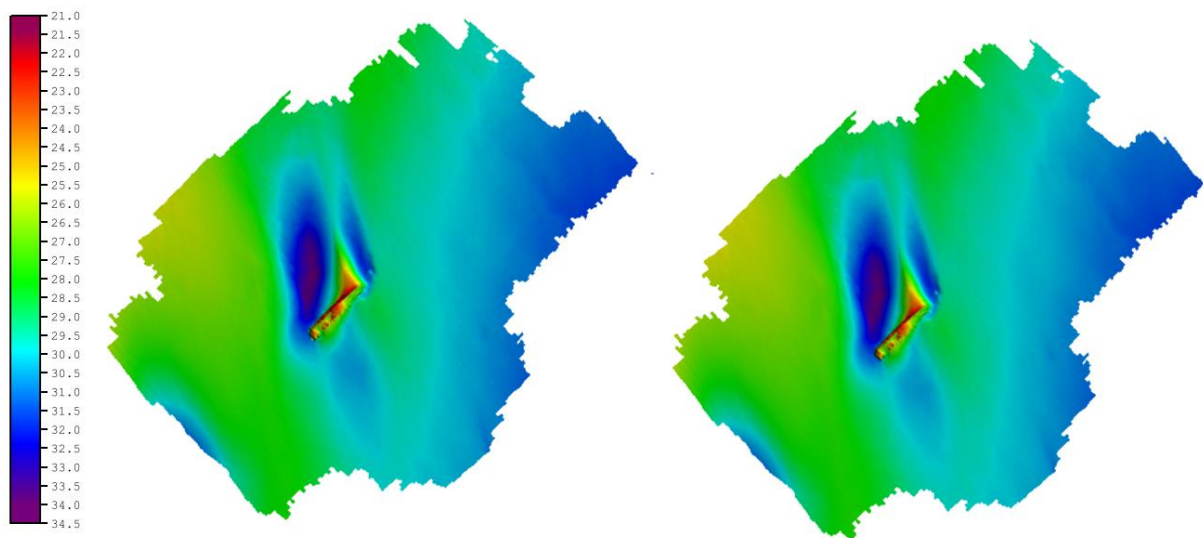


Figura 83 – Camadas da superfície MBES. A da esquerda é a camada Shoal, a da direita é Shoal_{HP}. Escala em metros.

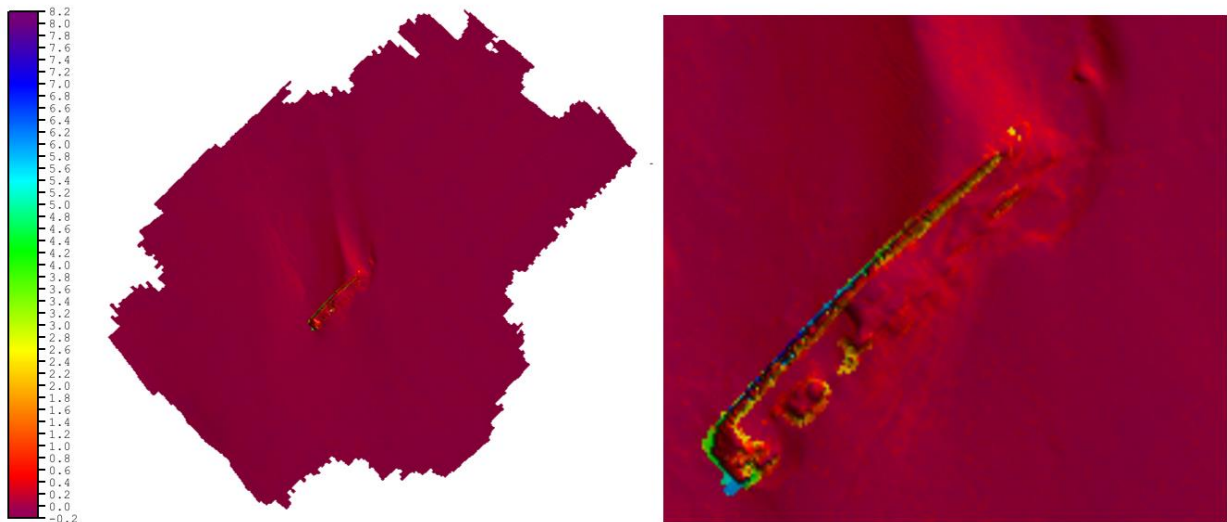


Figura 84 – Diferença entra as camadas Shoal e Shoal_{HP} da superfície MBES. Escala em metros.

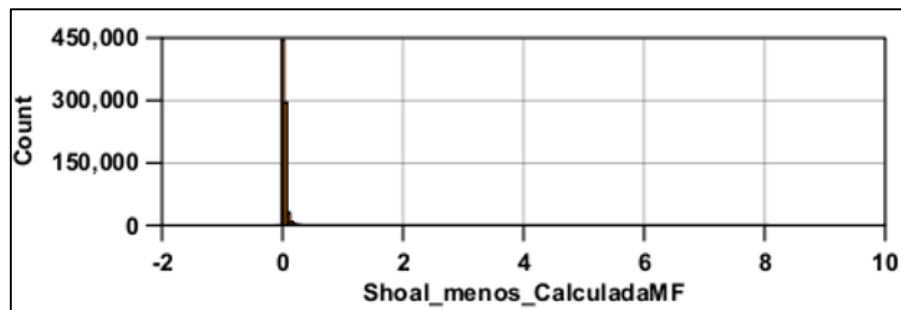


Figura 85 – Histograma da diferença entra as camadas Shoal e Shoal_{HP}. O tamanho de cada faixa de comparação é 5 cm. Escala em metros.

Em sequência, aplica-se o mesmo cálculo com a superfície PDBS (Figura 86) e compara-a com a camada $Shoal_{MBES}$ (Figura 87). Devido a discrepância das diferenças, para uma melhor dimensão dos valores, faz-se mister trabalhar na mesma escala de cores (Figura 88). A média entre as células da superfície ($Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$) é 0,1 m, enquanto a da ($Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$) é 0,6 m. Suas distribuições podem ser visualizadas através dos histogramas (Figura 89), onde a primeira superfície tem um valor mais centrado no 0, além do gráfico mais fino, nos mesmos moldes das outras áreas analisadas. A grande contribuição, pelo que se investigou até agora, se deve às regiões mais planas, contudo, como comentado acima, é necessário maior atenção para com o casco soçobrado.

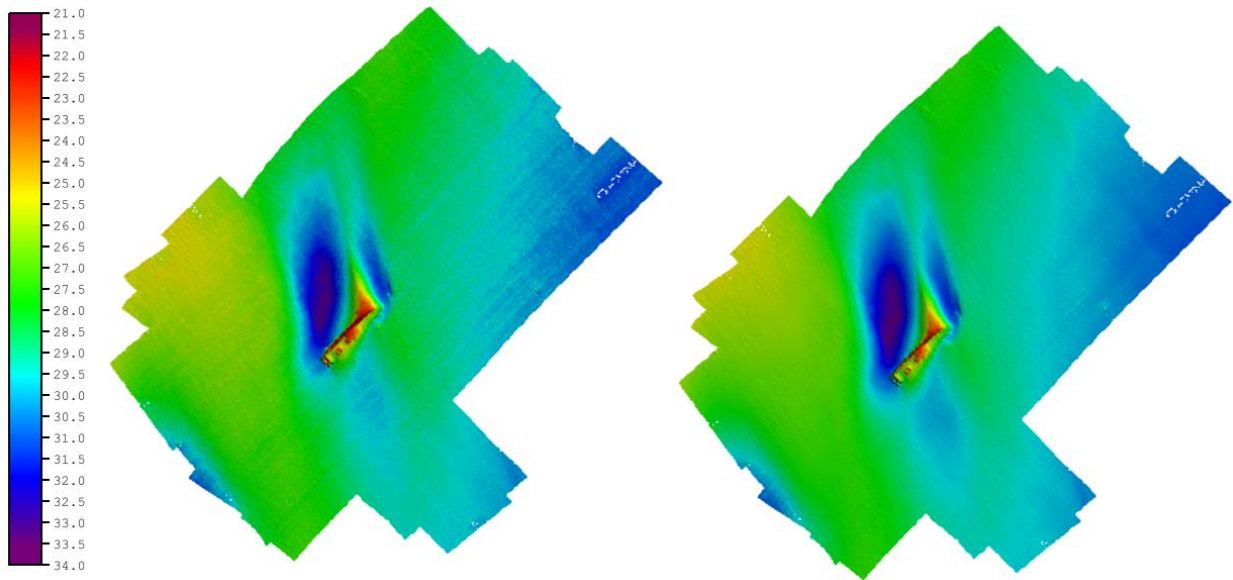


Figura 86 – Camadas da superfície PDBS. A da esquerda é a camada Shoal, a da direita é ShoalHP. Escala em metros.

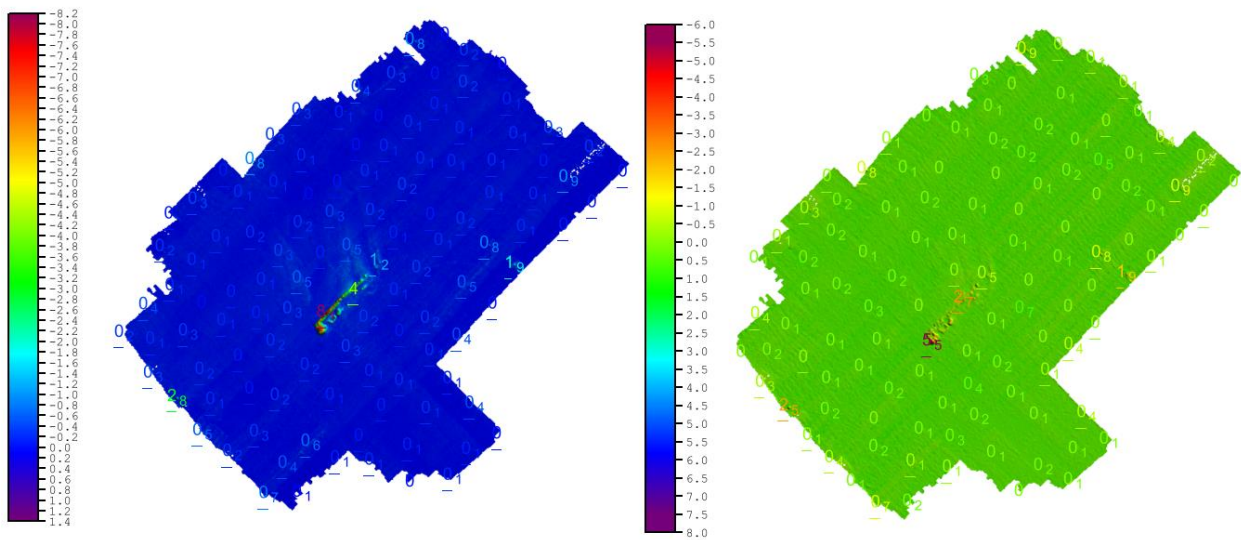


Figura 87 – Superfícies diferença. A da esquerda é Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}. A da direita é Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}. Escala em metros. Os dígitos funcionam como uma seleção de sondagens, mostrando os pontos onde as diferenças possuem maior valor. Devido as diferenças entre as superfícies serem grandes, a escala de cores é diferente.

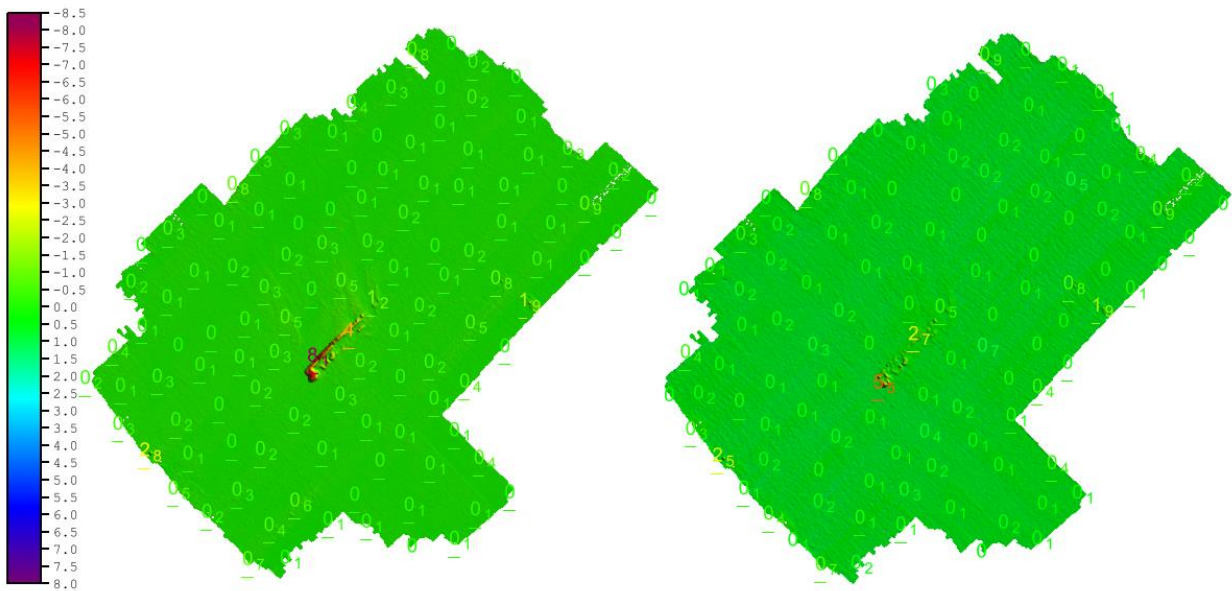


Figura 88 – Superfícies diferença. A da esquerda é $Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$. A da direita é $Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$. Escala em metros. Os dígitos funcionam como uma seleção de sondagens, mostrando os pontos onde as diferenças possuem maior valor. Mesma escala de cores.

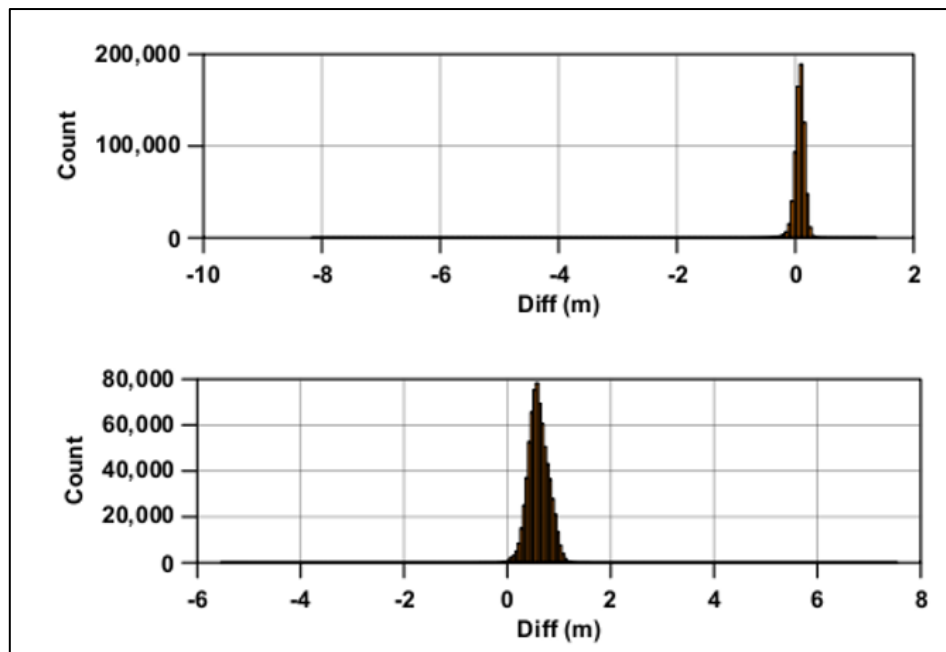


Figura 89 – Histograma dos valores das células das superfícies diferença. A de cima é $Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$. A de baixo é $Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$. O tamanho de cada faixa de comparação é 5 cm. Escala em metros.

Tanto pelas figuras acima, quanto pela Figura 90, constata-se que, de forma diferente das outras áreas, a superfície $Shoal_{HP/PDBS}$ não quantificou tão bem as regiões mais conspícuas quanto as outras camadas. Tal conclusão corrobora com a explanação realizada na Figura 79, onde as feições de grande projeção vertical tendem a ser hipoquantificadas na aplicação do método. Tal efeito pode ser mais bem explicitado por meio dos perfis.

Os dois primeiros apresentam cortes longitudinais ao casco soçobrado. Na Figura 92, observa-se que as camadas $Shoal_{MBES}$ e $Shoal_{PDBS}$ se assemelham, enquanto a $Shoal_{HP/PDBS}$ oscila entre diferenças de que vão de 0 a 8 m para com as camadas anteriormente citadas. Vale ressaltar que este efeito é similar ao do perfil mostrado na Figura 44, pois essa parte do casco tem o efeito similar a uma borda, mas por ser maior e contínuo, a $Shoal_{PDBS}$ também é capaz de quantificá-la, sem o prejuízo proporcionado pelo *layover*. Já o perfil 2 tem uma característica mais plana, com gradientes menos abruptos. Nesse caso, a camada calculada propõe uma boa solução batimétrica.

Os três perfis seguintes são cortes transversais, contudo se observa efeito semelhante aos dos cortes longitudinais. O perfil 3 guarda semelhança com o 1 e os perfis 4 e 5 com o perfil 2. Isso vem a mostrar como é a resolução batimétrica das camadas para as feições mais conspícuas, corroborando o que já era esperado e que foi explanado na Figura 79.

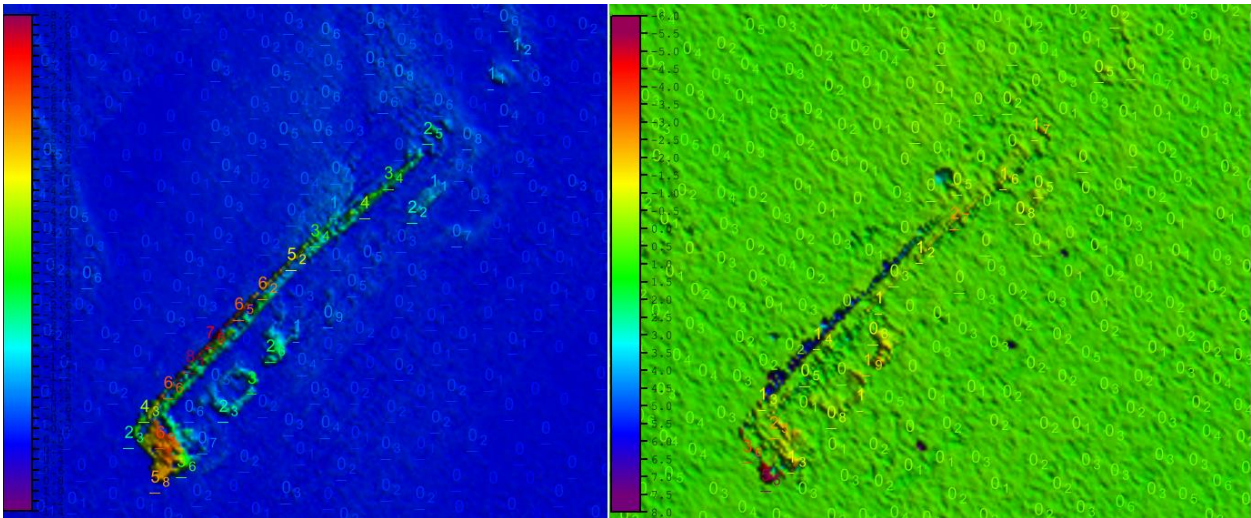


Figura 90 – Visualização ampliada do casco soçobrado. Superfícies diferença. A da esquerda é $Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$. A da direita é $Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$. Escala em metros. Os dígitos funcionam como uma seleção de sondagens, mostrando os pontos onde as diferenças possuem maior valor.

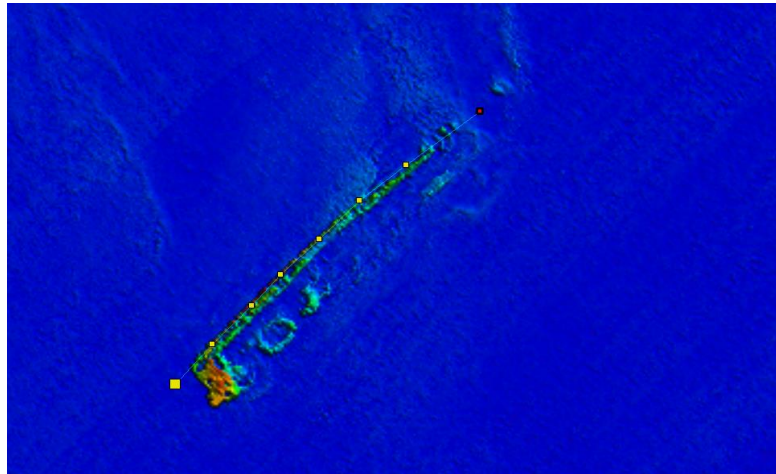


Figura 91 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 1.

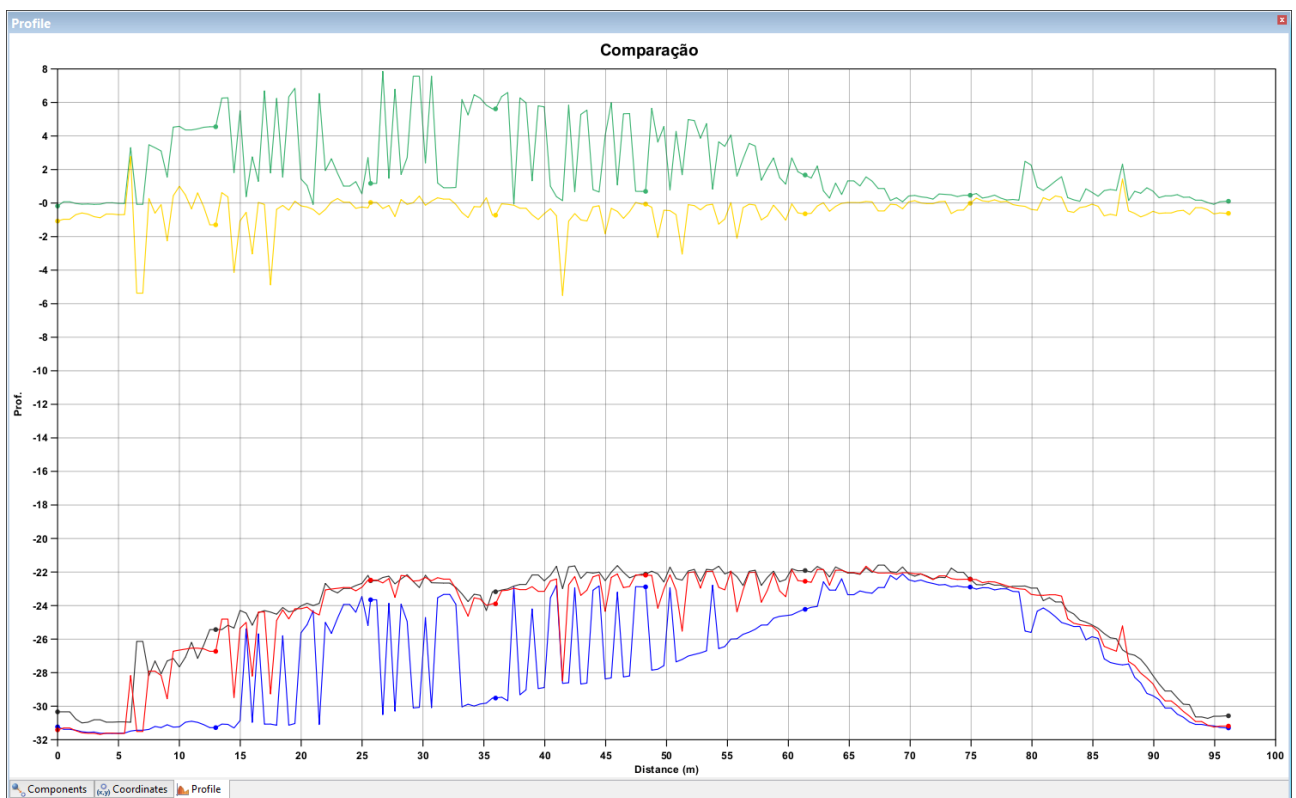


Figura 92 – Perfil 1. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

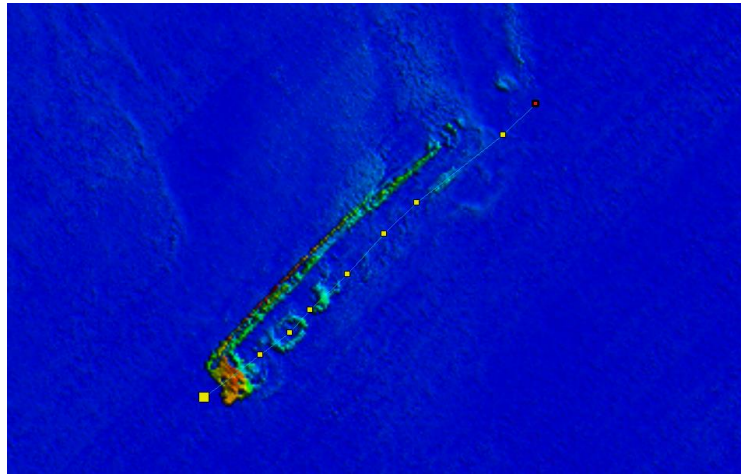


Figura 93 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 2.

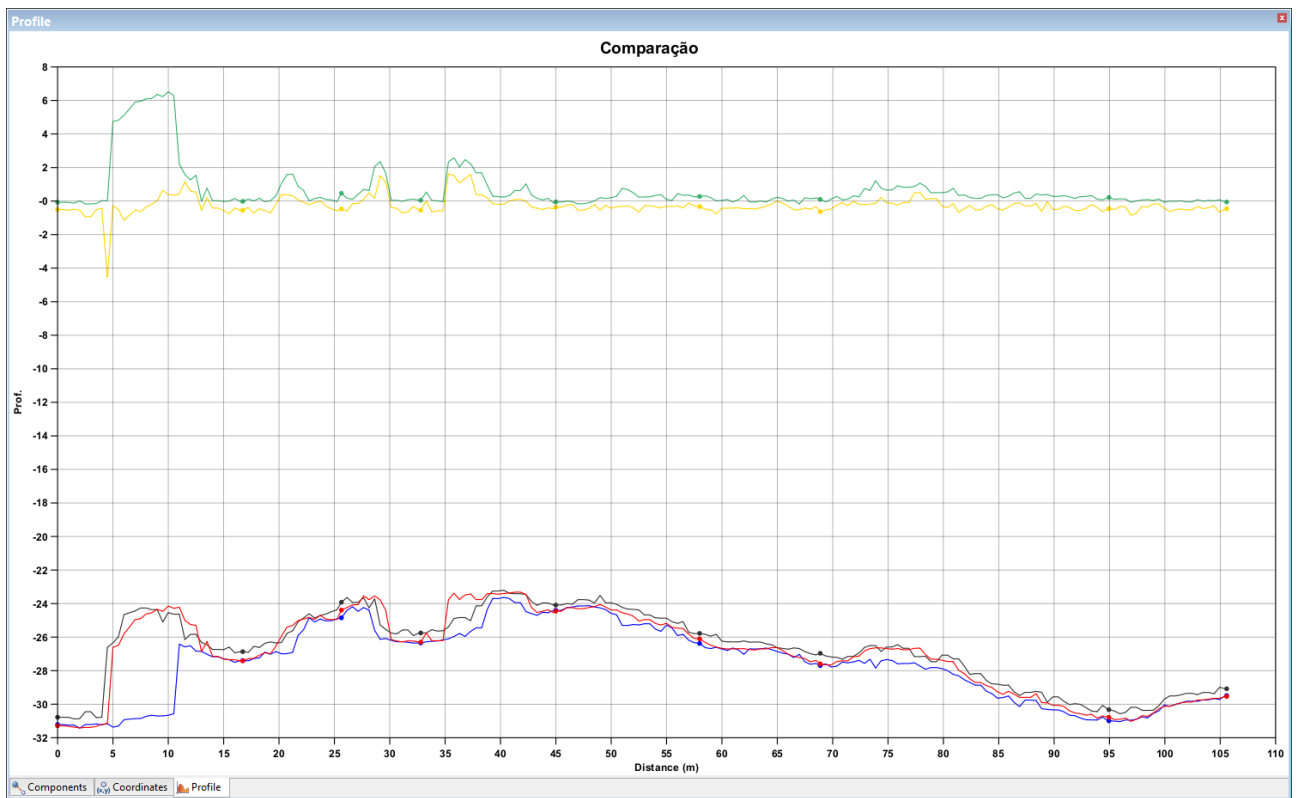


Figura 94 – Perfil 2. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

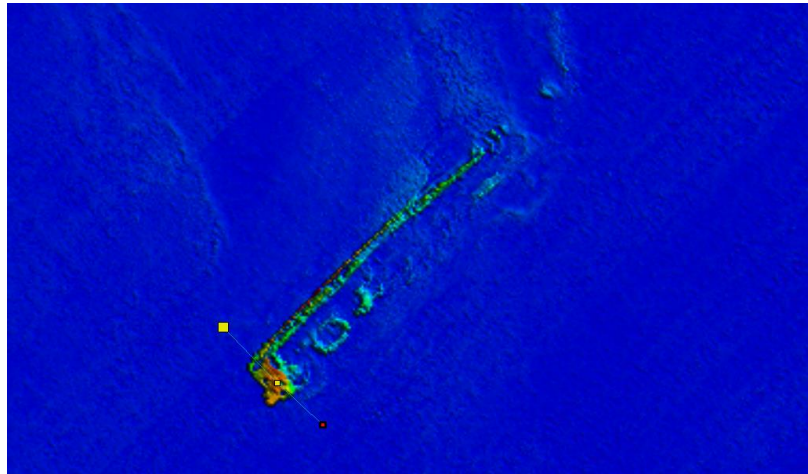


Figura 95 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 3.

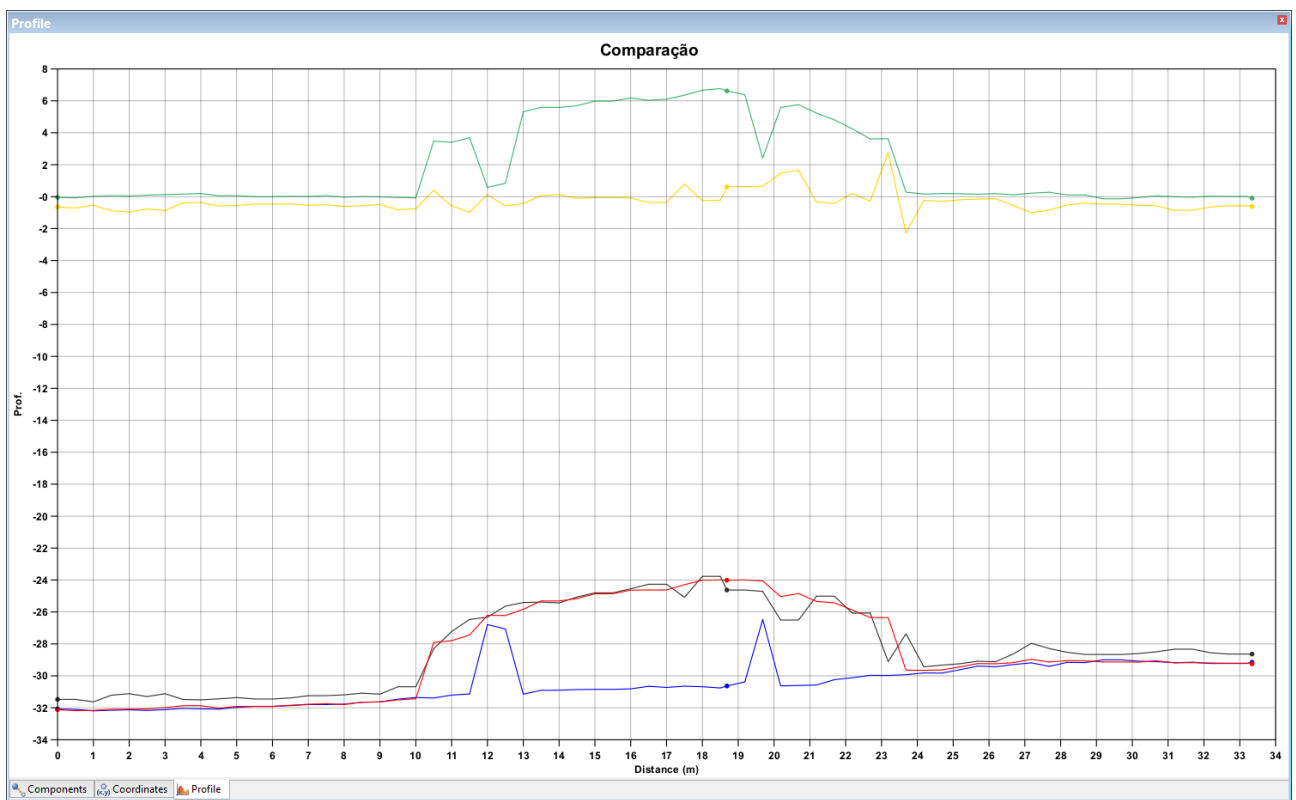


Figura 96 – Perfil 3. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

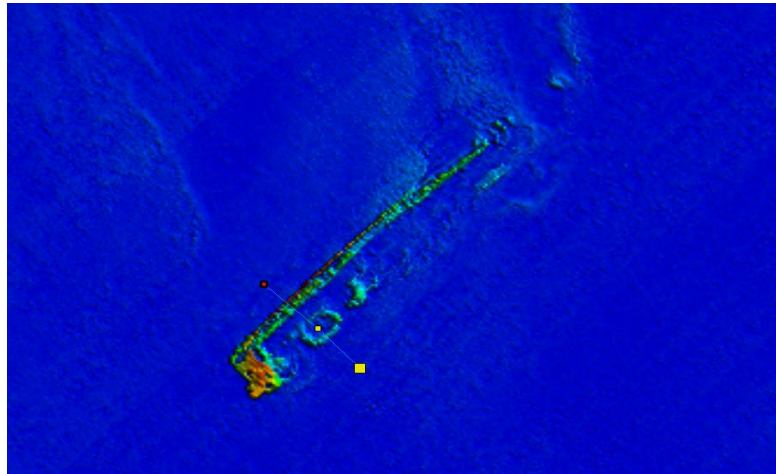


Figura 97 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 4.

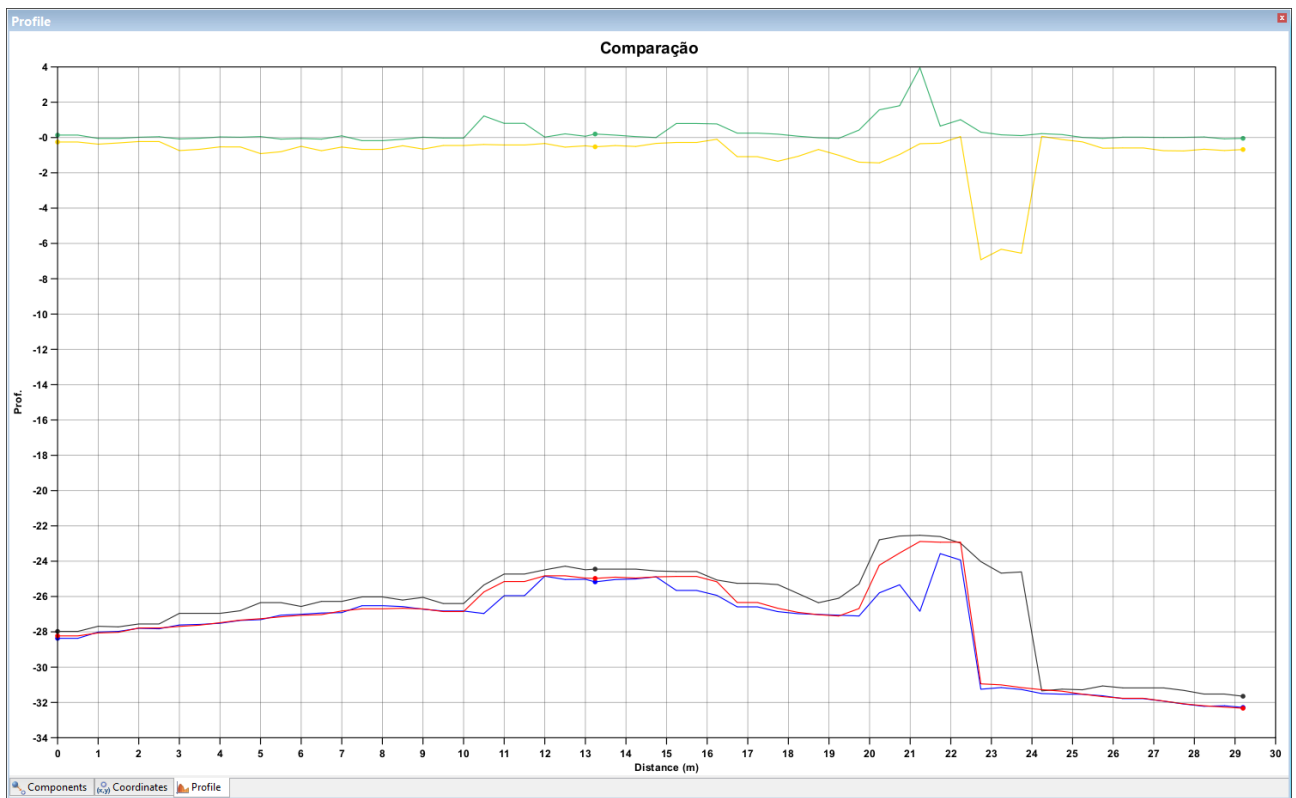


Figura 98 – Perfil 4. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

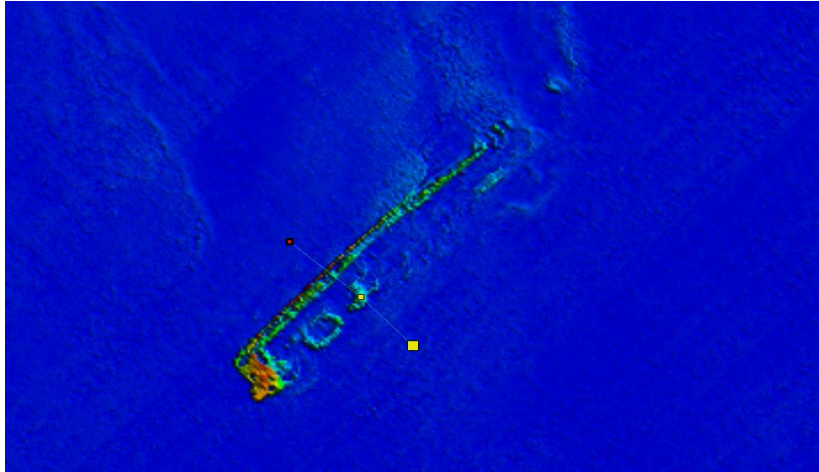


Figura 99 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 5.

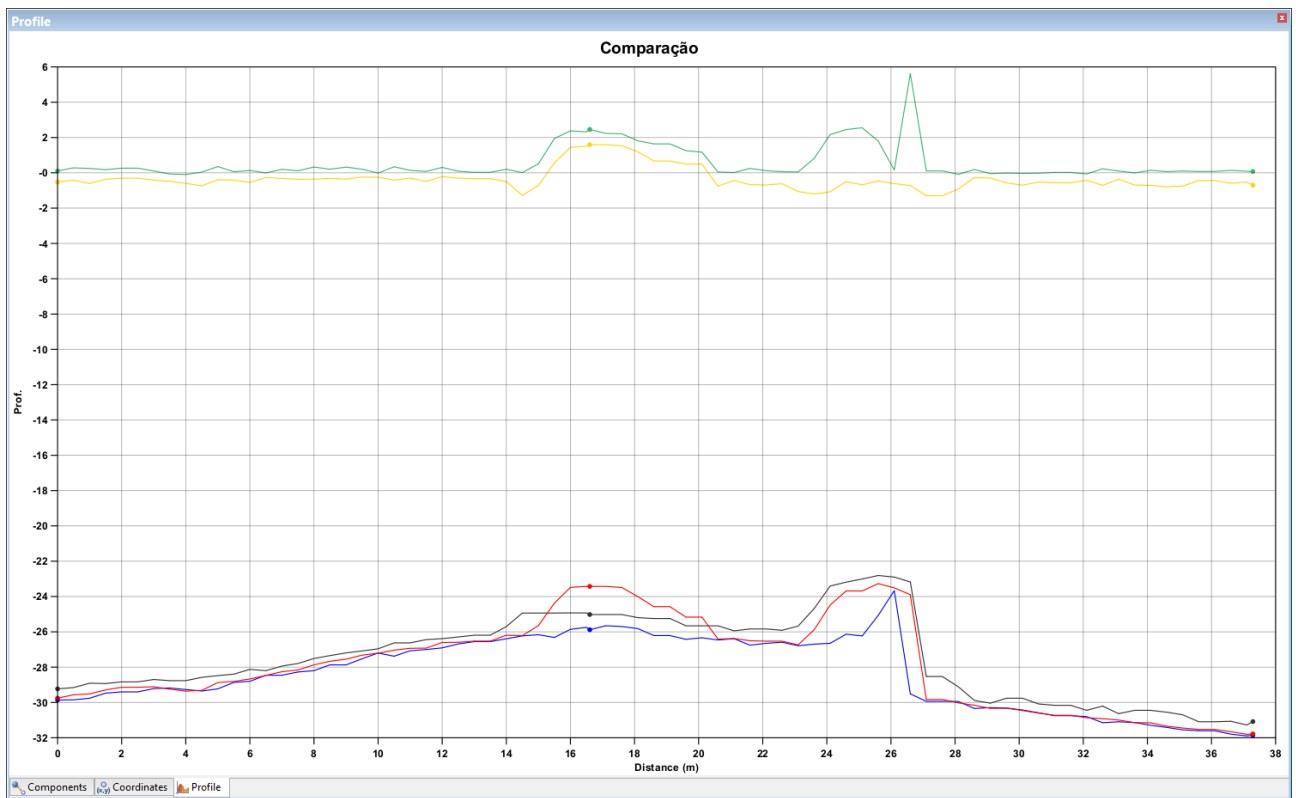


Figura 100 – Perfil 5. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

4.4.1 Conclusão da Área 4

Com a análise das camadas, superfícies diferença e perfis, pode-se concluir o seguinte:

1. Nas partes planas ou com menores gradientes, vê-se o mesmo observado em todas as áreas;
2. Quando se analisa o casco soçobrado, as superfícies se comportam de maneiras diferentes, dependendo da característica predominante, sendo um objeto de estudo complexo. Ele funciona como tendo o mesmo efeito de grandes bordas em algumas partes e em outras como áreas planas ou de pequeno gradiente;
3. As partes que são mais planas estão representadas nos perfis 2, 4 e 5. As partes mais conspícuas (perfis 1 e 3) funcionam como bordas de objetos, com a peculiaridade de não se estabilizar nas menores profundidades, como seria o comportamento esperado em um afloramento rochoso;
4. Nessas áreas, a camada $Depth_{PDBS}$, ao ser subtraída da incerteza da hipótese, não tem como representar profundidades que seriam equivalentes à $Shoal_{MBES}$. A camada $Shoal_{HP/PDBS}$ é dependente da estimativa do CUBE. Quando existem muitas hipóteses, a resolução de ambiguidades pode acabar fornecendo um resultado que acabe não contemplando as partes mais críticas das feições conspícuas;
5. Uma forma de mitigar este efeito, seria alterar os parâmetros de resolução de desambiguidades, de forma a buscar resultados mais condizentes. Ao adotar tal procedimento, incorre-se no risco de deteriorar a estimativa das áreas planas;
6. Uma solução é criar uma camada com *pings* obrigatórios de serem representados na superfície. Tal procedimento é possível por meio da atribuição do status de “*designated*” a uma profundidade que se considera imprescindível de ser representada na Carta Náutica (CARIS, 2017). A partir daí, esse *ping* pode ser tratado como tendo uma camada própria para ser exportado ou pode ser integrado à camada *Depth*;
7. Uma vez que a $Shoal_{HP/PDBS}$ é criada a partir da *Depth*, as profundidades mais rasas estariam representadas nos nós correspondentes à suas posições. Ocorre que os nós adjacentes ainda estariam mais profundos, criando uma morfologia que não é natural;
8. De fato, seria criado um adendo na superfície, contudo o método deve ser aplicado em vista do seu fim (produção cartográfica) e, neste quesito, satisfaz a condição primordial que é representar as feições que apresentam potenciais riscos a navegação;
9. Por fim, faz-se mister ressaltar a necessidade da constante avaliação dos dados e superfícies por parte do operador. A ilusão do automatismo puro e simples empolgou muitos estudiosos,

mas os pesquisadores concordam em afirmar que a aquisição, processamento, controle de qualidade e generalização cartográfica são processos, no máximo, semiautomáticos, onde a **interferência humana é necessária**.

4.5. ÁREA 5

A área 5 foi designada para verificar a eficiência de sondagem do PDBS, principalmente no que tange às áreas mais rasas. Nesse objetivo, foi sondada uma área nas proximidades da DHN, em uma região que oscila entre 3 e 26 metros de profundidade. Durante o trabalho desenvolvido na dissertação de Mestrado, foi constatado que a cobertura do PDBS apresenta vantagens em relação ao MBES em áreas cada vez menos profundas, mormente menores que 15 metros. Assim, neste trabalho, resolveu-se dar foco nessas profundidades (Figura 101).

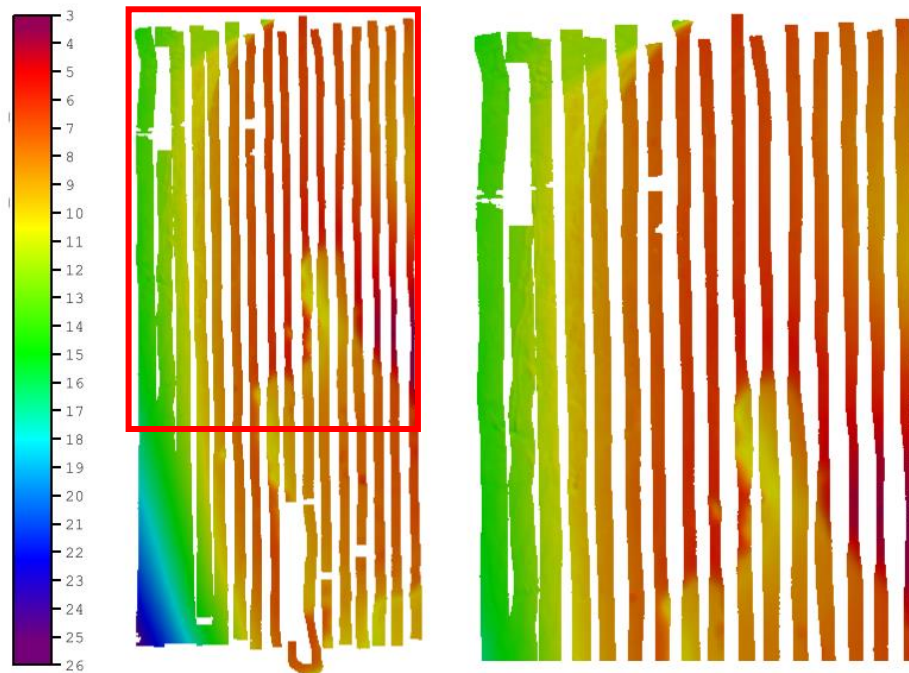


Figura 101 – Superfície MBES, camada Depth. O quadrado vermelho mostra a área onde será dada melhor visualização. O quadro da direita mostra esta área ampliada.

Outra peculiaridade desta área é a ausência de superposição de linhas. Existem, basicamente, duas formas de verificar a eficiência em sondagem. Em quanto tempo se sonda uma determinada área ou quantos por cento de uma área é sondada em determinado tempo. Foi escolhida a última. Dessa forma, em prol de maximizar a eficiência, optou-se por não haver superposição de linhas. Tal decisão acarretará uma série de observações que não foram abarcadas nas áreas anteriores, pois a maior densidade amostral do fundo elimina a influência de alguns efeitos. Assim, a aplicação da metodologia visa mostrar uma maior similitude entre as superfícies *Shoal_{MBES}* e *Shoal_{HP/PDBS}* do que observado com a *Shoal_{PDBS}*. Seus dados não serão usados para maiores estatísticas e conclusões.

Prosseguindo no método, observa-se que a quantidade de hipóteses do PDBS varia entre 1 e 6 e no MBES o valor é uniformemente 1 (Figura 102). Como existem áreas sem superposição, observa-se um aspecto interessante. O centro de varredura de uma linha com o PDBS está sujeito ao *layover effect* e não apresenta solução batimétrica. A partir do ponto que já é possível quantificar a batimetria, nota-se que os dados são mais coesos, tanto que a quantidade de hipóteses vai aumentando conforme a distância aumenta em direção a borda, mostrando um maior espalhamento dos dados. Tal fenômeno não ocorre no multifeixe. Isso se deve ao maior afastamento dos transdutores, gerando mais ruído, o *baseline decorrelation effect* e o *shifting footprint effect* (PIMENTEL, 2018), que são fenômenos intrínsecos à tecnologia PDBS e que não influenciam tanto o MBES.

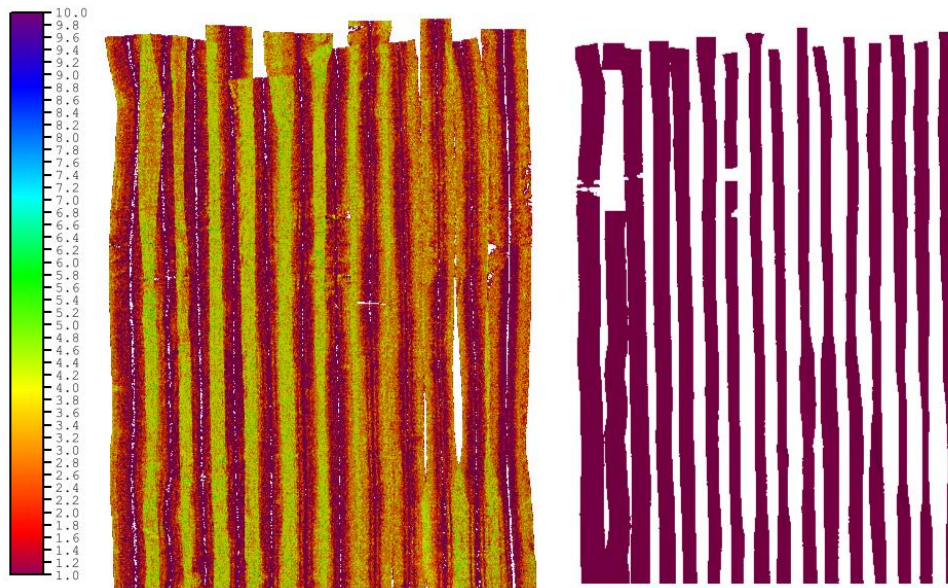


Figura 102 – Superfícies com a visualização por quantidade de hipóteses (camada Hypothesis_Count). A escala está em número de hipóteses. A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES.

No que tange a batimetria, pelo diagrama de cores, é possível observar que as estimativas de ambos os sensores estão coerentes (Figura 103). É digno de nota a dificuldade de visualizar a superfície multifeixe, devido a pequena varredura, em função da profundidade. Com relação ao desvio padrão da hipótese, na superfície MBES é aproximadamente 0, com os locais mais rasos chegando a 0,1 m. Na superfície PDBS, observa-se que esse valor varia entre 0 e 0,2 m (Figura 104). Vislumbra-se que o desvio padrão da hipótese, na área 5, é quase o dobro que nas áreas anteriores. O motivo de semelhante efeito já foi citado e se deve a não superposição de linhas, o que diminui consideravelmente a fonte de informações para a solução do CUBE.

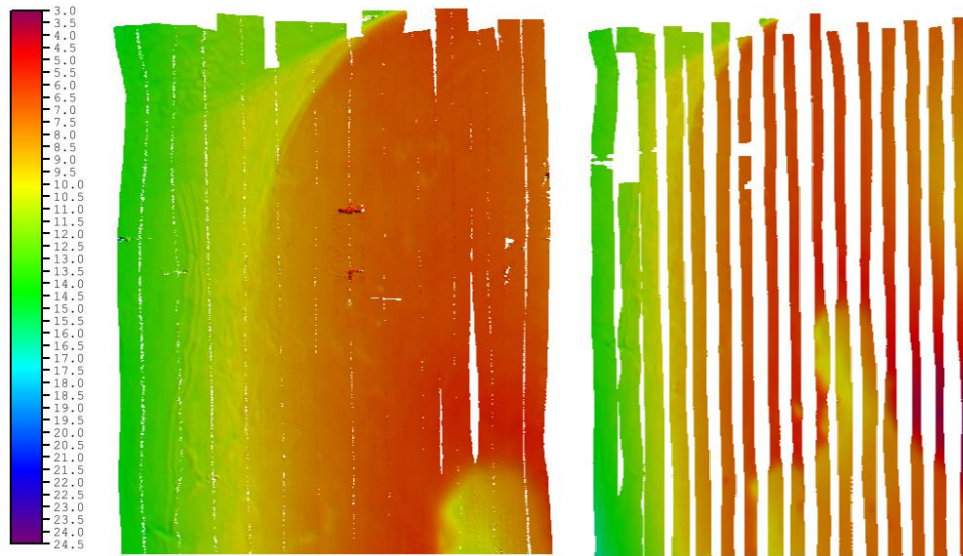


Figura 103 – Superfícies com a visualização da profundidade (camada Depth). A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES. Escala em metros.

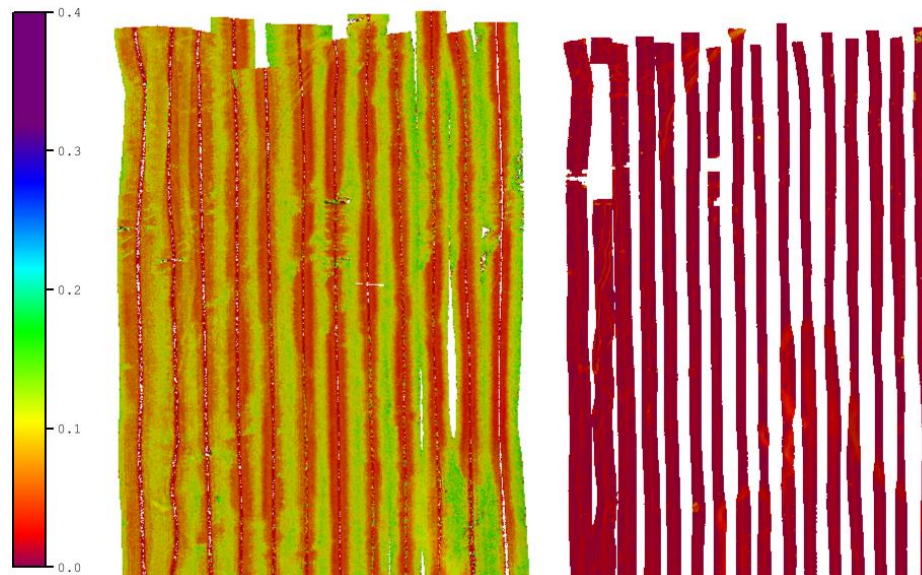


Figura 104 – Superfícies com o desvio padrão (1,96x) da profundidade da hipótese (camada Std_Dev). A da esquerda é a do PDBS e a da direita é do MBES. Escala em metros.

Em seqüência, calcula-se a camada $Shoal_{HP/MBES}$ e compara-a com a $Shoal_{MBES}$ (Figura 105). Por meio das cores de ambas as superfícies, é verificável que a diferença entre elas varia de 0 a 0,1

m (Figura 106), com a média de 0,014 m. Pelo histograma (Figura 107), observa-se como os valores se distribuem ao redor do valor 0 m.



Figura 105 – Camadas da superfície MBES. A da esquerda é a camada Shoal, a da direita é Shoal_{HR}. Escala em metros.

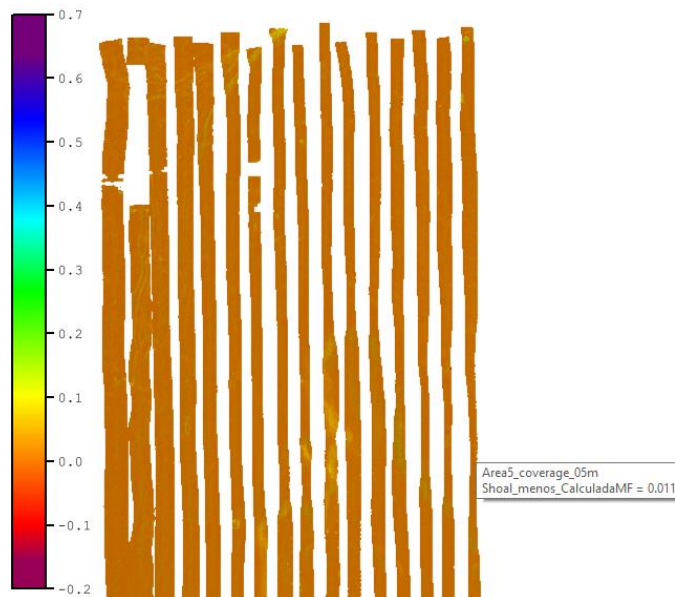


Figura 106 – Diferença entre as camadas Shoal e Shoal_{HR} da superfície MBES. Escala em metros.

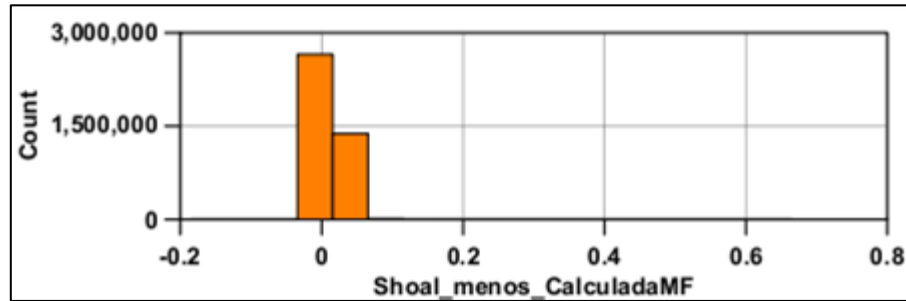


Figura 107 – Histograma da diferença entre as camadas Shoal e Shoal_{HP}. O tamanho de cada faixa de comparação é 5 cm. Escala em metros.

A partir da primeira validação, a metodologia continua a ser aplicada, calculando-se Shoal_{HP/PDBS} (Figura 108).

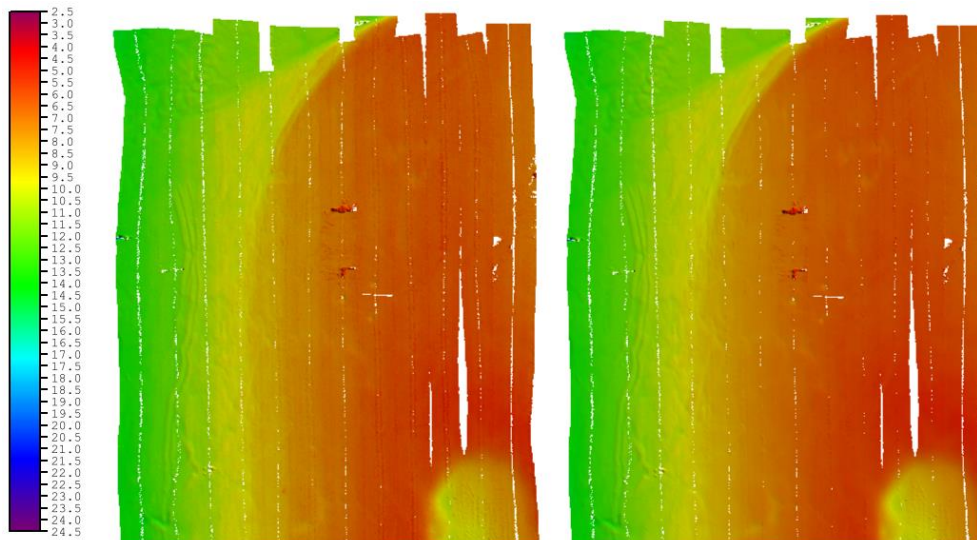


Figura 108 – Camadas da superfície PDBS. A da esquerda é a camada Shoal, a da direita é Shoal_{HP}. Escala em metros.

Para terminar o processo de validação, calcula-se a superfície Shoal_{HP/PDBS} e faz-se a comparação com a Shoal_{MBES}. Na Figura 109, estão as superfícies (Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}) e (Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}). Pode-se visualizar que, de maneira mais uniforme, a primeira superfície oscila no zero. Tal conclusão é passível de ser alcançada por meio da análise dos histogramas

(Figura 110) e médias das diferenças, sendo a da primeira superfície 0,1 m e a da segunda 0,3 m. Na área 5, observa-se um efeito adverso das outras. A diferença entre as camadas *Shoal* de ambos os sensores é 50% menor do que nas outras camadas. Acredita-se que tal razão, mais uma vez, está lastrada na falta de superposição de linhas de sondagem. Por isso, muitas de suas estatísticas não foram computadas inicialmente, nem na pesquisa realizada durante o Mestrado, como se pode ver na Tabela 1.



Figura 109 – Superfícies diferença. A da esquerda é $Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$. A da direita é $Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$. Escala em metros. Os dígitos funcionam como uma seleção de sondagens, mostrando os pontos onde as diferenças possuem maior valor.

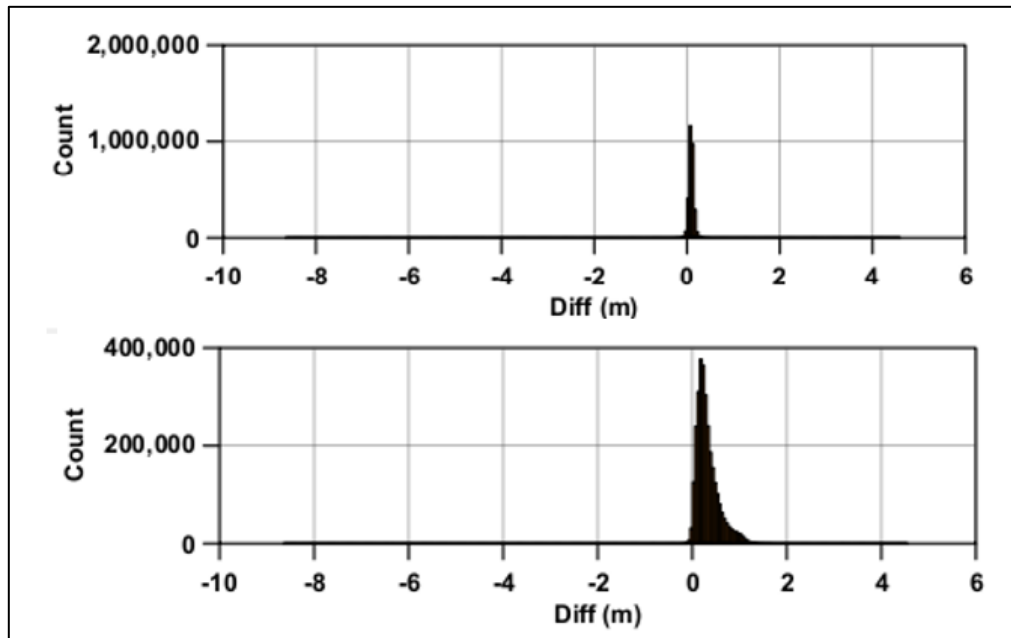


Figura 110 – Histograma dos valores das células das superfícies diferenças. A de cima é $Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$. A de baixo é $Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$. O tamanho de cada faixa de comparação é 5 cm. Escala em metros.

Pelos histogramas, é possível concluir que a diferença ($Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$) é mais delgada, mostrando mais uniformidade de valores e tem seu centro próximo ao 0. Enquanto a diferença ($Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$) segue com maior dispersão e mais centrada à direita do valor nulo. Outra ferramenta que vem a corroborar nas conclusões elencadas é a análise dos perfis. Para tal, foram escolhidos 3 perfis: o primeiro (Figura 111 e Figura 112) se situa na em local mais ao sul, no sentido leste-oeste; o segundo (Figura 113 e Figura 114) se dispõe no sentido norte-sul, se localizando mais a oeste; e o terceiro (Figura 115 e Figura 116) mantém os padrões do primeiro perfil, porém se situa mais ao norte.

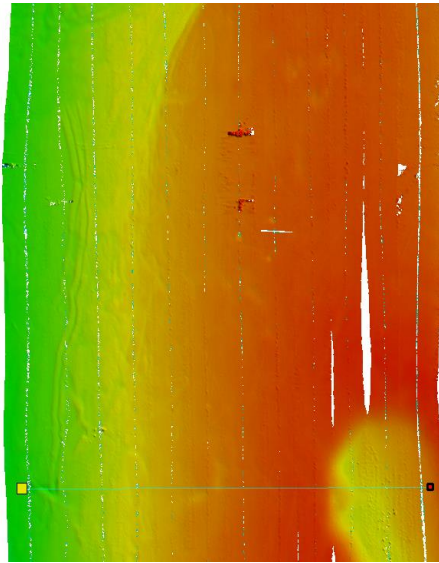


Figura 111 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 1.

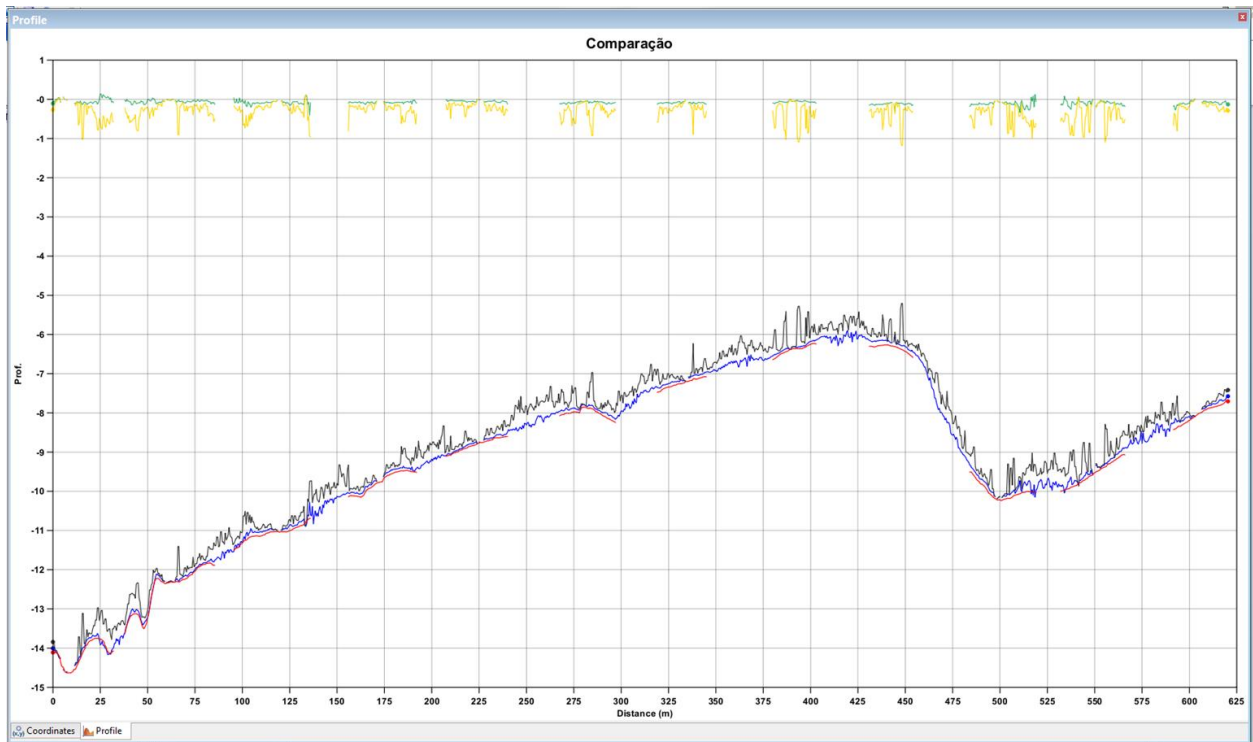


Figura 112 – Perfil 1. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

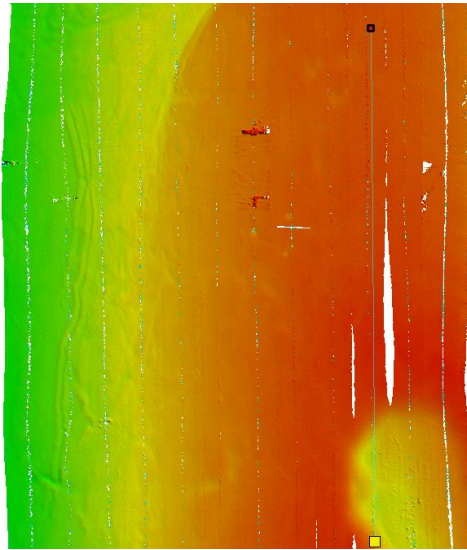


Figura 113 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 2.

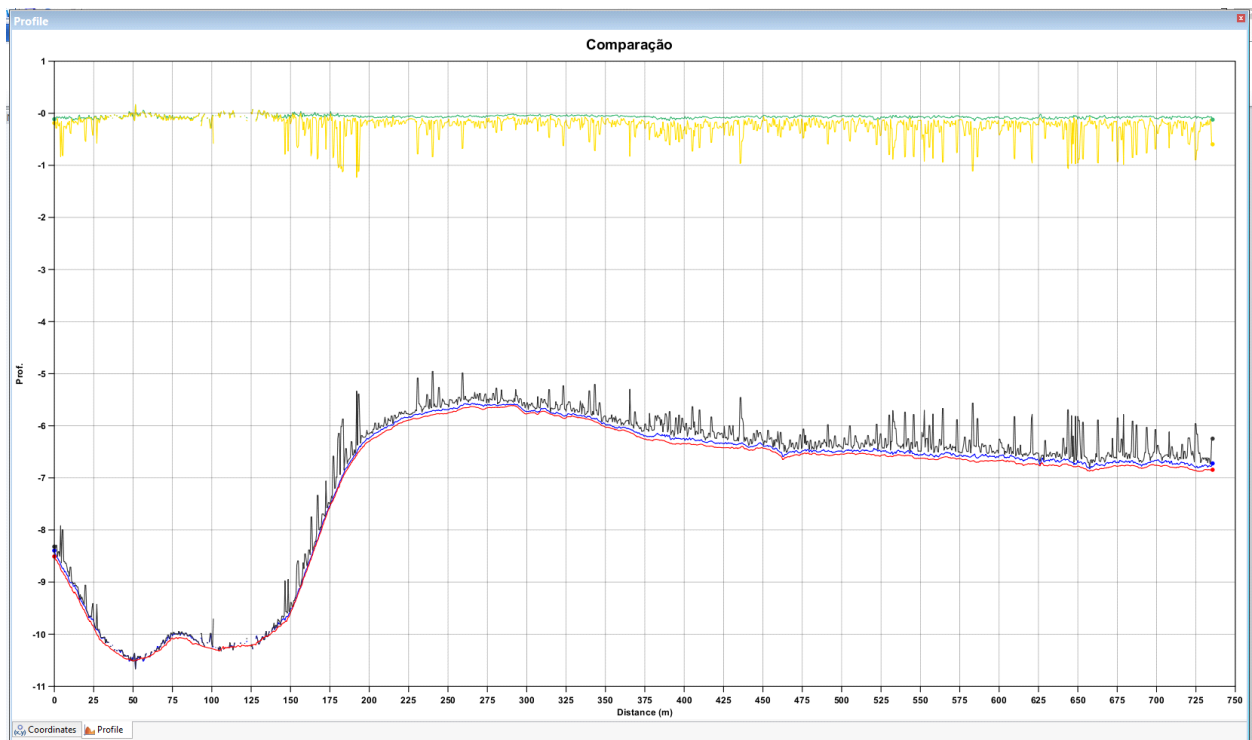


Figura 114 – Perfil 2. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

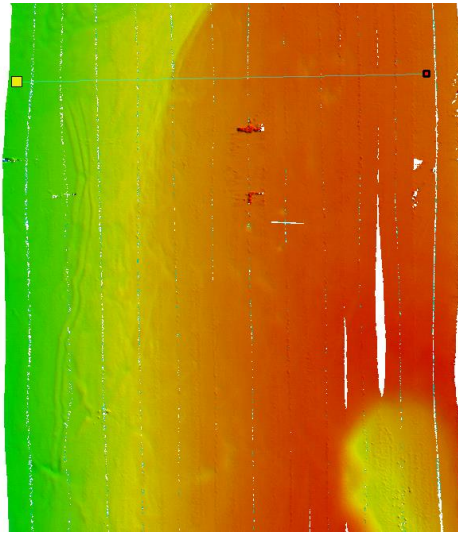


Figura 115 – Extrato da superfície onde foi realizado o perfil 3.

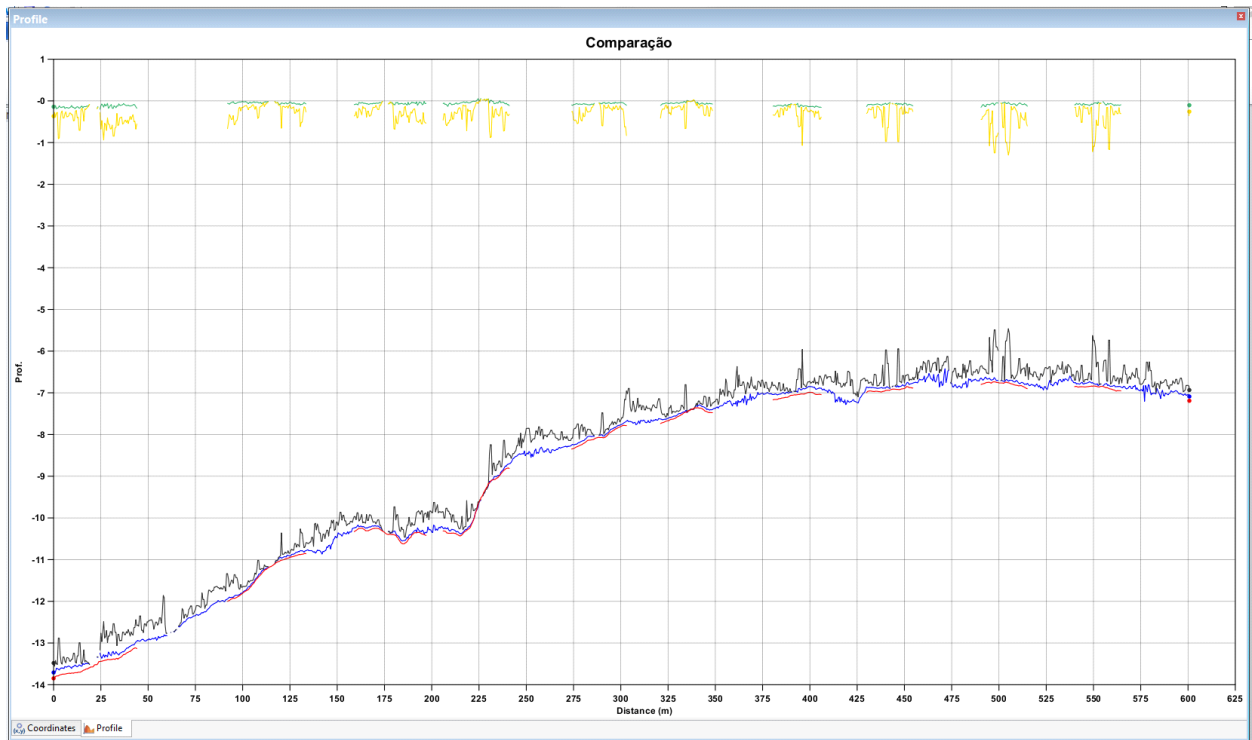


Figura 116 – Perfil 3. Legenda de cores: 1. Vermelho - Shoal do MBES; 2. Preto – Shoal do PDBS; 3. Azul – Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 4. Verde – diferença entre Shoal do MBES e Shoal da hipótese do PDBS (calculada); 5. Amarelo – diferença entre Shoal do MBES e Shoal do PDBS.

4.5.1 Conclusão da Área 5

A partir da análise das superfícies e grandezas numéricas calculadas, pode-se concluir que:

1. Esta área apresenta uma característica especial, pois praticamente não há superposição de linhas de sondagem. Tal fato pode levar ao aumento do desvio padrão da hipótese, pois existem menos *pings* para o cômputo do algoritmo do CUBE;
2. Pela mesma razão, alguns efeitos que constam na bibliografia sobre o tema, tais como o *layover effect*, o *baseline decorrelation effect*, o *shifting footprint effect* e o ruído propriamente dito têm seus efeitos mais visíveis;
3. Com relação a metodologia proposta, foi aplicada com sucesso. Tal situação se reveste de importância, pois esta área não seguiu as boas práticas para uma sondagem regular, uma vez que não era seu objetivo. Mesmo assim, os resultados foram promissores, mostrando que a metodologia também pode ser aplicada em situações anômalas, nas quais o levantamento batimétrico tenha um espaçamento que não respeite uma superposição de linhas de varredura;
4. A superfície calculada $Shoal_{HP/PDBS}$ apresentou valores bem próximos à $Shoal_{MBES}$, estando apenas 10 cm centímetros mais rasa. Caso fosse seguido o atual processo de construção ou atualização da carta náutica, onde se usa a $Shoal_{PDBS}$, este valor aumentaria para 30 cm; e
5. Em mais uma área, pode-se verificar a eficácia do método proposto nesta Tese, uma vez que a diferença entre superfícies diminuiu consideravelmente.

4.6. CONCLUSÕES GERAIS QUANTO A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Após os testes realizados para a aplicação da metodologia proposta, é possível concluir o seguinte:

1. A construção ou atualização de cartas náuticas seguem um método sistemático, no qual objetiva-se garantir que as sondagens mais rasas de uma determinada área sejam representadas. Assim, mediante um processo de operações matemáticas conhecido como generalização cartográfica, elegem-se as sondagens que irão para os documentos náuticos;

2. Ocorre que a camada da superfície batimétrica escolhida para passar por esse processo é aquela em que cada célula tem o menor valor (mais raso) dentre todos os *pings* que contribuíram para sua formação. No estudo aqui erigido, essa camada é a *Shoal*;
3. Assim, o valor de cada célula é independente do algoritmo escolhido para gerar a superfície (*downsampler*⁶²), sendo considerado apenas o resultado do processamento dos dados brutos. Nessa sistemática, perde-se a contribuição de possíveis ferramentas estatísticas robustas, da qual o CUBE é um dos exemplos;
4. Quando se analisam os dados batimétricos advindos do PDBS, observa-se que seu processamento fornece informações mais dispersas, onde o fundo marinho não é discernível visualmente, sendo que este efeito não ocorre com os dados oriundos do MBES. A camada que representa a morfologia do extrato marítimo é a *Depth*;
5. A dispersão dos dados batimétricos adquiridos com o PDBS demanda um processamento estatístico posterior, em prol de possibilitar a estimativa e quantificação do fundo marinho;
6. Mediante análise das superfícies geradas pelo algoritmo CUBE, tanto nos dados batimétricos oriundos do PDBS quanto nos do MBES, verifica-se que a estimativa do fundo marinho é congruente, ou seja, as camadas *Depths* são compatíveis. Contudo, devido à dispersão dos dados, a camada *Shoal* do interferométrico é mais rasa que a do multifeixe. Tal efeito, na produção da carta náutica, leva a uma diminuição da profundidade navegável, não desejável, principalmente em locais nos quais a folga abaixo da quilha é crítica⁶³;
7. A utilização da camada *Shoal* nos dados do PDBS pode redundar em desvantagens econômicas desnecessárias. O desafio que este trabalho se propôs a enfrentar foi desenvolver uma forma de utilizar os dados do PDBS para atualizar as Cartas Náuticas;
8. Nesse sentido, foi cogitada uma técnica viável de exportar os dados batimétricos do sonar interferométrico. A forma vislumbrada foi atuar na superfície exportada para a carta náutica.

⁶² O algoritmo utilizado para a geração da superfície, em casos de batimetria, não utiliza interpolação ou extrapolação, uma vez que células sem *pings* não podem ter um valor de profundidade atribuído. Ocorre justamente o contrário. Em uma célula com muitos *pings*, o valor do eixo z é único, ou pode ser representado por algumas hipóteses, sempre em quantidade menor do que os *pings*. Devido a essa redução quantitativa, o algoritmo também é chamado *downsampler*.

⁶³ Como já abordado em outras partes desta Tese, o efeito da redução da profundidade apresenta uma vantagem para a segurança da navegação, porém compromete o viés econômico, uma vez que diminui o calado operacional do Navio e por conseguinte, a quantidade de carga transportada.

Com esse objetivo, partiu-se de um ponto comum entre a superfície do MBES e do PDDBS: a camada *Depth*;

9. A hipótese que se elencou foi: a partir de operações estatísticas realizadas na camada *Depth_{PDDBS}*, poder-se-ia encontrar valores que fossem compatíveis com a camada *Shoal_{MBES}*, que é a camada utilizada para atualização cartográfica;
10. Como a dispersão dos dados batimétricos dentro de uma célula respeitam a distribuição normal, deduziu-se que se os valores da camada *Depth_{PDDBS}* fossem subtraídos de 1,96 vezes o desvio padrão da hipótese (95% de incerteza), atingir-se-iam os valores 97,5% mais rasos, sendo descartados os valores mais distantes do resultado fornecido pelo CUBE. Ou seja, seria uma forma de descartar os *outliers*, semelhante a filtro passa baixa;
11. Para atestar que tal procedimento fosse aplicável, criou-se um método no qual premissas e validações fossem realizadas e que, principalmente, o resultado pudesse ser alcançado sem a necessidade de utilização dos dados MBES nas operações matemáticas, sendo esses utilizados apenas para validação;
12. Essa metodologia foi aplicada em 5 áreas diferentes, cada uma com peculiaridades que visavam simular situações encontradas em campo. A área 1 objetivava avaliar a capacidade de detecção de pequenos objetos no fundo do mar. A área 2 colimava a quantificação de diferentes inclinações do terreno. A área 3 buscava avaliar a detecção de objetos com pronunciada elevação vertical, vindo até a superfície. A área 4 objetivava a detecção de alvos com projeção vertical, porém submersos. A área 5 tencionava avaliar a eficiência do PSDB, principalmente em áreas rasas;
13. Cada área ofereceu um novo desafio para a aplicação do método. Contudo, sempre tendo como objetivo maior a atualização da Carta Náutica, foram desenvolvidos procedimentos que possibilitam o uso da metodologia aventada. Os desafios, procedimentos de solução e resultados foram documentados nos seus itens apropriados;

14. Ressalta-se que o método exige supervisão constante do operador. Sua vantagem não é o automatismo⁶⁴, mas a possibilidade de aplicação do PDBS na construção e atualização de documentos náuticos;
15. Dessa forma, calculou-se a camada $Shoal_{HP/PDBS}$ e seus resultados foram compatíveis com a camada $Shoal_{MBES}$, observando-se uma redução na diferença batimétrica em aproximadamente 80%⁶⁵, quando tem-se por padrão a camada $Shoal_{PDBS}$ (Tabela 6):

Tabela 6 – Compilação do resultado da aplicação da metodologia, por área.

Área	$Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$	$Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$	Redução na diferença
1	0,6 m	0,1 m	83,33%
2	0,7 m	0,1 m	85,71%
3	0,5 m	0 m	100%
4	0,6 m	0,1 m	83,33%
5	0,3 m	0,1 m	66,67%

16. Assim, conclui-se que a metodologia foi testada e mostrou resultados promissores em todas as áreas, fornecendo insumos batimétricos para a carta náutica.

A evolução da tecnologia e sua aplicação nas mais diversas áreas de conhecimento da humanidade, inclusive na segurança da navegação, é um caminho sem volta. No que tange à hidrografia e cartografia náutica, cabem aos hidrógrafos, geofísicos, oceanógrafos, engenheiros cartógrafos e profissões afins avaliar cada inovação, verificando a adequabilidade de seu uso e criando soluções, adaptações e métodos para que tal uso seja exequível.

Os recentes avanços em *hardware* e *software* estão possibilitando que o sonar de varredura lateral interferométrico ganhe destaque em levantamentos hidrográficos, na produção de documentos náuticos e na segurança da navegação. É nesse contexto que este trabalho foi concebido, de forma a adequar o uso do PDBS às necessidades vigentes.

⁶⁴ A experiência em anos de sondagem e produção cartográfica mostrou que o automatismo sem supervisão de um operador apresenta resultados não confiáveis.

⁶⁵ $Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS} \approx 20\%$ ($Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$).

Quando se vislumbra o emprego de um sensor batimétrico disruptivo, costuma-se cogitar novos algoritmos de detecção de fundo. Contudo, por vezes, as soluções mais contundentes são as mais simples, e acabam não sendo priorizadas justamente por esse motivo. O que esta Tese se dedicou, foi analisar todo o fluxo de produção cartográfica e atuar em áreas que não costumam ganhar preponderância. Assim, foi feita toda uma recapitulação de tecnologia de aquisição de dados batimétricos do PDBS e do multifeixe, analisada suas limitações e potencialidades, tanto comparativamente quanto relativamente às normas técnicas da OHI. Em seguida, foi examinado a problemática da produção cartográfica e como o uso do PDBS poderia trazer vantagens ao processo de construção e atualização dos documentos náuticos. Na sequência, por meio de análise da exportação de dados batimétricos, foi observada uma oportunidade através da manipulação de superfícies, sendo o algoritmo amplamente analisado. A partir da aplicabilidade de teoria estatística, elaborou-se um método e, através de testes e validações, foi criada uma metodologia que tornasse possível o uso do sonar interferométrico para a criação de documentos de segurança à navegação.

Com isso, retorna-se a hipótese aventada no início desta Tese: **a atualização da cartografia náutica pode ser realizada por meio de dados batimétricos oriundos do sonar de varredura lateral interferométrico.** Relembra-se que o principal obstáculo é a dispersão dos dados PDBS considerados válidos, pois avalia-se que serão exportados os *pings* mais rasos cancelados na fase de processamento. Contudo, se ao invés de encarar a problemática desta maneira, inverter a pergunta. Em vez de perguntar: como fazer para diminuir a dispersão dos dados considerados válidos?; perguntar: que dado deve ser exportado para a carta náutica? Tal mudança de paradigma fez toda a diferença, pois evitou se interferir nos *pings* em prol do manuseio das superfícies.

Para melhor visualizar os resultados alcançados, a tabela⁶⁶ abaixo aglutinará algumas informações das Tabela 1 e Tabela 6:

Tabela 7 – Correlação entre as diferenças de camadas, por área

	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
$Depth_{MBES} - Depth_{PDBS}(m)$	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,0$	$\mu = 0,0$

⁶⁶ Devido a não ter sido um levantamento hidrográfico sistemático, a área 5 foi cortada da comparação final. Sua inclusão funcionaria como um *outlier*, dificultando a síntese e a conclusão da Tese. O efeito da diminuição da dispersão já foi mostrado na tabela anterior.

$Shoal_{MBES} - Shoal_{PDBS}$ (m)	$\mu = 0,6$	$\mu = 0,7$	$\mu = 0,5$	$\mu = 0,6$
$Shoal_{MBES} - Shoal_{HP/PDBS}$ (m)	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,0$	$\mu = 0,1$

Na primeira linha, observa-se que a diferença entre as camadas *Depth* oscilam entre 0 e 0,1 m, mostrando, como já evidenciado anteriormente, que ambos os sensores estimam o fundo marinho de maneira muito semelhante. A linha dois, por meio da diferença das camadas *Shoal*, mostra que o dado do interferométrico é esparsa, com maior dispersão vertical. Contudo, a terceira linha, que mostra a diferença entre a *Shoal* do MBES e a superfície calculada pela metodologia utilizada neste trabalho, apresenta a média da diferença como sendo praticamente a mesma da primeira linha. Como a média se manteve, conclui-se que a dispersão dos dados apresentados nessa camada é a mesma dos que serão exportados ao se usar a tecnologia do ecobatímetro multifeixe, independente da diferença que seja entre a *Depth* e a *Shoal* do multifeixe (Figura 117). Ou seja, esta metodologia faz com que a dispersão dos dados que serão exportados adquiridos pelo PDBS seja praticamente a mesma da metodologia atual, seguida com o MBES. Ele não só diminui a dispersão, mas praticamente iguala com a do multifeixe.

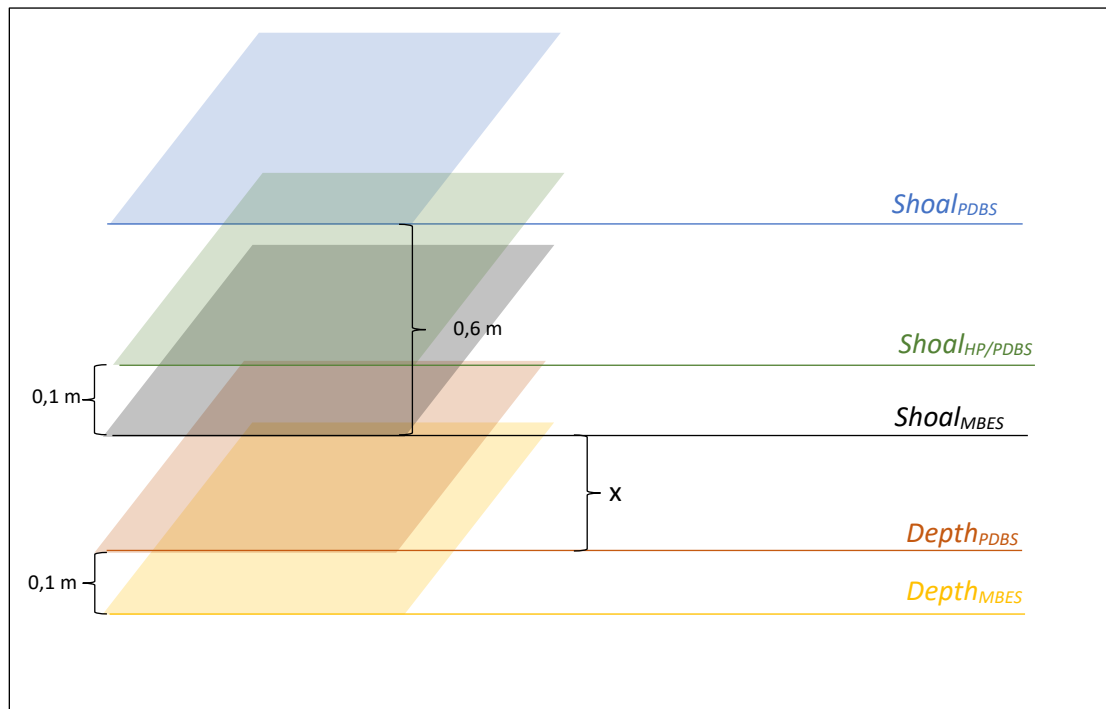


Figura 117 – Diagramação das camadas batimétricas com a diferença no eixo z. Utilizou-se os valores encontrados nas áreas 1 e 2 como exemplo.

Pela figura e em uma análise quantitativa, conclui-se que a dispersão é a mesma. A dispersão dos dados pode ser representada por *Depth – Shoal*⁶⁷. No caso do MBES, esse valor seria $0,1 + x$. No caso do PDDBS, seria $x + 0,1$. Ou seja, é o mesmo valor, independentemente da distância vertical entre as camadas *Deth_{PDDBS}* e *Shoal_{MBES}*. **Dessa forma, a metodologia criada proporciona que a dispersão dos dados que vão compor a camada a ser exportada para a carta náutica seja aproximadamente igual a dispersão dos dados multifeixe.** Com esse resultado, conclui-se que a camada *Shoal_{HP/PDDBS}* pode ser utilizada na construção de documentos náuticos mais restritos.

⁶⁷ A dispersão dos dados é calculada por meio da diferença entre os dados mais rasos e os mais profundos. Em termos de camadas de uma determinada superfície, seria o resultado *Deep – Shoal*. A diferença *Depth – Shoal* é uma forma de representar a dispersão, sendo ela diretamente proporcional e essa diferença.

5. CONCLUSÃO

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Retornando às perguntas elencadas no item 1, faz-se mister respondê-las, pois são elas que testificam a veracidade ou não da hipótese, da mesma forma que evidenciam a eficácia e eficiência da metodologia proposta:

1. É possível criar uma metodologia diferente da atual para a aplicação dos dados batimétricos oriundos do PDBS? **Sim**. A metodologia foi criada a partir da análise do processo de produção e atualização cartográfica, que se inicia com a aquisição dos dados e culmina com a construção do produto final. A partir deste exame, verificou-se a possibilidade de atuar na superfície que seria exportada. Por meio do algoritmo eminentemente estatístico do CUBE, foi possível criar a metodologia proposta nesta Tese.

2. A metodologia, uma vez aplicada ao PDBS, apresenta resultados melhores do que a forma atual de uso dos dados? Em que grau? **Sim**, uma vez que se observou a diminuição da diferença entre os dados batimétricos utilizados do PDBS com relação aos do MBES. O grau pode ser aferido por meio das porcentagens mostradas na Tabela 6.

3. A metodologia possibilita que os dados PDBS sejam utilizados para a segurança da navegação? **Sim**, uma vez que os dados batimétricos se mostrem íntegros e congruentes com informações de referência, eles podem ser utilizados para a segurança da navegação sob a forma de diversos documentos náuticos, sejam eles Roteiros⁶⁸, Aviso aos Navegantes⁶⁹, Avisos Rádios⁷⁰ ou à própria Carta Náutica, dependendo da ordem do levantamento e do ZOC que se planeja alcançar.

4. A metodologia possibilita que os dados PDBS possam apresentar uma dispersão compatível com os do MBES? Essa pergunta, como dito anteriormente, é o objetivo último da Tese. Baseado em todas as análises aqui realizadas, chega-se à conclusão de que a resposta é **Sim**.

⁶⁸ Publicação que contém informações úteis sobre descrição da costa, demanda de portos e fundeadouros, perigos, profundidades em vias navegáveis e canais, etc (MIGUENS, 1996).

⁶⁹ Publicação utilizada para disseminar informações que atualizam cartas e publicações náuticas (MIGUENS, 1996).

⁷⁰ São avisos praticamente instantâneos, disseminados via rádio, satélite ou internet, que contém informações mais urgentes que cheguem ao conhecimento do navegante (MIGUENS, 1996).

Ao utilizar a camada *Shoal_{HP/PDBS}*, observou-se uma dispersão vertical nos moldes do MBES. Tal situação permite a atualização da carta náutica para os ZOC mais restritos (A1 e A2).

5. Há alguma restrição de utilização dos dados batimétricos do PDBS para atualização de algum produto náutico? **Não**, podendo ser utilizada desde a carta náutica com ZOC A1 até subsídios para Avisos Rádio ou Roteiro.

Uma vez que a dispersão vertical do PDBS era o seu principal entrave à sua plena utilização em LH, a metodologia criada apresenta uma alternativa que possibilita o uso do equipamento, inclusive para áreas que exijam as ordens mais restritas de levantamento hidrográfico. Assim, pode-se concluir que a HIPÓTESE **“informações batimétricas para a segurança da navegação podem ser obtidas por meio de dados oriundos do sonar de varredura lateral interferométrico e aplicadas nos mais diversos produtos náuticos”** é VERDADEIRA. O principal obstáculo que existia foi contornado pela metodologia aqui proposta.

Há de se considerar ainda que, por mais que a dispersão vertical dos dados tenha sido praticamente igualada, a carta náutica representativa das áreas estudadas estará 10 cm mais rasa. Este valor pode ser significativo, ao reduzir o calado para navegação, principalmente em áreas em que a folga abaixo da quilha seja crítica. Entretanto, existem situações em que a velocidade da sondagem é mais importante do que a acurácia do valor da batimetria. É o caso de locais em que a morfologia de fundo muda constantemente, tais como os rios da região amazônica e pantaneira.

Com uma eficiência maior na sondagem e, agora, com uma dispersão vertical compatível com o MBES, o PDBS se mostra como uma promissora ferramenta para o levantamento hidrográfico e atualização de cartas náuticas, principalmente em águas interiores.

Com relação aos trabalhos futuros, esse item se reveste de grande importância, pois vale ressaltar que o presente trabalho foi uma sugestão de trabalhos futuros que constava na pesquisa desenvolvida durante a dissertação de Mestrado (PIMENTEL, 2018).

Em prol de aprofundar ainda mais o estudo na investigativa da utilização do PDBS para a segurança da navegação, sugere-se posterior desenvolvimento: 1 - aplicar a metodologia criada em outros levantamentos hidrográficos realizados com o PDBS, desde que existam dados para fazer as validações, sejam eles sondados concomitantemente com outra tecnologia ou por meio de sondagens realizadas em épocas pretéritas; 2 - realizar LH em rios, seja na região amazônica ou

pantaneira, onde possa ser explorada a maior eficiência em águas rasas do PDBS e, ao mesmo tempo, verificar como seria uma carta náutica construída a partir da metodologia desenvolvida; 3 – verificar a aplicação em produtos da família S-100, tais como a S-102; e 4 – testar a metodologia com outros interpoladores de superfície, além do CUBE.

Cada sugestão acima tem o poder de ratificar a metodologia, bem como abrir novas linhas de pesquisa, com resultados aplicáveis em LH e na respectiva criação ou atualização de documentos náuticos. Cabe destacar que a DHN vem desenvolvendo novos modelos de cartas náuticas para águas interiores, as *Inland Electronic Nautical Chart (IENC)*. Neste novo produto, se dá mais protagonismo à velocidade de compilação e divulgação dos dados do que a efetiva precisão ou forma do documento. O uso do PDBS, a par com a metodologia proposta, pode se apresentar como uma ferramenta muito útil, pois vem a satisfazer as características que estão sendo priorizadas nesse novo tipo de documento náutico.

Nesse contexto, ressalta-se novamente o lema da Diretoria de Hidrografia e Navegação, que é a tônica do levantamento hidrográfico, criação ou atualização de cartas náuticas e do método científico: “Restará sempre muito o que fazer...”

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). *ANTAQ participa de webinar sobre dragagem permanente dos portos brasileiros*. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/antaq/pt-br/noticias/antaq-participa-de-webinar-sobre-dragagem-permanente-dos-portos-brasileiros>>. Acesso em: 23 set. 2021.

_____. *Estatístico Aquaviário 2.1.4*. Disponível em: <[http://anuario.antaq.gov.br/QvAJAXZfc/opendoc.htm?document=painel%5Cantaq - anuário 2014 - v0.9.3.qvw&lang=pt-BR&host=QVS%40graneleiro&anonymous=true](http://anuario.antaq.gov.br/QvAJAXZfc/opendoc.htm?document=painel%5Cantaq%20-%20anuario%202014%20-%20v0.9.3.qvw&lang=pt-BR&host=QVS%40graneleiro&anonymous=true)>. Acesso em: 2 set. 2021.

AI, Y ; PARENT, M. Performance Analysis Using an Uncertainty Model for HydroChart 5000. *Sea Technology*, Arlington, United States: Compass Publications Inc., 2011. Disponível em: <<https://geo-matching.com/uploads/default/m/i/migrationvwmfdr.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

ALBERONI, A. A. L. et al. The new Digital Terrain Model (DTM) of the Brazilian Continental Margin: detailed morphology and revised undersea feature names. *Geo-Marine Letters*, v. 40, n. 6, pp. 949–964, 2019.

ALLABY, Michael. *Dictionary of Earth Sciences*. 3 ed. New York, USA: Oxford University Press, 2008. 654p, pp. 15-301.

ĂRĂCIN, Aruel; CALIN, Alexandru. Interferometric Bathymetry - principles and utility. *Recent Advances in Geodesy and Geomatics Engineering: Proceedings of the 1st European Conference of Geodesy & Geomatics Engineering (GENG '13)*, Antalya, Turkey: WSEAS Press. p. 198–205.

AUTORIDADE PORTUÁRIA DE SANTOS. *Dragagem do porto de santos - economia, sustentabilidade e educação ambiental*. Disponível em: <<https://dragagem.portodesantos.com.br/portal/noticia?noticia=MjY5>>. Acesso em: 23 set. 2021.

BRASIL. MINISTÉRIO DA DEFESA. *Livro Branco de Defesa Nacional - Brasil 2020*. 2020. 195p.

BRASIL. Decreto-lei nº 243, de 28 de fevereiro de 1967. *Fixa as Diretrizes e Bases da*

Cartografia Brasileira e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/declei/1960-1969/decreto-lei-243-28-fevereiro-1967-376132-norma-pe.html>>. Acesso em: 07 set. 2018.

BRASIL. Decreto nº 1.265, de 11 de outubro de 1994. *Aprova a Política Marítima Nacional (PMN)*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/d1265.htm>. Acesso em: 23 set. 2021.

BRASIL. *Lei dos Portos*. Brasil, 2013.

BRASIL. CONTROLADORIA GERAL DA UNIÃO (CGU). Secretaria Nacional de Portos e Transportes Aquaviários. *Relatório de Avaliação nº 850393*. Brasília/DF. 2020.

BRISSON, L. N.; WOLFE, D.; STALEY, M. P. S. M. Interferometric swath bathymetry for large scale shallow water hydrographic surveys. In: 2014 Canadian Hydrographic Conference (CHC-2014), 1., 2014, St. John's N&L, Canada. *Proceedings...* . 2014. pp. 1-18.

CABRAL, R. P.; BAHIA, N. R. C. Uma análise dos componentes do poder marítimo brasileiro. *Revista Intellector* (on-line), v. XIV, pp 3–19, 2017.

CALDER, B. R.; MAYER, L. A. Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems: G3*, Washington, USA: American Geophysical Union & Geochemical Society, v. 4, n. 6, 2003. pp. 1-22, jun. 2003.

CANADÁ. *Data Products and Survey*, 2022. Disponível em: <<https://www.charts.gc.ca/data-gestion/index-eng.html>>. Acesso em: 09 dez. 2022.

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

_____. *Caris Training Module Multibeam Data Processing With CUBE*, 2014. 220p.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM). *Infraestrutura de Dados Espaciais Marinhos*, 2023. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/idem#:~:text=O%20que%20C3%A9%3F,a%20visualiza%C3%A7%C3%A3o%20de%20dados%20geoespaciais.>>. Acesso em: 11 abr. 2023.

CONSELHO ADMINISTRATIVO DE DEFESA ECONÔMICA (CADE). *Cadernos do Cade - Mercado de serviços portuários*. Brasília - DF. Ministério da Justiça - Departamento de Estudos Econômicos. 2017.

COVE, K.; CAVANAGH, G.; LARRIVÉE, J. Adopting a modern approach to compiling bathymetry for nautical charts: A joint project between the Canadian Hydrographic Service and Teledyne CARIS. In: Canadian Hydrographic Conference (CHC-2020). Québec, Canada. *Proceedings ...*, 2020.

CRESPO, G. A. G.-P. To Process Data From A Survey - General Description of XML File CUBE Parameters. *Hydro International*, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/hidrovias>>. Acesso em: 23 set. 2021.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). *Normas da Autoridade Marítima Para Levantamentos Hidrográficos - NORMAM-28/DHN*. 1ª Revisão. 2011.

_____. *Carta 12000: símbolos, abreviaturas e termos usados nas cartas náuticas*. 4. ed. Niterói - RJ: Ed. DHN, 2014. 107p. Textos em português e inglês.

_____. *III Plano Cartográfico Náutico Brasileiro*. Niterói - RJ: DHN, 2016. 52p.

_____. *Normas da Autoridade Marítima Para Levantamentos Hidrográficos - NORMAM-25/DHN*. 2ª Revisão. 2017.

_____. *Cartas Náuticas*. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/chm/dados-do-segnav-cartas-nauticas/cartas-nauticas>>. Acesso em: 24 set. 2021.

DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS (DPC). *Normas da Autoridade Marítima Para Obras, Dragagens, Pesquisa e Lavra de Minerais sob, sobre e às Margens das Águas Jurisdicionais Brasileiras - NORMAM 11/DPC*. 1ª Revisão. Brasil, 2017.

DODD, D. *Uncertainty Evaluation of the EdgeTech 4600 Swath Bathymetry System*. In: US

Hydrographic Conference 2013, 1., 2013, New Orleans, United States. *Proceedings...* . 2013.

GOSTNELL, C. Efficacy of an interferometric sonar for hydrographic surveying: Do interferometers warrant an in-depth examination? - A Preliminary Study. In: US Hydrographic Conference 2005, 1., 2005, San Diego, United States. *Proceedings...* . 2005.

HARE, R. Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding. *International Hydrographic Review*, n. March, pp. 37–69, 1995.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). *S-102 Bathymetric Surface Product Specification*. Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau. 2019. Edition 2.0.0. 102p. Disponível em: <
https://registry.iho.int/productspec/view.do?idx=163&product_ID=S-102&statusS=5&domainS=ALL&category=product_ID&searchValue=>. Acesso em: 09 dez. 2022.

_____. *IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data: Special Publication N° 57 (S-57)*. Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau. 2000a. Edition 3.1. 114p.

_____. *IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data: Special Publication N° 57 (S-57), Appendix A - Chapter 2 - Attributes*. Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau. 2000b. Edition 3.1. 248p.

_____. *IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data: Special Publication N° 57 (S-57), Appendix A - Chapter 1 - Object Classes*. Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau. 2000c. Edition 3.1. 264p.

_____. *IHO Standards for Hydrographic Surveys: Special Publication N° 44 (S-44)*. Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau. 2020. Edition 6.1.1.

_____. *IHO Regulations of the IHO for International (INT) Charts and Chart Specifications of the IHO: Special Publication N° 4 (S-4)*. Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau. 2021. Edition 4.9.0. 452p.

_____. *IHO Roadmap for the S-100 Implementation Decade (2020 – 2030)*. Annex 2.

Principauté de Mônaco: International Hydrographic Bureau. 2021.

_____. *IHO S-100 Universal Hydrographic Data Model*. Disponível em: <
<https://iho.int/en/introduction-0>>. Acesso em: 13 out. 2022.

_____. *Manual de Hidrografia*: Publicação C-13. Trad. Instituto Hidrográfico. Lisboa, Portugal: Instituto Hidrográfico, 2005 (correções até 2010). 548p. Tradução de *Manual on Hydrography*. Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS)*. Disponível em: <
<https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume%201184/volume-1184-I-18961-English.pdf>>. Acesso em: 08 dez. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Diretoria de Geociências. *Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil*. Rio de Janeiro - RJ, 2011. 176p.

JERRAM, K.; SCHMIDT, V. *Object Detection with Phase-Measuring Bathymetric Sidescan Sonar Depth Data*. Durham, United States, 2015. White Paper - Center for Coastal and Ocean Mapping. Disponível em: <
http://sandy.ccom.unh.edu/publications/library/Object_detection_with_PMBS.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2018.

_____. *Storm Response Surveying with Phase- Measuring Bathymetric Sidescan Sonar*. Durham, United States, 2015. White Paper - Center for Coastal and Ocean Mapping. Disponível em: <
http://sandy.ccom.unh.edu/publications/library/Response_surveying_with_PMBS.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2018.

KONGSBERG MARITIME. GeoSwath Plus wide swath bathymetry system - *Instruction Manual*, 2014a. 639p.

LOVRINČEVIĆ, D. Quality Assessment of an Automatic Sounding Selection Process for Navigational Charts. *Cartographic Journal*, v. 54, n. 2, pp. 139–146, 2017.

LURTON, X. Swath Bathymetry Using Phase Difference : Theoretical Analysis of Acoustical Measurement Precision. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 25, n. 3, pp. 351–363, 2000.

MA, K.; XU, W.; XU, J. The Comparison between Traditional and Interferometric Multibeam Systems. In: 6th International Conference on Sensor Network and Computer Engineering (ICSNCE 2016). 6., 2016, Xi'an, China. *Proceedings...* . Atlantis Press, 2016. p. 261-264.

MAIA, P.; FLORENTINO, C; PIMENTEL, V.B. Fluxo de Dados Hidrográficos para a Produção de Documentos Náuticos. In: XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositiva. 2017, Rio de Janeiro. *Anais...* . Sociedade Brasileira de Cartografia: 2018, pp. 6-10.

MANDARINO, F. et al. Cartas Náuticas Brasileiras - Atualização e Disponibilização. XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositiva. 2017, Rio de Janeiro. *Anais...* . Sociedade Brasileira de Cartografia: 2017.

MAYER, L. et al. The Nippon Foundation - GEBCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World's Oceans Completely Mapped by 2030. *Geosciences*, v. 8, n. 2, pp. 63, fev. 2018.

MIGUENS, A. P. *Navegação: a Ciência e a Arte*. Rio de Janeiro: DHN, 1996. 538p. v. 1 - Navegação Costeira, Estimada e em Águas Restritas.

NIPPON FOUNDATION. *Seabed 2030: Mission Statement*, 2017. Disponível em: <<https://seabed2030.gebco.net/>>. Acesso em: 14 out. 2021a.

_____. *Seabed 2030 project*. Disponível em: <https://www.gebco.net/about_us/seabed2030_project/>. Acesso em: 14 out. 2021b.

_____. *Crowd Sourced Bathymetry*. Disponível em: <<https://seabed2030.org/crowd-sourced-bathymetry>>. Acesso em: 14 out. 2021c.

PEREIRA, D. L. DA S. Incertezas e Controle de Qualidade na Medição de Profundidades por Meio de Ecobatímetros Multifeixe. *Anais Hidrográficos*, Niterói: DHN, v. 73. p. 53-65, 2016.

PIMENTEL, V. B. *Comparação entre dados batimétricos adquiridos com ecobatímetro multifeixe e dados batimétricos adquiridos com sonar de varredura lateral interferométrico*. Niterói - RJ, 186p. Dissertação (Mestrado em Dinâmica dos Oceanos e da Terra), Universidade

Federal Fluminense, Niterói, 2018.

PIMENTEL, V. B.; FLORENTINO, C.; NETO, A. A. Evaluation of the precision of phase-measuring bathymetric side scan sonar relative to multibeam echosounders. *The International Hydrographic Review*, v. 24, pp. 61–83, 2020.

PORTAL DA INDUSTRIA. *Comércio marítimo resiste até março , mas é preciso garantir operações para enfrentar covid-19*, 2020. Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/infraestrutura/comercio-maritimo-resiste-no-trimestre-mas-e-preciso-garantir-operacoes-para-enfrentar-pandemia/#>>. Acesso em: 22 set. 2021.

QPS. *CUBE Algorithm*. Página que explica parte do processamento de dados batimétricos pelo algoritmo CUBE no software QINSy. Disponível em: <<https://confluence.qps.nl/qinsy/en/cube-algorithm-35589329.html>>. Acesso em: 9 maio. 2018.

ROBERTO, E. G. et al. Comércio marítimo brasileiro: busca de países referência para desenvolver a navegação de cabotagem. *Revista Eletronica de Estrategia e Negócios*, v. 13, n. 2, pp. 238–267, 2020.

SANTOS, A. P. et al. Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais Utilizando Técnicas de Estatística Espacial: Proposta de Método e Exemplo Utilizando a Norma Brasileira. *BCG - Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba: UFPR, 2016, v. 22, n. 4, p. 630-650, 2016. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/49633>>. Acesso em: 30 mai. 2018.

SARRABEZOLE, A.; LASSERRE, F.; HAGOUAGN'RIN, Z. Arctic shipping insurance: towards a harmonisation of practices and costs? *Polar Record*, v. 52, n. 04, pp. 393–398, 2016.

SAUCAN, A. A. et al. Model-Based Adaptive 3D Sonar Reconstruction in Reverberating Environments. *IEEE Transactions on Image Processing*, v. 24, n. 10, pp. 2928–2940, 2015.

SCHMIDT, V. Hydrographic Survey with Autonomous Surface Vehicle. *The International Hydrographic Review*, v. 24, pp. 189–201, 2020.

SINTES, C; LLORT-PUJOL,G; GUÉRIOT, D. Coherent Probabilistic Error Model for

Interferometric Sidescan Sonars. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 35, n. 2, pp. 412-423, 2010.

SKOPELITI, A. et al. Generalization of soundings across scales: From DTM to harbour and approach nautical charts. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 9, n. 11, pp. 1–23, 2020.

STEVENSON, W. J. *Estatística Aplicada à Administração*. São Paulo - SP: HARBRA, 2001, 508p. p. 181.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). *EM 1110-2-1003 - Engineering and Design Hydrographic Surveying*. Washington, United States, 2013. 700p.

WILLIAMS, C. R. Hydrographic surveying and charting. *International Hydrographic Review*, Mônaco: International Hydrographic Bureau, v. 57, n. July, p. 9–12, 1980.

WOOCK, P.; FREY, C. Deep-sea AUV navigation using side-scan sonar images and SLAM. In: OCEANS'10 IEEE, 2010, Sidney, Australia: IEEE, 2010. *Proceedings...* . Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5603528/>>. Acesso em: 16 mai. 2018.

APÊNDICE A – CONCEITOS TEÓRICOS SOBRE SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO E ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE

1. ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE E SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO

O ecobatímetro multifeixe (MBES – *multibeam echosounder*) é, em sua maioria, um sonar capaz de fornecer batimetria por meio de cruzamento entre as ondas acústicas geradas pelos sensores de transmissão e recepção, que estão disposto ortogonalmente, em uma técnica conhecida por *mills cross* (Figura 1) (BJØRNØ, 2011; L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000; SIMMONS et al., 2017). Nos cruzamentos entre ambas as frentes de ondas, tem-se os feixes, por isso diz-se que este sensor utiliza a técnica do *beam forming* (L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000) para fornecer a batimetria. A detecção do sinal que será usado para o cálculo da profundidade é feita por amplitude e por fase (OHI, 2005).

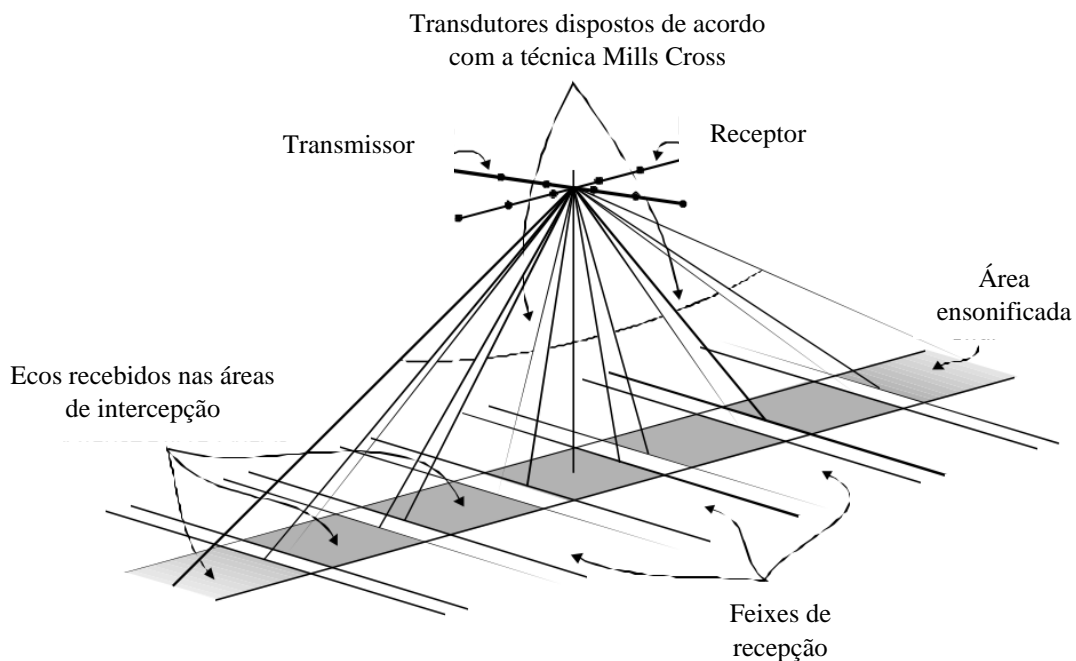


Figura 1 – Detecção do ecobatímetro multifeixe utilizando o princípio do beam forming e a técnica do mills cross. Fonte: adaptado de L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS (2000).

O sonar de varredura lateral (SVL ou SSS – *sidescan sonar*) interferométrico (PDBS – *phase differencing bathymetric sonar* ou PMBS – *phase-measuring bathymetric sidescan*) é um

sensor capaz de fornecer imagem de retroespalhamento e informações batimétricas (Figura 2) (JERRAM; SCHMIDT, 2015a). Para tal, ele se compõe de um transmissor e mais de um receptor espaçados a uma distância conhecida, múltipla do comprimento de onda λ (KONGSBERG MARITIME, 2014a; LURTON, 2000; WILBY, 1999). Através da diferenciação por fase decorrente da interferometria (OHI, 2005), o PDBS é capaz de fornecer informação de profundidade georreferenciada.

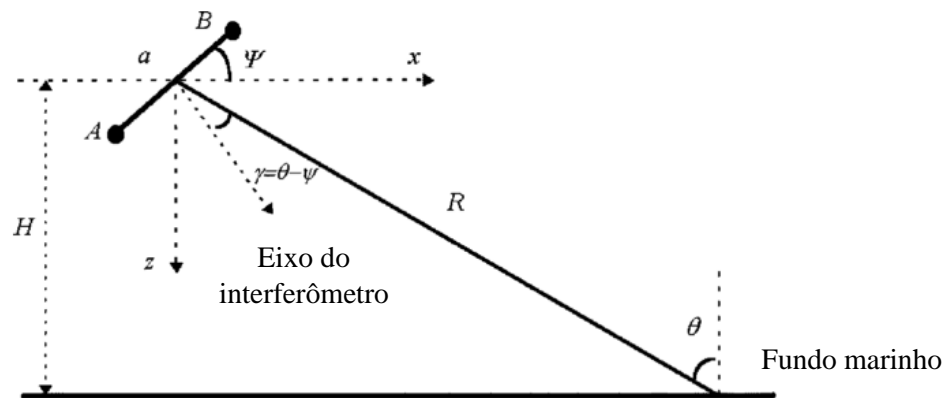


Figura 2 – Desenho esquemático do funcionamento de um sonar de varredura lateral interferométrico com 2 receptores (A e B) com uma distância entre ambos ($a = n \cdot \lambda$). Fonte: adaptado de LURTON (2000).

O PDBS é menos custoso (AI; PARENT, 2011); possui uma capacidade de varredura maior em águas rasas (BRISSEON; WOLFE; STALEY, 2014; GOSTNELL, 2005; JERRAM; SCHMIDT, 2015b), o que proporciona um levantamento mais rápido e com maior capacidade de visualização nas bordas da varredura (BRISSEON; WOLFE; STALEY, 2014); maior densidade de dados¹ (USACE, 2013), levando a uma grande resolução em *acrosstrack* (1-10 mm) (JERRAM; SCHMIDT, 2015a; JERRAM; SCHMIDT, 2015b; MA; XU; XU, 2016); possui a mesma visualização *backscatter* do SSS (BRISSEON; WOLFE; STALEY, 2014; JERRAM; SCHMIDT, 2015b); e tem por princípio de funcionamento a interferometria, que também é usada no MBES, na detecção por fase.

Contudo, o PDBS ainda não está totalmente aceito pela comunidade internacional e nem pelo Brasil. Tal fato se deve a uma série de fatores como: pouca capacidade de detecção no nadir (DODD, 2013; MA; XU; XU, 2016); dados muito ruidosos (DODD, 2013; JERRAM; SCHMIDT, 2015b); ambiguidade de profundidade; grande volume de dados, o que requer

¹ Em um MBES de 256 *beams*, em uma taxa de aquisição 40 Hz em águas rasas (até 200 m (DHN, 2017)), gera, em média 10.000 profundidades por segundo. O PDBS, no mesmo ambiente, gera 50.000.

melhor capacidade de computação (JERRAM; SCHMIDT, 2015b; MA; XU; XU, 2016); e incerteza vertical acentuada (BRISSON; WOLFE; STALEY, 2014; JERRAM; SCHMIDT, 2015b; NOAA, 2017).

2. CONCEITOS

2.1 INTERFEROMETRIA NA BATIMETRIA

Interferometria é a técnica de combinar duas ou mais ondas de mesma natureza, sejam elas acústicas ou eletromagnéticas, para obter medidas precisas. Na batimetria ela é usada para detecção de atrasos em fase dentro de um comprimento de onda acústico, usando um processo de sub-amostragem (GARELLO *et al.*, 2008). Para melhor compreensão deste trabalho, pode-se definir interferometria como sendo a técnica na qual duas ondas acústicas interagem em prol de se mensurar a defasagem entre elas e, após operações matemáticas, converter essa medida em diferença de ângulo ou tempo

Na batimetria, se dedica à medição do ângulo do eco de retorno, por meio da diferença de fase que a mesma frente de onda atinge dois ou mais receptores de um mesmo *array* em um transdutor (DENBIGH, 1989) (Figura 3). Cada elemento do *array* receberá a frente de onda em instantes diferentes, fazendo com que cada um registre a onda em momentos sequenciais, parecendo ondas diferentes. A partir da diferença de fase (Eq. 1), pode-se calcular ângulo γ com que uma determinada frente de onda chegou em um *array* (Figura 4) (LURTON, 2000).

$$\Delta\varphi_{AB} = 2\pi \frac{a}{\lambda} \text{sen}\gamma \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde $\Delta\varphi_{AB}$ é a diferença de fase entre os receptores A e B;

a é distância de separação entre dois elementos distintos de recepção dentro de um *array*;

λ é o comprimento de onda do sinal; e

γ é ângulo entre o eixo do interferômetro (direção ortogonal ao alinhamento dos elementos) e a direção do raio.

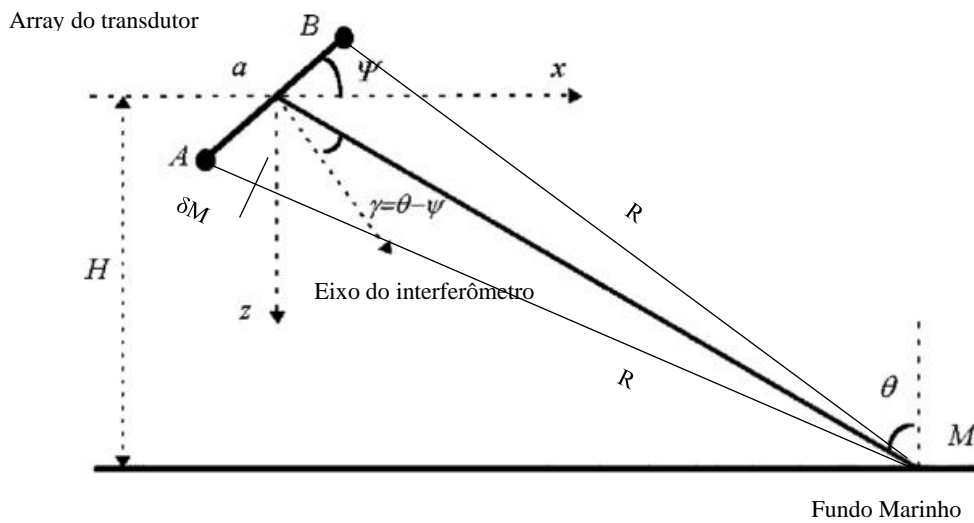


Figura 3 – Desenho esquemático de dois elementos de um mesmo array recebendo a informação da mesma feição em instantes diferentes. O caminho da feição M até o receptor B tem comprimento R , enquanto que o caminho da feição M até o receptor A tem comprimento $R + \delta M$, fazendo com que o eco de resposta chegue em momentos diferentes em cada elemento. Fonte: adaptado de LURTON (2000).

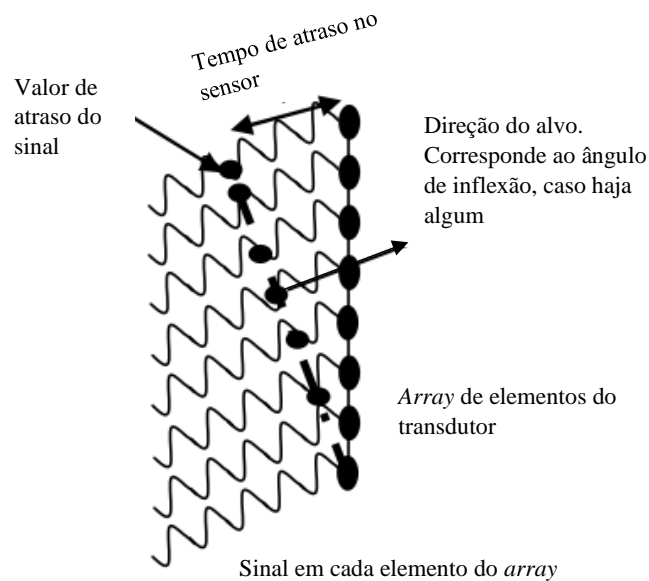


Figura 4 - Chegada da frente de onda ao transdutor. Como a frente de onda chega em momentos distintos, cada elemento do array irá gerar uma onda diferente que será usada na comparação. Fonte: adaptado de GARELLO et al. (2008).

Dessa forma, pode-se comparar várias formas de ondas supostamente iguais² e a partir de tal procedimento, extrair a informação que se deseja. Nesta comparação, apenas dois elementos são necessários. Para que o cálculo seja realizado, os elementos devem estar

² As ondas seriam iguais pois foram gerados pelo mesmo eco de retorno, porém alguns fatores levam a algumas dissimilaridades que serão vistas no próximo item.

espaçados de uma distância conhecida (em função do comprimento de onda λ). Eles estarão alinhados em uma direção, apontando o espaçamento para uma direção ortogonal, que é o eixo do interferômetro. A partir da diferenciação da fase, quando esta for zero (*zero crossing*), consegue-se estabelecer a direção da frente de onda (Figura 5). A partir do momento do estabelecimento desse ponto, pode-se calcular o par ângulo-tempo para qualquer ponto da curva.

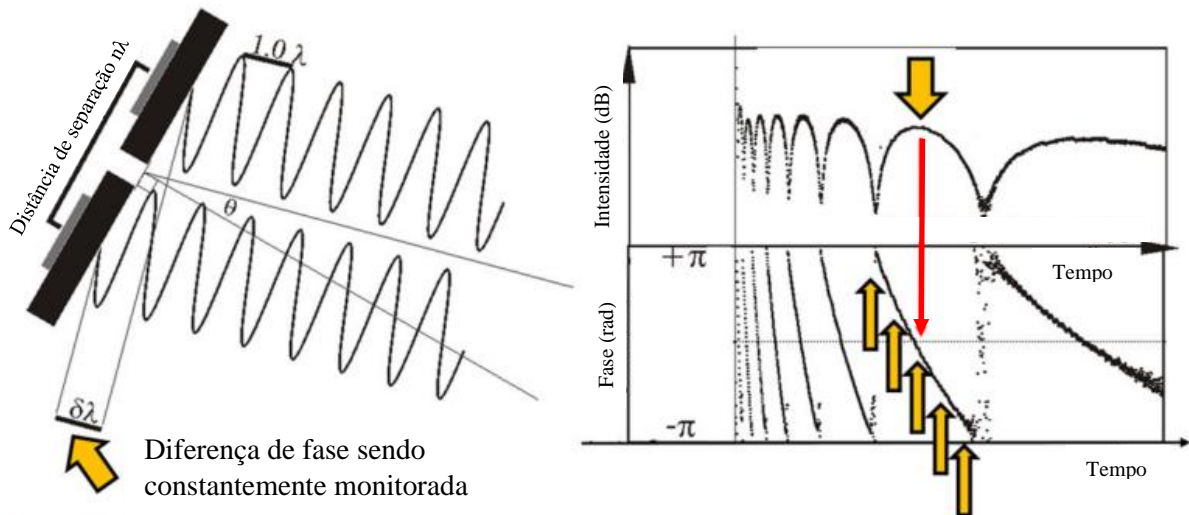


Figura 5 – À esquerda, tem-se dois elementos de um array separados por uma distância proporcional ao comprimento de onda λ . À direita em cima, tem-se a intensidade do sinal que chega em função do tempo e em baixo tem-se a fase. Nota-se que dentro da janela estudada, é possível obter mais de uma informação de zero crossing. Isso é o que dá origem às ambiguidades, pois cada instante desse é um ângulo diferente calculado.

Fonte: adaptado de CLARKE (2013a).

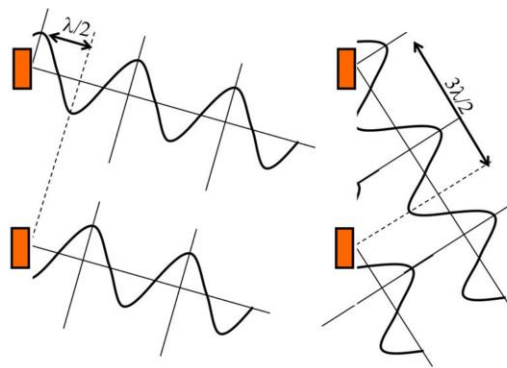


Figura 6 – O mesmo array pode receber duas frentes de ondas com inclinações diferentes, porém o resultado da diferença de fase será o mesmo, ocasionando ambiguidades. Aqui, mostra-se como duas ondas de ângulos diferentes teriam o mesmo zero crossing. A cada $\lambda/2$ somado, existiria uma ambiguidade. Fonte: CLARKE (2013a).

O problema é que dependendo do espaçamento entre os receptores, pode haver mais de uma informação de ângulo, ocasionando ambiguidades (Figura 6). Para que não ocorram, os elementos do *array* devem estar espaçados de uma distância de $\lambda/2$. Contudo, nesta configuração, a resolução angular decai, fazendo com que seja difícil estabelecer o instante de cada valor da diferença de fase (vai depender da relação sinal-ruído – Figura 8). Para contornar tal dificuldade, pode-se utilizar uma distância maior, porém a cada vez que se soma mais meio comprimento de onda, acresce-se mais uma informação de ambiguidade, pois se contempla mais um ciclo da onda (WILBY, 1999). Enquanto dois *arrays* distantes de $\lambda/2$ fornecem apenas uma informação de ângulo a uma resolução ruim, dois que estão distantes 5λ têm uma boa resolução, porém 11 informações de diferença de fase e, portanto, 11 ângulos diferentes (Figura 7). O que ocorre atualmente é que o MBES e o PDBS usam espaçamentos maiores que apenas $\lambda/2$ e diferentes métodos de resolução de ambiguidades.

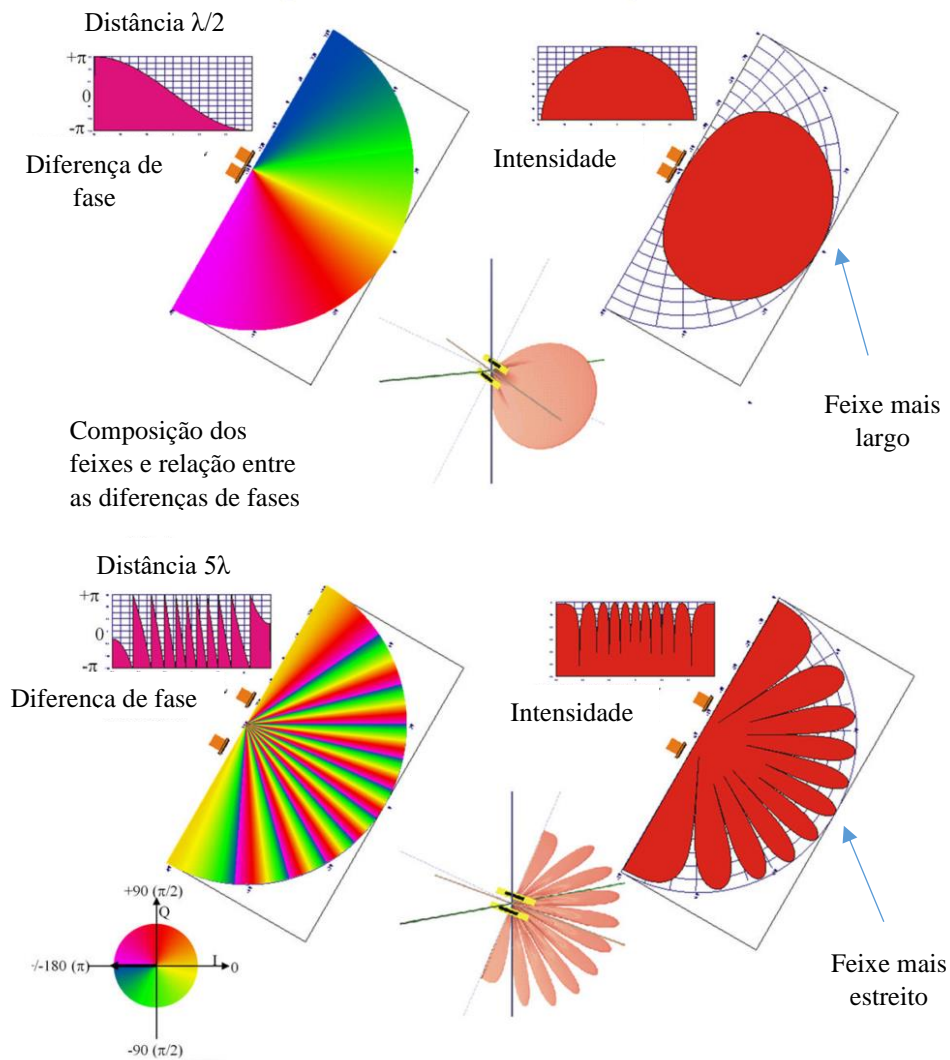


Figura 7 – Na parte de cima da figura tem-se um array com elementos afastados $\lambda/2$. Nesta configuração, apenas um ângulo é detectado, porém o feixe é muito largo, o que diminui seu poder discriminador em ângulo. Já a parte de baixo apresenta um array com elementos distanciados de 5λ . Nesta configuração, tem-se 11 ângulos possíveis (cada feixe é uma solução), contudo observa-se que os feixes são bem mais finos, o que aumenta a resolução angular. Fonte: adaptado de CLARKE (2013a).

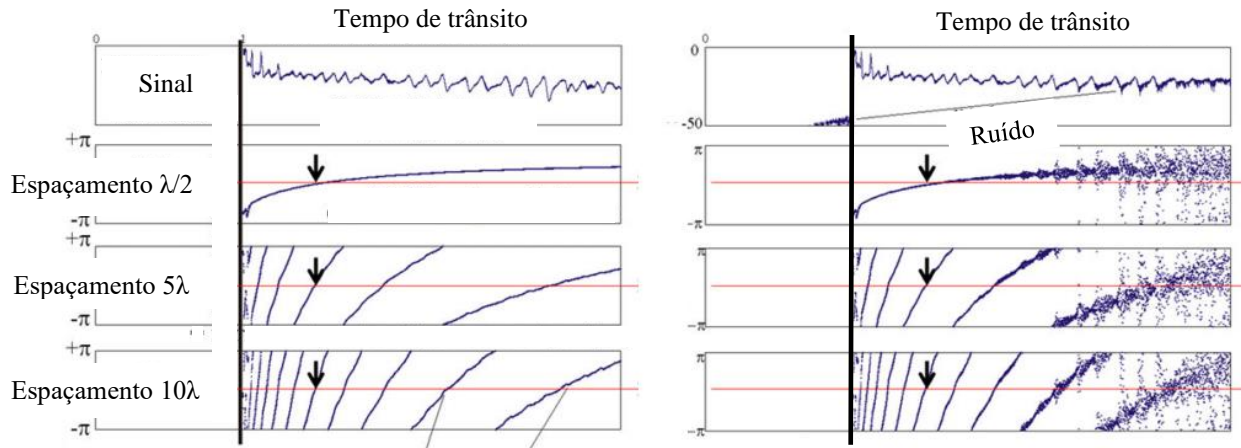


Figura 8 – Exemplo de diferentes arrays com elementos espaçados entre $\lambda/2$, 5λ e 10λ (de cima para baixo). A figura da esquerda não apresenta ruído. A da direita tem uma relação sinal-ruído de 30 dB. Uma incerteza na determinação do zero crossing (seta preta) em um array com espaçamento $\lambda/2$ gera uma variação consideravelmente maior no cálculo do tempo do que uma incerteza em um array com espaçamento 10λ . Quanto maior o espaçamento entre os elementos do array, mais vertical é a curva, fazendo com que a mesma não sofra tanto a ação de incertezas como as ocasionadas pelo ruído. Fonte: adaptado de CLARKE (2013a).

Através desse procedimento é possível se estabelecer o par ângulo-tempo para cada eco de retorno que chega em um *array*. A interferometria é utilizada por ambos os sensores a serem abordados neste trabalho: MBES e PDBS. Entretanto, ela é usada para fins diferentes em cada um. No MBES, se destina ao cálculo do instante exato de recepção do eco de retorno para se obter o TWTT³ (*two way travel time*). Já no PDBS, objetiva o cálculo do ângulo de chegada do eco de retorno (JERRAM; SCHMIDT, 2015b).

2.2 DETECÇÃO NO ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE

Como já explanado, o ecobatímetro multifeixe é formado por dois transdutores, um emissor e um receptor. O transdutor transmissor fica paralelo ao comprimento do navio e produz uma frente de onda que é estreita no sentido longitudinal (*alongtrack*) e larga no transversal (*acrosstrack*). Já o receptor se dispõe no sentido transversal do navio e através da técnica do *steering*, consegue gerar determinados setores angulares que receberão o eco da onda sonora propagada pelo transmissor (CARTWRIGHT, 2003) (Figura 9). Assim, o receptor sabe de quais ângulos estão vindo os ecos que serão processados e gerarão a informação de profundidade.

³ Tempo que demora para o feixe sonoro sair do transdutor, ir até ao alvo e retornar.

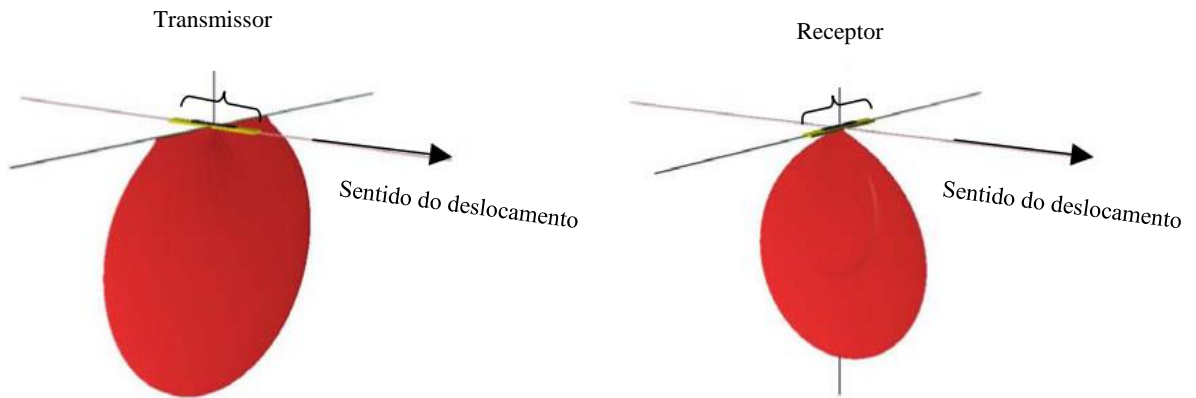


Figura 9 – Disposição dos feixes de transmissão e recepção durante a técnica do mills cross. Na esquerda tem-se o transmissor, cujo feixe é estreito alongtrack e largo acrosstrack. Na direita tem-se o receptor, cujo feixe é estreito alongtrack e largo acrosstrack. Fonte: adaptado de CARTWRIGHT (2003).

Para se chegar na informação da profundidade, faz-se necessário o conhecimento do TWTT (também chamado de TOA – *Time Of Arrival*) e do ângulo de chegada do sinal (DOA – *Direction Of Arrival*) (PEREIRA, 2015). Estas duas variáveis podem ser expressas, por ocasião da recepção do sinal, em duas formas: o Diagrama de Torta (*Pie Diagram*) e o Diagrama Tempo-Ângulo (*Time-Angle Diagram*). O primeiro é uma forma polar de mostrar as duas grandezas físicas, tendo como origem dos ângulos o transdutor, o eixo x como sendo o ângulo e o eixo y tempo. O segundo método é um gráfico cartesiano, sendo o eixo do x o tempo e o eixo y o ângulo (PEREIRA, 2015). Através desses gráficos é possível verificar que, a partir de uma variável, pode-se obter a outra. Ou seja, a partir de determinado TOA, obtém-se um DOA e a recíproca também é verdadeira (Figura 10).

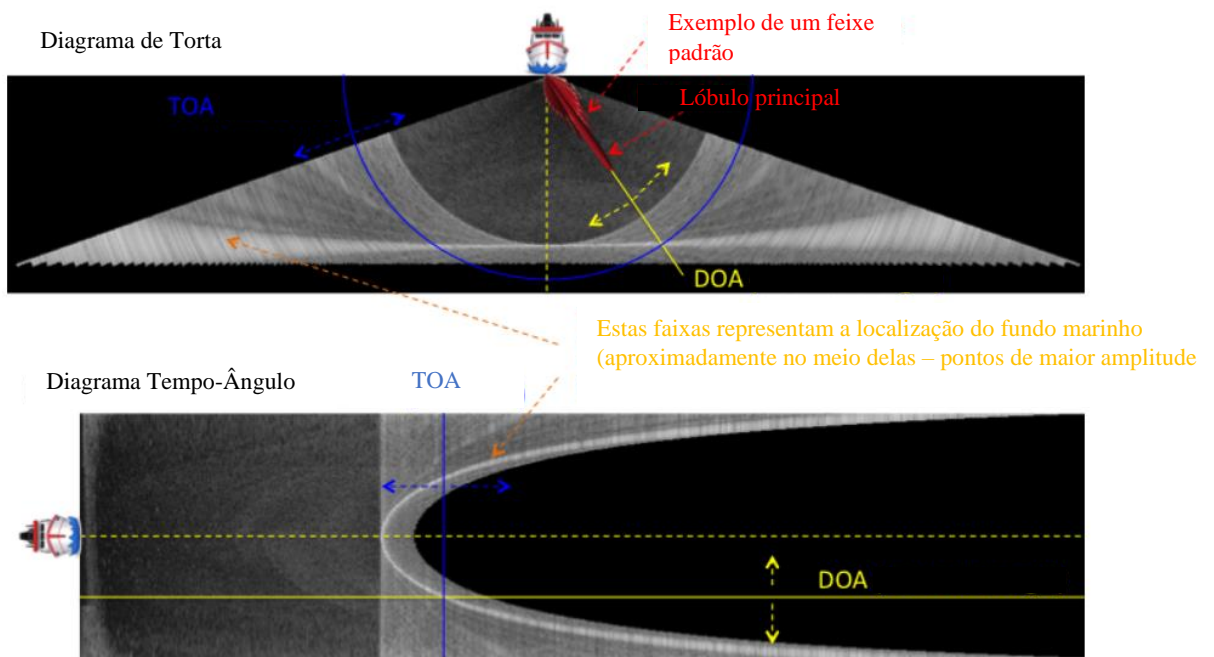


Figura 10 – Diagrama de Torta e Tempo-Ângulo. A partir dessas figuras é possível se vislumbrar como a partir do DOA pode-se inferir o valor do TOA e vice-versa. Importante notar que a detecção o fundo marinho é representado por faixas e não por linhas de valores únicos. Tal fato mostra que existe uma incerteza nos cálculos de uma grandeza a partir da outra. Fonte: adaptado de PEREIRA (2015).

Contudo, existe uma incerteza na definição dos valores exatos do par, sendo que a escolha de um valor de ângulo pode representar mais de um valor no campo do tempo e vice-versa. Dessa forma, a escolha das informações que venham a gerar a profundidade não é tão simples. A fim de resolver a questão, foram desenvolvidas técnicas, sendo as mais amplamente utilizadas a detecção em amplitude e em fase. Este trabalho abordará três técnicas: WMT (*Weighted Mean Time*), diferenciação por fase e HDBF (*High Definition Beam Forming*) (PEREIRA, 2015). Nelas, o princípio consiste, basicamente, na definição de um TOA a partir de um DOA.

Para se ter uma boa compreensão das técnicas, suas vantagens e desvantagens, é necessário o entendimento do conceito de *footprint*. *Footprint* (ou pegada) é a projeção do feixe sobre o fundo marinho (JERRAM; SCHMIDT, 2015b). Assim, quanto menor for o ângulo de incidência (ou maior o ângulo de ataque – *grazing angle*), profundidade e largura do feixe, menor será o *footprint*. O revés também ocorre, de forma que quanto menor o *grazing angle*, maior a profundidade e a largura do feixe, maior será o *footprint*. Quanto menor este for, menor porção do solo ele representará, o que aumenta o poder discriminador, gerando uma melhor resolução (Figura 11). Ao contrário, quanto maior ele for, menor o poder discriminador

(PEREIRA, 2015; USACE, 2013). Pode-se vislumbrar um exemplo do EM3000S no qual o *footprint* nadiral (logo abaixo do receptor, no seu nadir, resultando em um alto *grazing angle*) seja relativo a um feixe com largura $0,9^\circ$ e com *footprint* de 1,6% da profundidade, enquanto que um feixe lateral terá uma largura de $1,8^\circ$ e um *footprint* de 20% da profundidade (CLARKE, 2012).

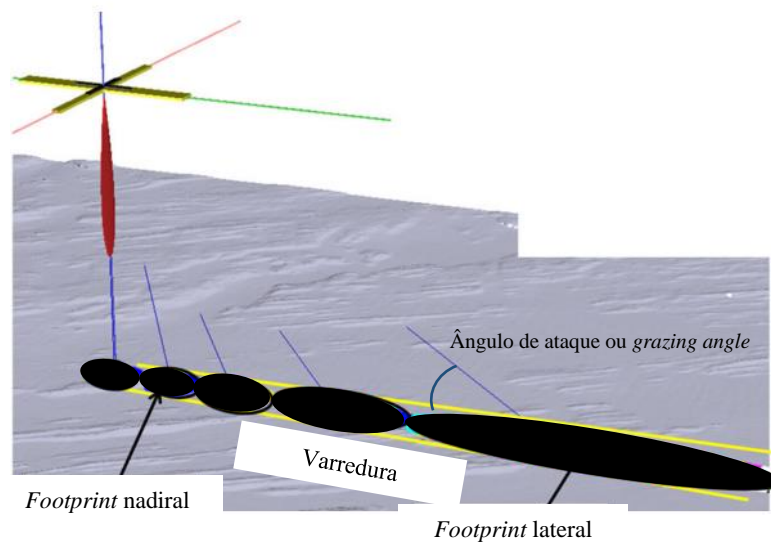


Figura 11 – As elipses pretas representam o footprint. Quanto mais centrais os footprints, menores eles são.
Fonte: adaptado de CLARKE (2013b).

2.2.1 WMT

A técnica WMT é conhecida como detecção por amplitude. Ela vai utilizar a amplitude do sinal no tempo em cada canal para a determinação do TOA, considerando como DOA o centro do feixe direcionado. Cada canal é formado por um conjunto de elementos que compõem o receptor que podem variar nos diferentes modelos de multifeixe existentes, e representa um determinado ângulo. A informação do ângulo de chegada já é uma informação pré-determinada, restando saber o momento exato em que o sinal chega naquele ângulo (L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS, 2000; PEREIRA, 2015;).

Nesta técnica, detecta-se o pico do feixe como sendo o ponto onde houve a maior interação entre o solo e o feixe. Intuitivamente, ele representaria o TOA. Porém como o *footprint* representa uma porção do fundo, há de se considerar que o pico pode não ser representativo do momento de intercepção do feixe com o solo e sim de alguma mudança na natureza do fundo. O pico do sinal pode não ser a representação da profundidade, e sim a

⁴ A largura do feixe aumentará nos transdutores planos conforme estes forem cada vez mais laterais. Isto ocorre pela própria geometria do feixe, por ocasião da sua inclinação.

constatação de fundos marinhos de natureza diferentes dentro de um mesmo *footprint*. Em prol de minimizar tais possibilidades, o que é considerado, mais normalmente, é o centro de massa do sinal (Figura 12). O instante no qual se atinge seu centro de massa será considerado como o TOA (PEREIRA, 2015).

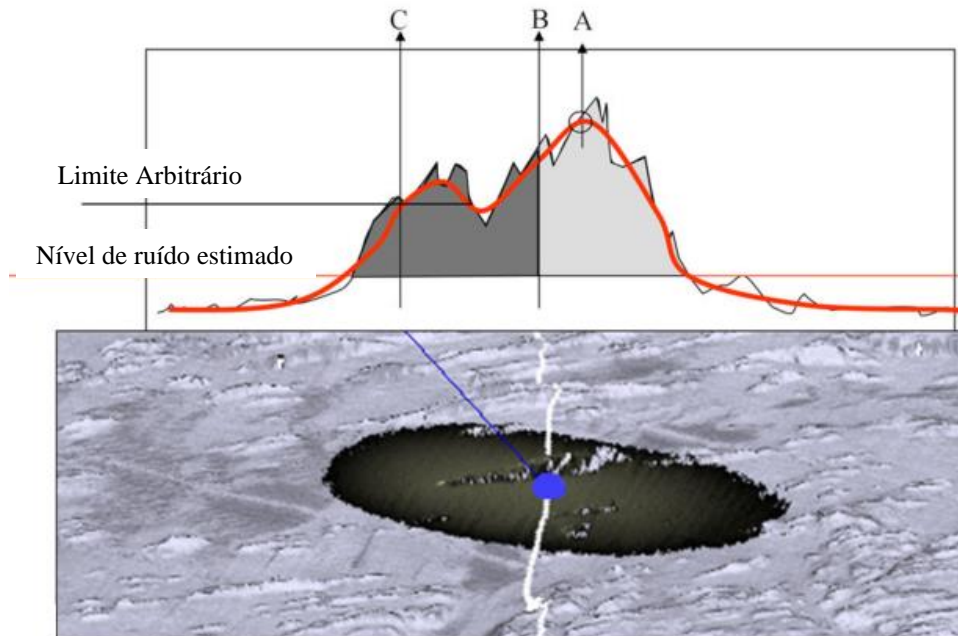


Figura 12 – Eco de retorno sendo processado por WMT. Em cima se tem a amplitude do sinal de retorno variando de acordo com o tempo. O ponto A é o pico do sinal já amaciado por uma média móvel. O ponto B é o centro de massa do sinal. O ponto C é o limite do sinal a partir do qual ele tenha uma amplitude que será considerada para o processamento. Fonte: adaptado de CLARKE (2013b).

A desvantagem dessa técnica é que quanto maior for o *footprint*, menos concentrado e pronunciado será o sinal. Logo ficará difícil encontrar o ponto do centro de massa, haja vista que qualquer variação pode alterar sua posição (e conseqüentemente o TOA) significativamente (PEREIRA, 2015).

Assim, o WMT é muito utilizado nos feixes nadirais ou centrais, onde seus respectivos *footprints* são pequenos (OHI, 2005).

2.2.2 Diferenciação de fase

Esta técnica é a detecção por fase. Cada canal, após direcionado no ângulo estabelecido, terá seus elementos subdivididos em dois ou mais receptores diferentes, espaçados por um múltiplo de comprimento de onda do sinal (Figura 13). Através da interferometria, pode-se

comparar as fases dos ecos de retorno. No instante onde a diferença de fase é 0 (*zero crossing*), será o instante em que o canal recebeu o sinal referente ao ângulo em que ele estava direcionado. Este será o momento exato da detecção (Figura 14) (PEREIRA, 2015).

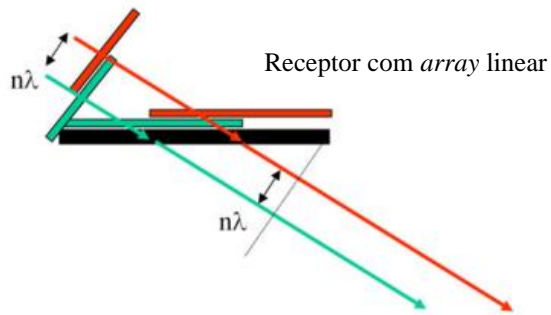


Figura 13 – Canal de um receptor de array linear para detecção em fase. Fonte: adaptado de CLARKE (2013b).

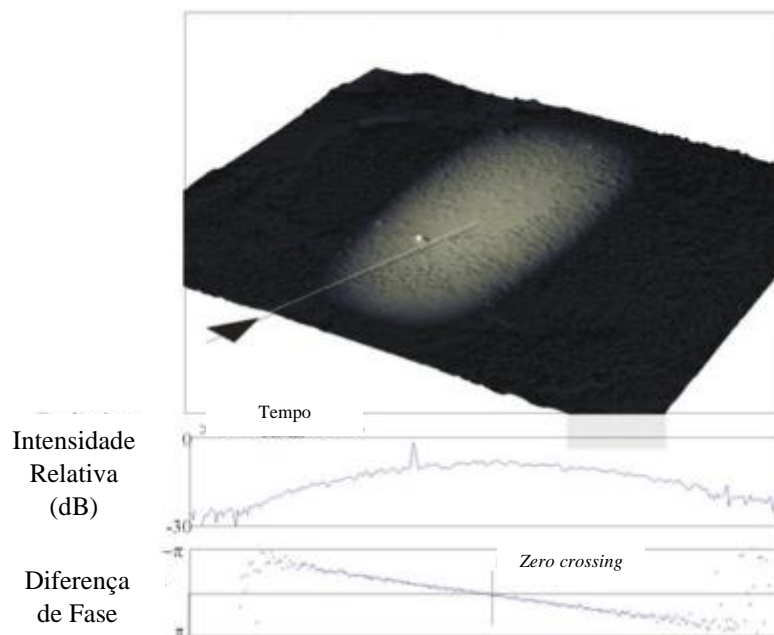


Figura 14 – Detecção por fase. Na figura mais acima tem-se o footprint em um grazing angle pequeno. Na figura do meio tem-se como é sua amplitude no tempo. A figura de baixo mostra a diferenciação de fase no tempo. O instante do zero crossing é o instante da detecção (TOA). Fonte: adaptado de CLARKE (2013b).

Aqui, como explicado anteriormente, também ocorrem ambiguidades, entretanto, elas são eliminadas a partir do momento que cada feixe já tem um ângulo pré-estabelecido. Ainda existe a possibilidade de ocorrer a ambiguidade dentro do canal. Tal fato pode acontecer com

objetos muito pequenos dentro de um *footprint* lateral (já que ele é maior quanto maior for a obliquidade), dificultando a detecção de alguns objetos (PEREIRA, 2015).

A desvantagem desta técnica é que quanto mais nadiral o sinal (maior o *grazing angle*), mais difícil é a diferenciação por fase. Tal fato faz com que esta técnica seja perfeita para os feixes laterais, desde que a SNR (*Signal-to-Noise Ratio* – relação sinal-ruído) seja alta, porém não é recomendada para os feixes centrais (PEREIRA, 2015).

2.2.3 HDBF

Esta é uma variação da diferenciação por fase. Nesta, da mesma forma que o WMT e a diferenciação por fase, cada feixe (canal) será representado por uma profundidade. Entretanto, sabe-se que os feixes laterais têm *footprint* maior e, independentemente do seu tamanho, só há uma profundidade representativa do mesmo.

Todavia, a partir da determinação do *zero crossing* pode-se determinar também o instante do cruzamento em $-\pi/4$, $\pi/4$, $-\pi/2$, $\pi/2$, $-3\pi/4$ e $3\pi/4$ (instantes mais utilizados). Neste procedimento, existirão mais pares ângulo-tempo, dando origem a mais profundidades dentro de um mesmo *footprint*, o que aumenta a resolução e o poder discriminador (Figura 15) (PEREIRA, 2015).

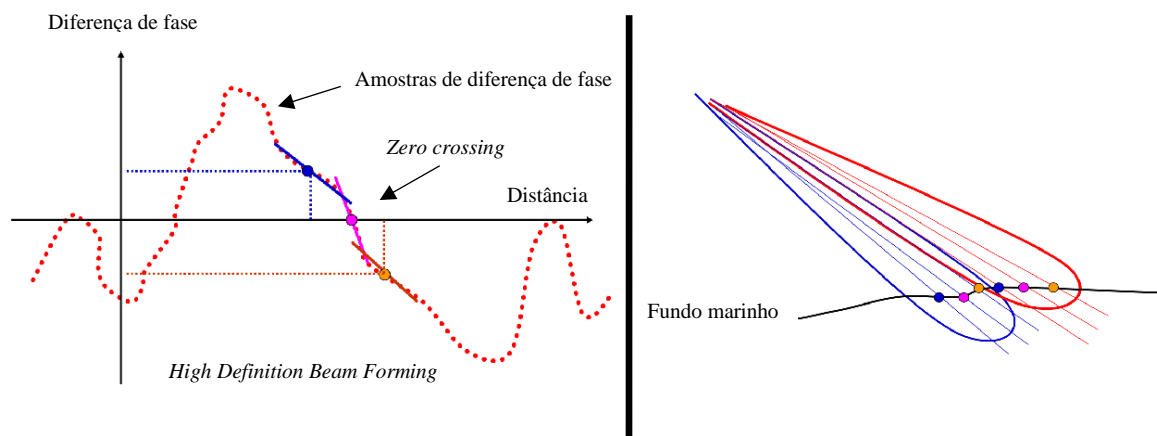


Figura 15 – HDBF. Na figura da esquerda tem-se como cada diferença de fase pode calcular mais de uma profundidade a partir do zero crossing. Na direita tem-se como cada feixe pode gerar mais de uma profundidade. Fonte: adaptado de KONGSBERG MARITIME (2014b).

2.2.4 Conclusão sobre os métodos

Atualmente, as técnicas utilizadas são o WMT para os feixes centrais, a diferenciação por fase e o HDBF para os feixes laterais (PEREIRA, 2015).

Essa divisão de técnica entre feixes centrais e laterais não é uma verdade absoluta. Todos os feixes passam pelas técnicas de WMT e diferenciação por fase, sendo verificado qual é a técnica que resultará em uma menor incerteza de profundidade dentro de cada feixe. Após essa verificação, é escolhida a técnica que apresentou menor incerteza. A partir desse ponto, e desde que seja escolhida diferenciação por fase, a HDBF pode ser aplicada.

A alternância entre detecção de amplitude ou fase dentro de uma mesma varredura se deve à duração do eco de retorno: se for de curta duração, será utilizado o método de detecção por amplitude (WMT), se for de longa duração, fase (Detecção por fase e HDBF) (Figura 16) (KONGSBERG MARITIME, 2014b).

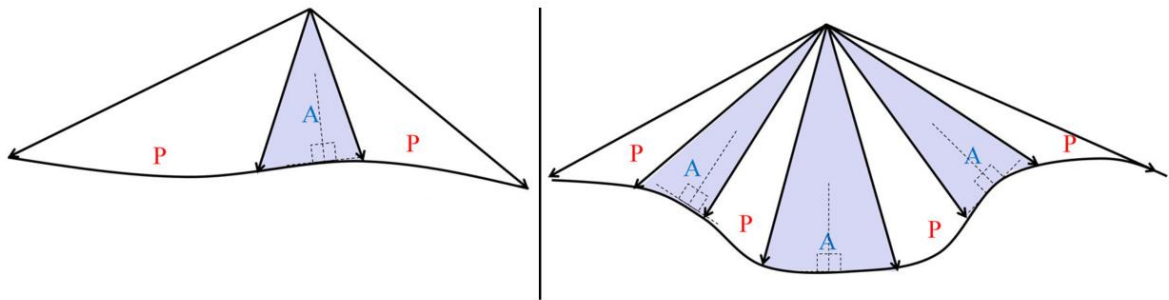


Figura 16 – Métodos de detecção diferente dentro de uma mesma superfície. Na esquerda, o fundo aproximadamente plano oferece um padrão de reflexão aproximadamente especular. Nesse caso, os feixes mais perpendiculares ao fundo marinho terão um eco de retorno de curta duração e conseqüentemente seu método de detecção de profundidades realizado por amplitude (representado no desenho em azul e pela letra A). O inverso ocorre com os feixes laterais, tendo sua detecção por fase (representado no desenho em branco e pela letra P). Na direita, o fundo não é plano, o que leva a ter feixes não centrais a terem uma incidência perpendicular ao fundo marinho. Logo eles serão detectados por amplitude, enquanto o restante será por fase. Fonte: CLARKE (2013a).

2.3 DETECÇÃO NO SONAR DE VARREDURA LATERAL INTERFEROMÉTRICO

Ao contrário do MBES, o PDBS não possui diferentes métodos de detecção. Ele utiliza apenas a interferometria, ou seja, o método de detecção por fase, porém com algumas variações e adaptações.

O PDBS possui um transmissor do sinal e mais de dois receptores, de modo a poder calcular a diferença de fase do sinal de retorno. Porém, ele não tem a técnica *steering*, ou de direcionamento de feixes. O *array* transmissor é comprido na direção do equipamento e estreito no sentido transversal (Figura 17), de modo a criar um feixe que seja curto *alongtrack* e longo *acrosstrack*. Tal fato permite que o PDBS ensonifique uma grande área transversal ao deslocamento do equipamento, porém uma pequena área no sentido do deslocamento (BLODEL, 2009; JERRAM; SCHMIDT, 2015b). Até esse ponto, ele se assemelha ao multifeixe.



Figura 17 – Na esquerda, a disposição dos elementos em uma visão frontal. Nele pode-se ver o transmissor e os diversos pares de receptor espaçados em diferentes distâncias. Fonte: CLARKE (2013a). Na direita tem-se o equipamento montado em um AUV REMUS 100S da Empresa Kongsberg Maritime. Nele, o transdutor mais de ré é de um sidescan sem interferometria (dentro do círculo azul). O que está à frente (dentro de um círculo vermelho) é o Geoswath Plus, um sidescan sonar interferométrico. O array é disposto no sentido do deslocamento do equipamento. Fonte: adaptado de KONGSBERG MARITIME (2015).

Os seus receptores são dispostos paralelos ao transmissor. Isso permite que os mesmos tenham um feixe de recepção com a mesma geometria do feixe de transmissão. Dessa forma, fica impossível fazer o direcionamento dos feixes de recepção, pois o mesmo não está disposto *acrosstrack*, sendo inexequível ter pré-ciência do DOA. Na detecção do PDBS, a diferença de fase, ao revés da sua técnica correlata no MBES, é determinado o DOA (JERRAM; SCHMIDT, 2015b) por meio do TOA. Da mesma forma do multifeixe, cada par do interferômetro irá realizar a detecção por fase, contudo, estimando o DOA (LURTON, 2000).

A ambiguidade advinda da interferometria era resolvida a partir da pré-ciência do DOA, no caso do multifeixe. Entretanto, o PDBS não pode contar com esse mesmo artifício. O problema é resolvido por meio de diversos pares de receptores espaçados a diferentes distâncias, mesmo sabendo que basta apenas um par de receptores para realizar a diferença de fase. Aqui será aplicada a técnica de Vernier. Nesta, cada par de receptores irá calcular vários ângulos (o correto e suas ambiguidades). A partir desse ponto, se verifica qual ângulo coincide entre os

diversos pares. Ocorre que cada par terá apenas um ângulo que seja igual ao dos outros pares. Isso acontece porque os espaçamentos entre eles são diferentes, assim as ambiguidades não serão as mesmas (BLODEL, 2009; DENBIGH, 1989; LURTON, 2000; SCHMIDT; WEBER; LURTON, 2013). O ângulo que é o mesmo em todos os pares é tido como DOA (Figura 18). Dessa forma pode-se estabelecer o par Tempo-Ângulo, de forma a calcular a profundidade.

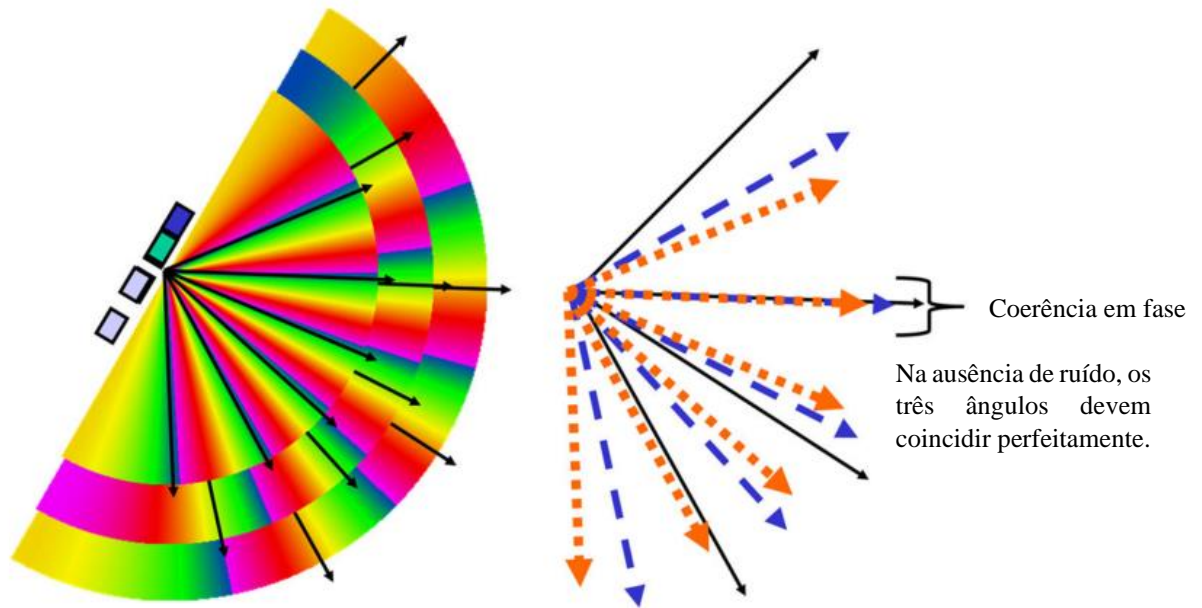


Figura 18 – Método Vernier. Cada par produzirá diversas leituras de ângulos. O valor que coincidir será o DOA. Na esquerda tem-se os arrays dispostos paralelamente e o sinal de retorno com suas ambiguidades. Na direita tem-se os ângulos possíveis. Fonte: adaptado de CLARKE (2013a).

Tal artifício seria perfeito se não houvesse um ruído envolvido no sistema. O ângulo correto não apresenta exatamente o mesmo valor em todos os pares de receptores. Assim, na hora de fazer a incidência, deve haver uma tolerância, e o estabelecimento do DOA correto é uma média entre os valores de ângulo coincidentes ou cada ângulo gerado será um par DOA-TOA (JERRAM; SCHMIDT, 2015b). Com isso, dependendo da SNR, pode haver incerteza na determinação da profundidade. Junta-se a isso outras fontes de erro, tais como: falta de correlação entre as linhas de base (*Baseline Decorrelation*), efeito da mudança de *footprint* (*Shifting Footprint Effect*), ambiguidade de mesma distância (*Common Slant Range Ambiguity* ou *Layover*) e espaço do nadir (*Nadir Gap*).

2.3.1 Ruído adicional

O ruído adicional que interfere no eco de retorno pode ter três causas: o sonar propriamente dito, a plataforma que conduz o sonar (navio, lancha, AUV, ROV, etc) e o ambiente marinho (LURTON, 2000). Isto causa uma interferência e influencia o eco de retorno, de modo a prejudicar sua detecção e o estabelecimento do par ângulo-tempo. Quanto maior a intensidade de ruído na água, menor será a relação sinal ruído (SNR) e maior a incerteza na detecção do sinal.

A Figura 8 mostra como um sinal se deteriora com a adição de ruídos de 30 dB, 40 dB e 50 dB, fazendo com que o mesmo tenha uma incerteza mais alta conforme for diminuindo o *grazing angle*. Tal fato chega a impossibilitar a detecção em locais cuja a obliquidade venha a ser muito alta. A Figura 19 mostra como o ruído adicional afeta a SNR, a determinação de diferença de fase, do ângulo de chegada e da profundidade. Nesta simulação, a altura do sensor foi de 50 metros e a frequência de equipamento de 100 KHz. Foram adicionados 3 ruídos com intensidades diferentes de 30 dB, 40 dB e 50 dB. Em todos os quadros, o eixo x corresponde à distância nadiral. Quanto maior a distância, mais distante o eco de retorno estará do sensor, conseqüentemente maior será a obliquidade e menor o *grazing angle*. Como a altura do sensor foi de 50 m, a distância 0 m corresponde a uma obliquidade de ângulo 0°, 100 m representa aproximadamente 63°, 200 m representa aproximadamente 76° e 400 m representa aproximadamente 83°. No primeiro quadro (à esquerda em cima), o eixo y representa a SNR. No segundo quadro (à direita em cima), o eixo y representa a incerteza na detecção da diferença de fase. No terceiro quadro (à esquerda em baixo), o eixo y representa a incerteza na determinação do ângulo de chegada (ver Eq. 1). No quarto quadro (à direita em baixo), o eixo y representa a incerteza na determinação da profundidade.

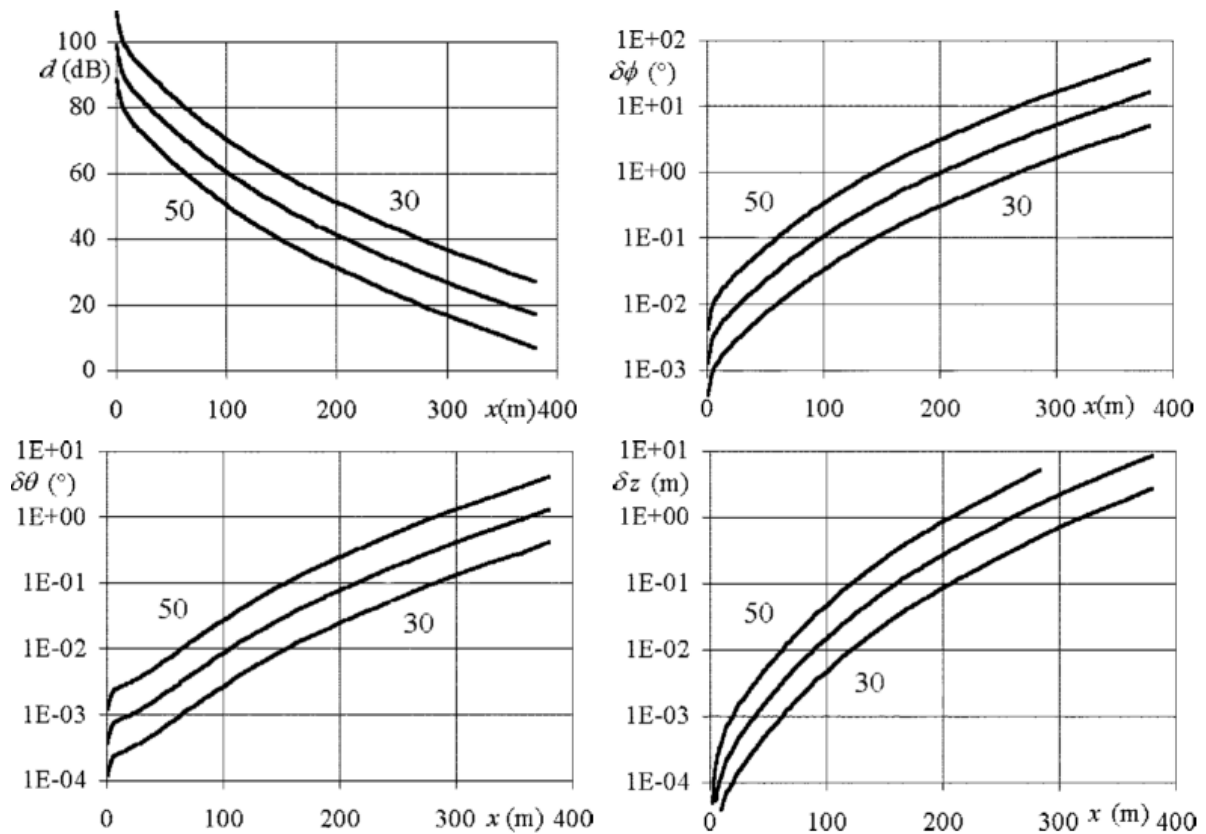


Figura 19 – A figura mostra o efeito do ruído adicional na detecção. Fonte: LURTON (2000).

2.3.2 Falta de correlação entre as linhas de base

Nele, se considera que os *footprints* de cada recepção dentro do par não são exatamente iguais. Como cada *footprint* é formado pelo somatório de retroespalhamento dos pontos difratores e este somatório pode ser diferente em cada sensor (dado que o retroespalhamento é aleatório, o sinal de um ponto difrator que chega em um receptor não é necessariamente o mesmo sinal que chega no outro, fazendo com que interajam entre si, levando à uma composição diferente em cada receptor) (Figura 20). Isto leva a uma falta de coerência entre os sinais de saída de cada receptor (JIN; TANG, 1996), e conseqüentemente a flutuações na medida da diferença de fase e na medida do ângulo de chegada. Mesmo que a direção calculada seja a do centro do *footprint*, haverá uma pequena diferença entre dois pares distintos (LURTON, 2000).

Na Figura 21 tem-se um exemplo de incerteza da profundidade causada pela falta de correlação entre as linhas de base. Nesta simulação, foram considerados as mesmas condições

da Figura 19, o eixo do interferômetro de 75° e o espaçamento entre os sensores de 2λ (LURTON, 2000).

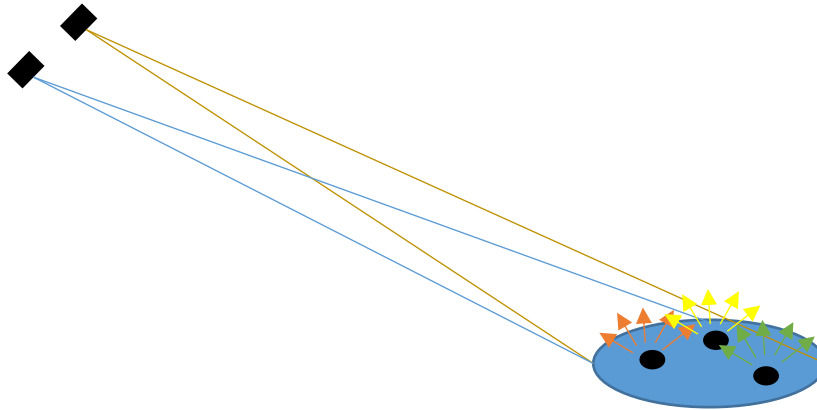


Figura 20 – *Baseline Decorrelation Effect*. Em preto estão representados os pontos difratores. Cada ponto gerará um sinal de retroespalhamento diferente (representado pelos ecos em vermelho, amarelo e verde) e em várias direções.

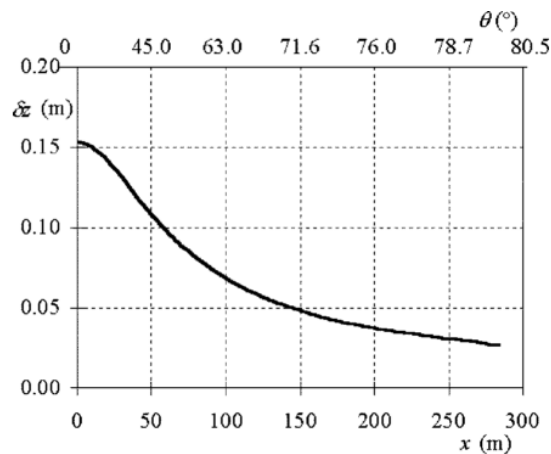


Figura 21 – Incerteza da profundidade (eixo y, em metros) em função da distância nadiral (eixo x abaixo, em metros) e do ângulo oblíquo (eixo x acima, em graus) devido à falta de correlação entre as linhas de base.

Fonte: LURTON (2000).

2.3.3 Efeito da mudança de footprint

O efeito da correlação entre as linhas de base parte do princípio que ambos os sensores estão recebendo o eco do mesmo *footprint*. Entretanto, tal premissa é injustificada (LURTON, 2000). Como a fase é comparada em um mesmo instante, o trecho imageado não pode ser o mesmo, desde que a distância entre o ponto difrator e o receptor A e B não são as mesmas (a menos que o ponto difrator ou o centro do *footprint* estejam no eixo do interferômetro. Nesse caso, o efeito de mudança de *footprint* é zero). Assim, cada eco gerado pelo sinal emissor terá uma reflexão em A e para um mesmo instante terá outra em B. Como a distância do fundo

marinho até o receptor A é menor do que ao receptor B, para o mesmo instante, o *footprint* de A é mais longe do receptor que o de B (considerando fundo plano) (Figura 22).

O efeito de mudança de *footprint* dependerá do espaçamento entre os receptores⁵, altitude e ângulo de incidência. Na prática, o que é usado para a diferença de fase é o que há em comum entre os *footprints* (Δx). A diferença entre os *footprints* (dx) atua como ruído (LURTON, 2000).

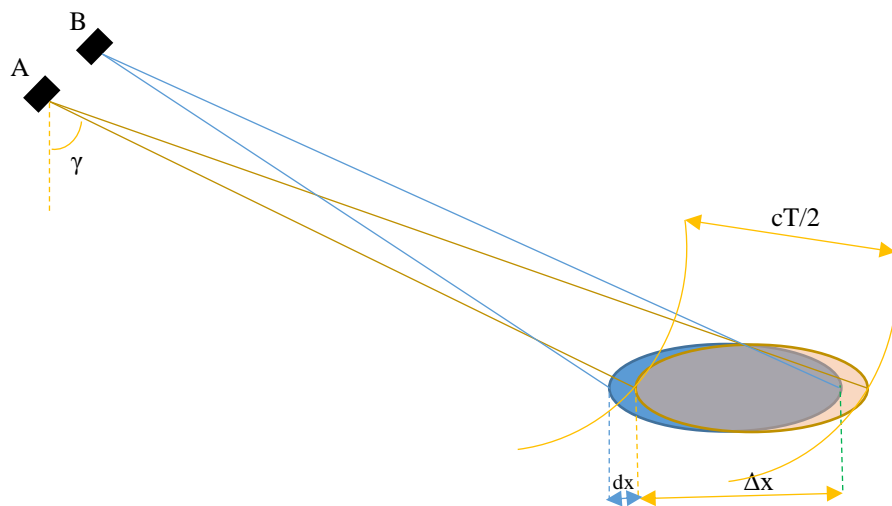


Figura 22 – *Shifting Footprint Effect*. A distância $\Delta x = cT/(2sen\gamma)$, onde c é a velocidade média do som na água, T é o tempo de duração do sinal ou o inverso da largura de banda (caso de um sinal modulado) e γ é a inclinação do eixo do interferômetro. A distância dx é a diferença entre os dois *footprints*.

Contudo, isso não quer dizer que o efeito da falta de correlação não ocorra, mas que ambas ocorrem concomitantemente. Em uma largura de pulso maior, maior será o efeito da falta de correlação entre as linhas de base para ângulos de baixa obliquidade, enquanto para alta obliquidade, o efeito predominante é o da mudança de *footprint*, independente da largura de pulso. Deve-se levar em conta, ainda, a altitude do sensor. Quanto menor a altitude, maior o efeito da falta de correlação de linha de base (Figura 23). Em um sonar batimétrico, utiliza-se uma largura de pulso pequena (mais sensível ao efeito da mudança de *footprint*), de modo a se

⁵ Quanto maior for o espaçamento entre os receptores, maior será o efeito de mudança de *footprint*. Entretanto, foi visto anteriormente que quanto maior o espaçamento, maior a acurácia. Ocorre que o efeito da mudança do *footprint* limita um pouco esse princípio, contudo, este efeito é menos maléfico para a acurácia do que um menor espaçamento entre os receptores (LURTON, 2000).

ganhar em resolução angular, mas em águas rasas, o que diminui a altitude do sensor (mais sensível ao efeito da falta de correlação de linha de base), de modo que ter-se-á os dois efeitos interagindo no sinal de retorno (LURTON, 2000).

A Figura 23 mostra modelos de incerteza da medida de diferença de fase em função da distância nadiral e do ângulo oblíquo. Nos quadros, tem-se a simulação diferença de fase de um retroespalhamento e os modelos numéricos da falta de correlação de linha de base e da mudança de *footprint*. À esquerda, tem-se a mesma configuração da Figura 21 com uma largura de pulso $T=0,5$ ms. A simulação do retroespalhamento segue o modelo do efeito da mudança de *footprint*. À esquerda, tem-se a mesma configuração anterior, porém o sensor está a 20 metros de altitude e a largura de pulso foi alterada para $T=5,0$ ms. O efeito da mudança de *footprint* pode ser sentido a partir da distância nadiral de 100 metros. Reparar que em ambos os quadros, por volta do ângulo de 75° , que corresponde ao eixo do interferômetro.

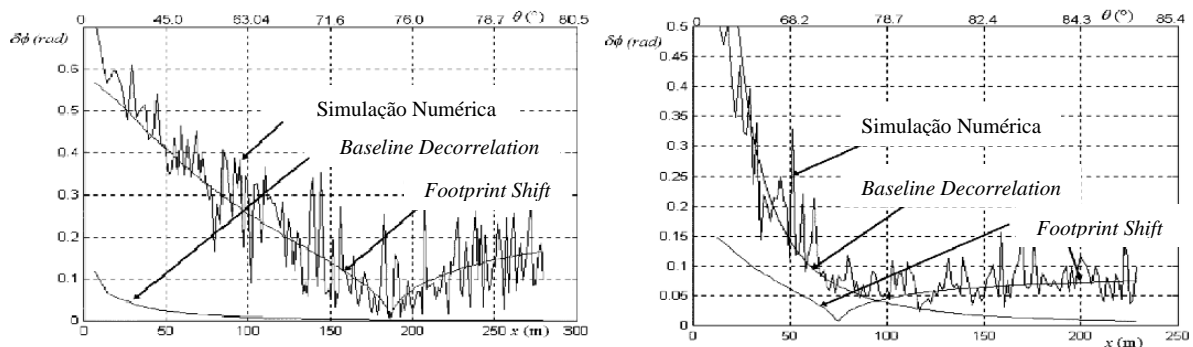


Figura 23 – Modelos de incerteza da medida de diferença de fase em função da distância nadiral e do ângulo oblíquo. Fonte: adaptado de LURTON (2000).

2.3.4 Ambiguidade de mesma distância (layover) e espaço do nadir (nadir gap)

O último problema a ser analisado deriva do fato de dois pontos do fundo marinho terem a mesma distância do sensor com a tolerância da largura de pulso do sinal emitido (SAUCAN et al., 2015). Isso faz com que dois pontos distintos sejam lidos como um só ponto (WOOCK; FREY, 2010), pois chegam a sensor ao mesmo tempo. Assim, a fase de ambos os pontos será computada como se fosse de um só, sendo combinadas irreversivelmente (ĂRĂCIN; CALIN, 2000), de modo a fornecer um resultado aleatório que não reflete nenhum dos ângulos corretos (Figura 24). Esses pontos não terão uma solução batimétrica (ĂRĂCIN; CALIN, 2000) e serão apresentados como se fossem ruídos.

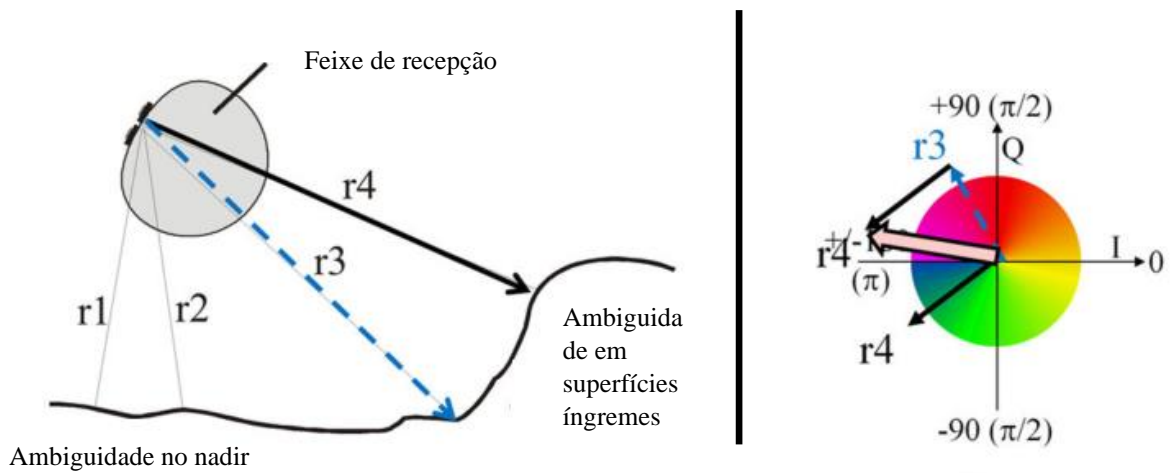


Figura 24 – O primeiro quadro mostra um desenho esquemático da geometria de interação dos feixes com o fundo marinho, no qual $r1=r2$ e $r3=r4$. No segundo quadro está o cálculo de fase para $r3$ e $r4$, mostrando que o resultado será uma fase totalmente diferente. Fonte: adaptado de CLARKE (2013a).

Existem duas situações em que tal fenômeno pode ocorrer: no nadir e em superfícies muito íngremes (Figura 25 e Figura 26). Isso pode ser visto muito claramente em imagens batimétricas adquiridas com o PDBS, nas quais o nadir apresenta um resultado com pouca densidade de informações.

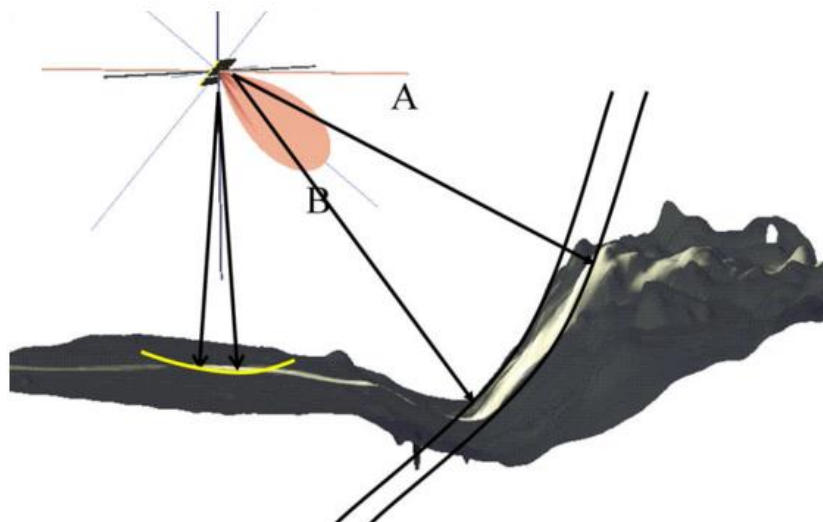


Figura 25 – Os pontos compreendidos entre os raios A e B tem a mesma distância (dentro de uma largura de pulso) do sensor. Todos esses pontos serão lidos como se fossem apenas um e todos os sinais de retorno serão utilizados para cálculo da diferença de fase. Com isso, seu valor será aleatório e não terá uma solução batimétrica. O problema do espaço do nadir também deriva do mesmo princípio. Fonte: CLARKE (2013a).

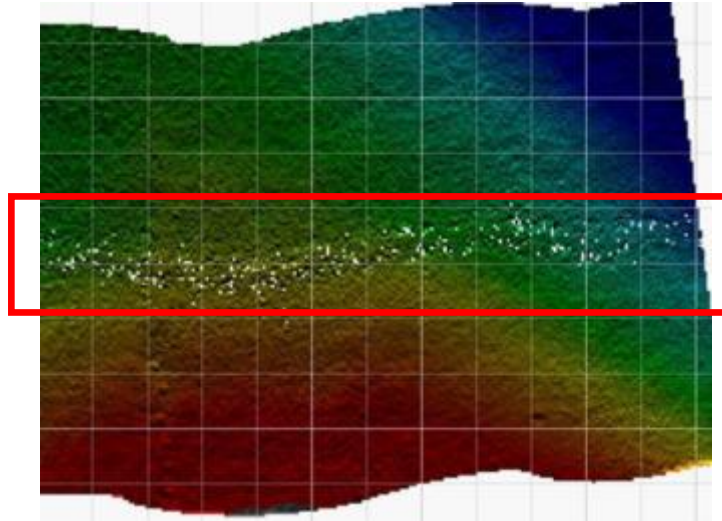


Figura 26 – Superfície batimétrica gerada a partir de dados adquiridos com PDBS. No quadrado em vermelho se nota a pouca densidade de dados na região nadiral. Fonte: adaptado de CLARKE (2013a).

3. BIBLIOGRAFIA

AI, Y ; PARENT, M. Performance Analysis Using an Uncertainty Model for HydroChart 5000. *Sea Technology*, Arlington, United States: Compass Publications Inc., 2011. Disponível em: < <https://geo-matching.com/uploads/default/m/i/migrationvwmfdr.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

ĂRĂCIN, Aruel; CALIN, Alexandru. Interferometric Bathymetry - principles and utility. *Recent Advances in Geodesy and Geomatics Engineering: Proceedings of the 1st European Conference of Geodesy & Geomatics Engineering (GENG '13)*, Antalya, Turkey: WSEAS Press. p. 198–205, out. 2013.

BJØRNØ, L. Developments in sonar and array technologies. In: 2011 IEEE Symposium on Underwater Technology, UT'11 and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, SSC'11, 1., Tokyo, Japan. *Proceedings...* Tokyo: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 1-11, abr. 2011.

BLODEL, Philippe. *The Handbook of Sidescan Sonar*. Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd., 2009. 311p.

BRISSON, L. N.; WOLFE, D.; STALEY, M. P. S. M. Interferometric swath bathymetry for large scale shallow water hydrographic surveys. In: 2014 Canadian Hydrographic Conference (CHC-2014), 1., 2014, St. John's N&L, Canada. *Proceedings...* . 2014. pp. 1-18.

CARTWRIGHT, Doug. *Multibeam Bathymetric Surveys in the Fraser River Delta, Managing Severe Acoustic Refraction Issues*. Fredericton, 2003. 168 f. Dissertação (Master of Engineering) - Unit of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, 2003.

CLARKE, J. E. H. *Conventional and Bathymetric Sidescan*. 23 out. 2013a. 28 slides. Material apresentado para disciplina de Imaging and Mapping II (Inglês), curso de Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick.

_____. *Multibeam Bottom Detection*. 2013b. 47 slides. Material apresentado para disciplina de Imaging and Mapping II (Inglês), curso de Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick.

_____. *Multibeam Introduction*. 16. out. 2012. 41 slides. Material apresentado para disciplina de Imaging and Mapping II (Inglês), curso de Geodesy and Geomatics Engineering,

University of New Brunswick.

DENBIGH, P. N. Swath Bathymetry: Principles of Operation and an Analysis of Errors. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 14, n. 4, p. 289–298, 1989.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). *Normas da Autoridade Marítima Para Levantamentos Hidrográficos - NORMAM-25/DHN*. 2ª Revisão. 2017.

DODD, D. *Uncertainty Evaluation of the EdgeTech 4600 Swath Bathymetry System*. In: US Hydrographic Conference 2013, 1., 2013, New Orleans, United States. *Proceedings...* . 2013.

GARELLO, R. et al. Radar and sonar interferometry. In: Acoustics 08 Paris, 1., 2008, Paris, França. *Proceedings...* . 2008. pp. 6297-6302.

GOSTNELL, C. Efficacy of an interferometric sonar for hydrographic surveying: Do interferometers warrant an in-depth examination? - A Preliminary Study. In: US Hydrographic Conference 2005, 1., 2005, San Diego, United States. *Proceedings...* . 2005.

JERRAM, K.; SCHMIDT, V. *Object Detection with Phase-Measuring Bathymetric Sidescan Sonar Depth Data*. Durham, United States, 2015a. White Paper - Center for Coastal and Ocean Mapping. Disponível em:

<http://sandy.ccom.unh.edu/publications/library/Object_detection_with_PMBS.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2018.

_____. *Storm Response Surveying with Phase-Measuring Bathymetric Sidescan Sonar*. Durham, United States, 2015b. White Paper - Center for Coastal and Ocean Mapping.

Disponível em:

<http://sandy.ccom.unh.edu/publications/library/Response_surveying_with_PMBS.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2018.

JIN, G.; TANG, D. Uncertainties of differential phase estimation associated with interferometric sonars. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 21, n. 1, p. 53–63, 1996. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/485201/>>. Acesso em: 23 dez. 2017.

KONGSBERG MARITIME. *Geoswath plus remus 100*. 2015. 2p

_____. *GeoSwath Plus wide swath bathymetry system - Instruction Manual*, 2014a. 639p.

_____. *Introduction to Multibeam Theory*. 31 jan. 2014b. 132 slides. Material apresentado no curso de Operador de Ecobatímetro Multifeixe EM 2040.

L-3 COMMUNICATIONS SEABEAM INSTRUMENTS. *Multibeam Sonar Theory of Operation*. East Walpole, United States: L-3 Communications SeaBeam Instruments, 2000. 107p.

LURTON, X. Swath Bathymetry Using Phase Difference: Theoretical Analysis of Acoustical Measurement Precision. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 25, n. 3, p. 351–363, 2000. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/855385/>>. Acesso em: 23 jan. 2018.

MA, K.; XU, W.; XU, J. The Comparison between Traditional and Interferometric Multibeam Systems. In: 6th International Conference on Sensor Network and Computer Engineering (ICSNCE 2016). 6., 2016, Xi'an, China. *Proceedings...* . Atlantis Press, 2016. p. 261-264.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). *Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables*, 2017. 161p. Disponível em: <<http://www.nauticalcharts.noaa.gov/hsd/specs/specs.htm>>. Acesso em: 16 dez. 2017.

ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). *Manual de Hidrografia: Publicação C-13*. Trad. Instituto Hidrográfico. Lisboa, Portugal: Instituto Hidrográfico, 2005 (correções até 2010). 548p. Tradução de *Manual on Hydrography*. Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau.

PEREIRA, D. L. DA S. *Improving Shallow-Water Multibeam Target Detection at Low Grazing Angles*. Fredericton, 2015. 99 f. Dissertação (Master of Engineering) - Unit of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, 2015.

SAUCAN, A. A. et al. Model-Based Adaptive 3D Sonar Reconstruction in Reverberating Environments. *IEEE Transactions on Image Processing*, IEEE Signal Processing Society, 2015. v. 24, n. 10, p. 2928–2940, 2015.

SCHMIDT, V.; WEBER, T. C.; LURTON, X. Optimizing Resolution and Uncertainty in Bathymetric Sonar Systems. In: 1st Underwater Acoustics International Conference and Exhibition: Technologies and Results, 1., 2013, Corfu, Greece. *Proceedings...* . 2013. p. 1389-1396. Disponível em: < <http://scholars.unh.edu/ccom/848>>. Acesso em: 21 mai. 2018.

SIMMONS, S. M. et al. An evaluation of the use of a multibeam echo-sounder for observations of suspended sediment. *Applied Acoustics*, Great Britain: Elsevier Science Ltd, 2017. v. 126, p. 81–90, 2017.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). *EM 1110-2-1003* -

Engineering and Design Hydrographic Surveying. Washington, United States, 2013. 700p.

WILBY, A. D. The Advantages, Challenges and Practical Implementation of an Interferometric Swath Bathymetry System. In: OCEANS'99 MTS/IEEE, 1999, Seattle, United States: IEEE, 1999. *Proceedings...* . p. 23-29.

WOOCK, P.; FREY, C. Deep-sea AUV navigation using side-scan sonar images and SLAM. In: OCEANS'10 IEEE, 2010, Sidney, Australia: IEEE, 2010. *Proceedings...* . Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/5603528/>>. Acesso em: 16 mai. 2018.

APÊNDICE B – AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS BATIMÉTRICOS

1. METODOLOGIA

1.1 PLANEJAMENTO E ÁREA DOS TESTES

Em prol de uma avaliação da performance do PDBS em águas brasileiras, foi elaborada uma metodologia para avaliar determinadas capacidades do sensor interferométrico, tendo como base um levantamento com MBES realizado concomitantemente. Metodologias semelhantes foram aplicadas em outros testes (BRISSON; WOLFE; STALEY, 2014; GOSTNELL, 2005; GOSTNELL; YOOS; BRODET, 2007).

O objetivo deste levantamento é coletar dados batimétricos e de *backscatter* para avaliação do uso do sonar de varredura lateral interferométrico, principalmente em relação a seus dados batimétricos. Para tal, será utilizado *sidescan sonar* (SSS) interferométrico montado em uma embarcação por meio de uma haste e um ecobatímetro multifeixe já orgânico da lancha (OHI, 2005).

Como área de aquisição de dados, foram escolhidos 5 locais dentro da Baía de Guanabara (Figura 1). Estes têm características que propiciam a avaliação dos quesitos propostos, como ver-se-á a seguir. A escolha da Baía de Guanabara, como área de testes, tem cunho logístico e estratégico: logístico pelo fato da proximidade com a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e com a Universidade Federal Fluminense (UFF), o que possibilita percorrer pequenas distâncias para se chegar aos locais de teste, prover local para guarda da embarcação e dos equipamentos e a não necessidade do pernoite; estratégico pelo fato de que, após estes testes, poder-se-á ter uma área e metodologia para avaliação de equipamentos e procedimentos, bem como conclusões sobre os mesmos.

A Baía de Guanabara tem 384 km² de costa, com um canal central de aproximadamente 30 metros de profundidade. Seu fundo é constituído de areia na entrada, perto da comunicação com o Oceano Atlântico, refletindo os efeitos de onda e maré. Sua profundidade média é de 5,7 metros. O restante do fundo marinho, com exceção da entrada da baía, é majoritariamente lama, resultante de transgressão do Holoceno e da sedimentação fluvial (KJERFVE et al., 1997).

Primeiramente se pensou em fazer uma área teste na Baía de Guanabara, com alvos fabricados em tamanhos pré-definidos e colocados em locais com profundidades e tipo de fundo

já conhecidos, de forma a fornecer parâmetros para testar diversas funcionalidades e características de diferentes sensores. Entretanto, tais alvos podem gerar multicaminhamento do sinal¹ acústico, chegando a formar vários ecos de retorno. Uma alternativa à criação desses alvos era que eles fossem todos feitos de concreto, mas seu peso faria com que fosse inexecutável sua movimentação. Por fim, após sugestão e subsídios do Prof. John Huges Clarke² (CLARKE, 2017), foi decidido pela escolha de alvos e feições naturais, mesmo que estejam espalhados e não concentrados em um só local. Cada área foi escolhida de acordo com suas características, de modo a explicitar o parâmetro a ser avaliado.



Figura 1 – Baía de Guanabara e as áreas a serem realizados os testes (em retângulos vermelhos). A imagem é resultado de uma composição dos extratos das cartas náuticas n° 1511, 1512 e 1513.

¹ Multicaminhamento do sinal é um fenômeno no qual o feixe sonoro não percorre a trajetória direta transdutor – alvo/feição – transdutor. Nesse interregno, o sinal pode refletir em outras superfícies. Exemplo clássico de multicaminhamento são quando o sinal reflete na camada limite ente o meio líquido e o ar (superfície) (Denbigh, 1989), fazendo com que a trajetória do sinal fique maior e mudando significativamente o TWTT e a fase do sinal. No caso aqui citado, o multicaminhamento se daria devido à penetração do sinal na estrutura construída, fazendo com que sejam gerados ecos múltiplos.

² Acadêmico e professor da Universidade de *New Hampshire*. Notório estudioso de batimetria e sensores batimétricos.

1.2 TESTE DE DETECÇÃO DE ALVOS – ÁREA 1

Este teste visa verificar a capacidade de detecção e delineamento de feições batimétricas. Neste propósito, foi escolhida uma área de aproximadamente 750 m x 500 m, rica em pedras dos mais variados tamanhos e formas, em uma profundidade média de 13 metros (Figura 2).

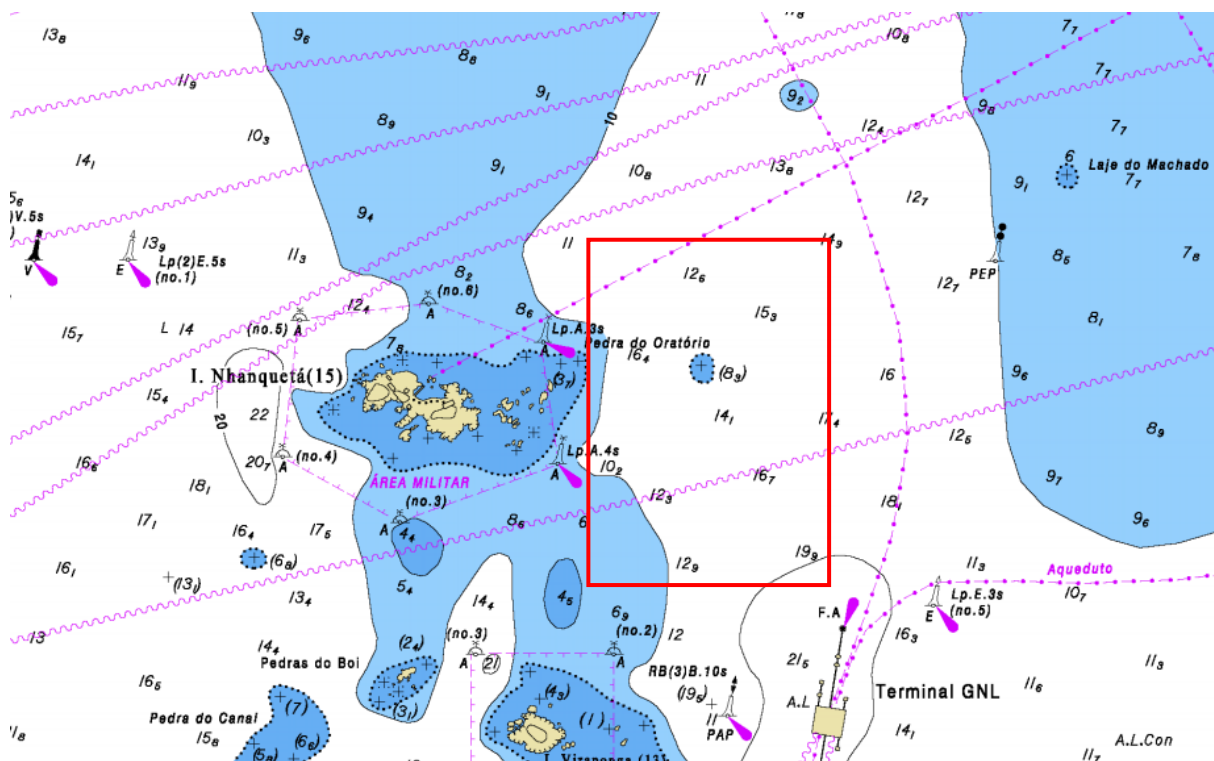


Figura 2 – Área 1. Apesar de parecer, na Carta Náutica, que a área possui apenas uma pedra, foi verificado em sondagens mais antigas que este local está repleto delas³.

1.2.1 Teste de inclinação – Área 2

Este teste tem como objetivo verificar a capacidade do PDBS de resolver inclinações desde as mais suaves até as mais abruptas. A área escolhida foi uma região de cerca de 550 m x 700 m nas proximidades da Ilha de Villegagnon – RJ (Figura 3).

³ Tal fato ocorre devido a uma generalização cartográfica, onde é evidenciado apenas a feição mais rasa e perigosa, já que as demais possuem feições mais reduzidas.

Neste local, pode-se observar profundidades que variam de 39 m à 1,5 m, o que produz uma inclinação bem pronunciada. Em outros locais, dentro da mesma área, a profundidade varia mais suavemente. Dessa forma, são abrangidos diversos gradientes de inclinação, fornecendo material para análise e cálculo de diferentes situações.

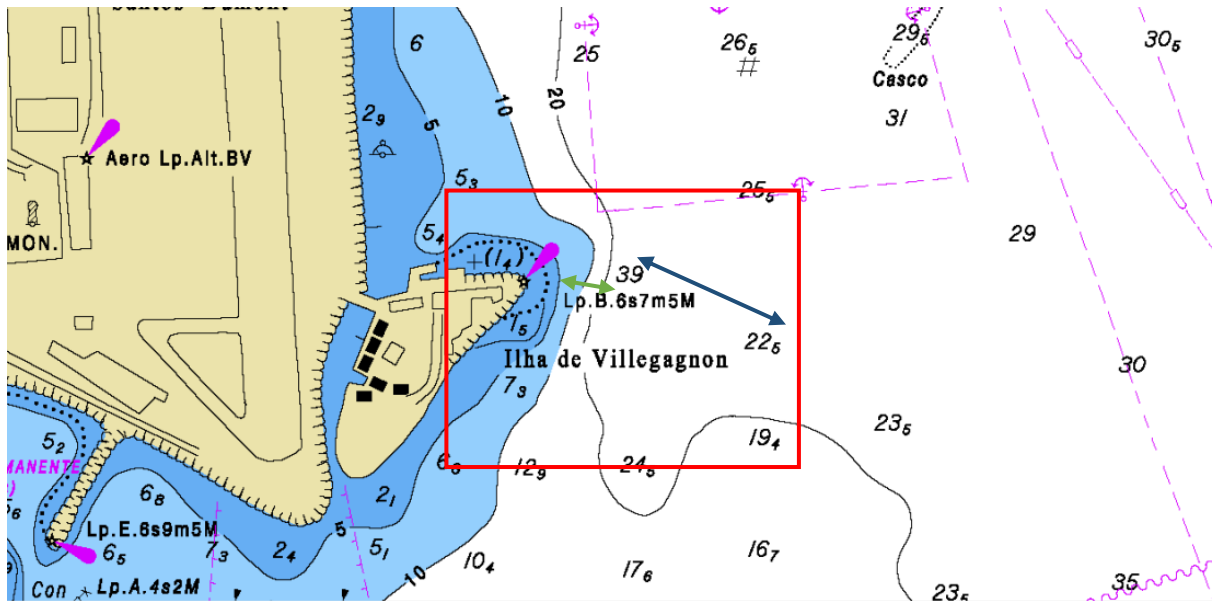


Figura 3 – Área 2. A seta em azul indica a direção no qual o gradiente é mais suave. A seta em verde indica local em que o gradiente é mais pronunciado.

1.2.2 Teste de detecção de objetos projetados para fora do mar – Área 3

Este teste visa verificar até que altura o PDBS consegue detectar um objeto que se pronuncie para fora da superfície do mar. A detecção de objetos com grande projeção vertical é um fator fundamental para a segurança da navegação. Assim, foram designados dois testes: no primeiro teste se verificará até qual distância, relativamente ao transdutor, o sensor consegue detectar um objeto vertical. Sabe-se que este objeto está vindo até a superfície, de modo que a detecção máxima seria o 0 m de profundidade. Tal parâmetro servirá de base para verificar como os sensores podem detectar objetos e até que altura. Para isso, foi escolhida uma área de aproximadamente 250 m x 400 m em uma profundidade média de 15 metros (Figura 4), englobando 5 pilares da Ponte Presidente Costa e Silva (popularmente conhecida como Ponte Rio-Niterói).

O segundo teste será mais explicado no próximo item.

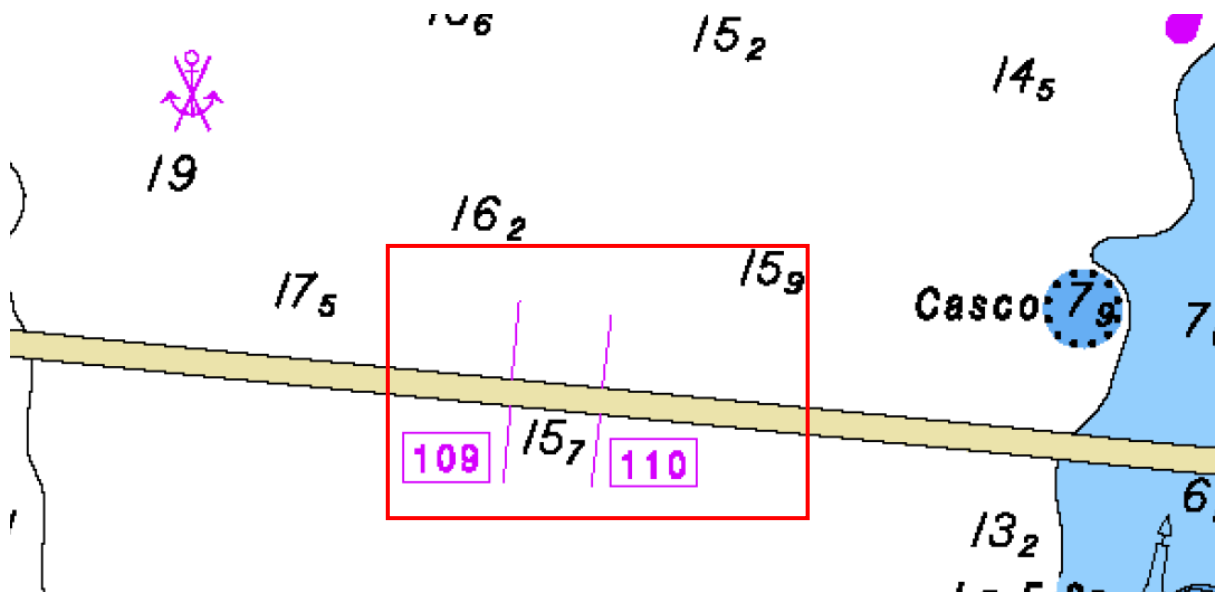


Figura 4 – Área 3.

1.2.3 Teste de detecção objetos naufragados – Área 4

Os objetos naufragados são grandes perigos ao navegante. Para contornar esta dificuldade, o objeto deve estar mapeado e discriminado na carta náutica. A profundidade que será a representativa do todo, será a menor encontrada na feição. Esta costuma ser resultante de feições verticais do objeto naufragado, como mastros.

Nesse contexto, este teste, de forma análoga ao anterior, busca a detecção das menores profundidades de um objeto naufragado com feição vertical pronunciada, mas que não chegue ao lume d'água. Do mesmo modo do Teste 1, o material de comparação será os dados provenientes do ecobatímetro multifeixe.

Para este teste, foi escolhida uma área de cerca de 600 m x 550 m, nas proximidades da Ilha Fiscal – RJ, com uma profundidade média de 30 metros, englobando um casco soçobrado⁴ submerso (DHN, 2014) que tem como menor profundidade 20,8 metros (Figura 5).

⁴ Casco soçobrado é o restante de um navio naufragado.

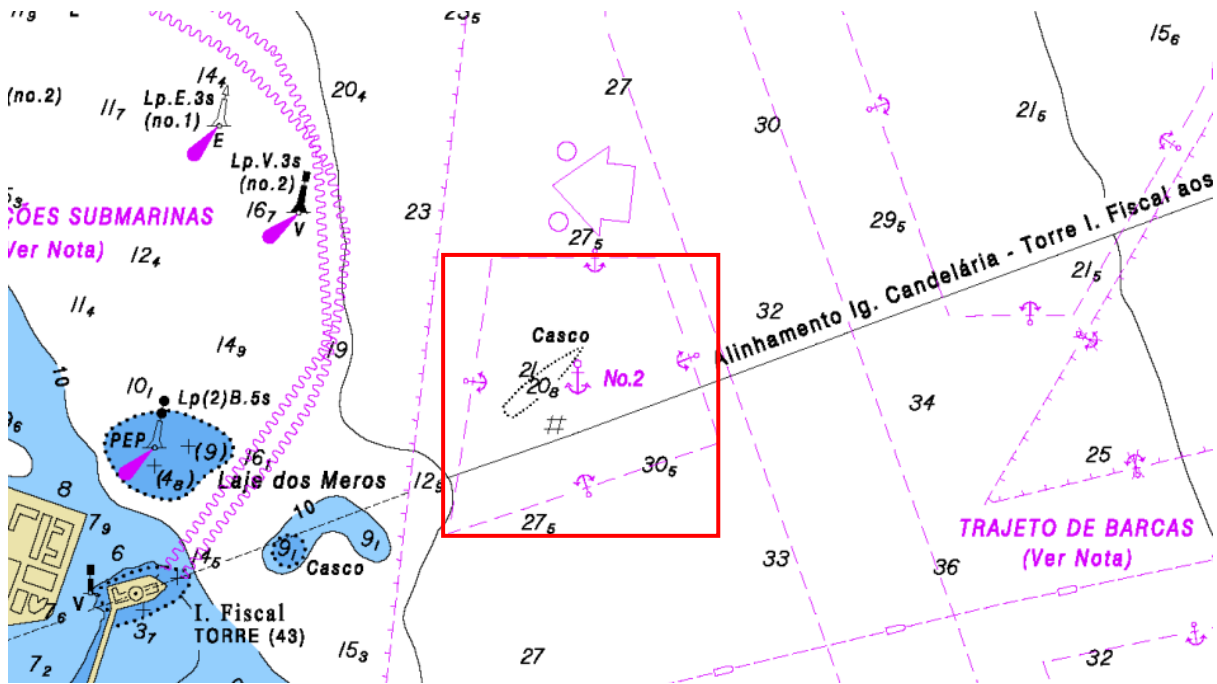


Figura 5 – Área 4.

1.2.4 Teste de eficiência – Área 5

Este teste objetiva a verificação da eficiência do PDBS comparativamente ao MBES. Será realizada uma sondagem respeitando os parâmetros de sondagem (principalmente espaçamento entre linhas) do interferométrico. Sabe-se pela literatura, que o PDBS tem uma varredura máxima de aproximadamente 10-12 vezes a profundidade, enquanto que o MBES tem de 5-6 vezes a profundidade (JERRAM; SCHMIDT, 2015b). Assim, o que se deseja testar é a varredura útil e a eficiência do PDBS.

Para esta verificação, foi escolhida uma área plana de aproximadamente 1.750 m x 800 m, com profundidades variando de 15 a 3 metros, nas cercanias da Ponta da Areia, em Niterói – RJ (Figura 6).

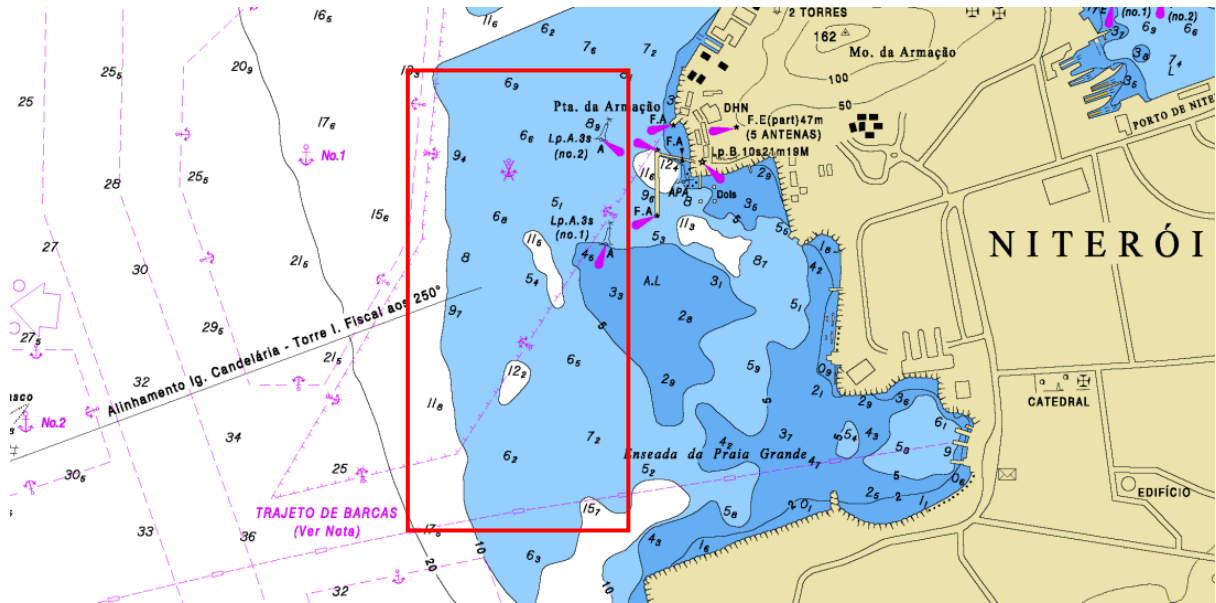


Figura 6 – Área 5.

1.3 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Tendo sido escolhidos os testes e as áreas, utilizou-se a Lancha CEHILI (Figura 7), embarcação orgânica do Navio de Pesquisas Hidroceanográfico (NPqHo) Vital de Oliveira.

A montagem e calibração dos sensores (*patch test*) foram realizadas nos dias 31 de julho e 01 de agosto de 2017. A sondagem das áreas testes foi feita nos dias 02 e 03 de agosto do mesmo ano.



Figura 7 – Lancha CEHILI sendo retirada do NPqHo Vital de Oliveira para ser posta na água.

1.3.1 Sonares e periféricos

A lancha CEHILI já tem um multifeixe instalado no casco da embarcação, havendo apenas a necessidade de se instalar o PDBS em uma haste (Figura 8) para poder acoplá-lo à lancha (Figura 9).

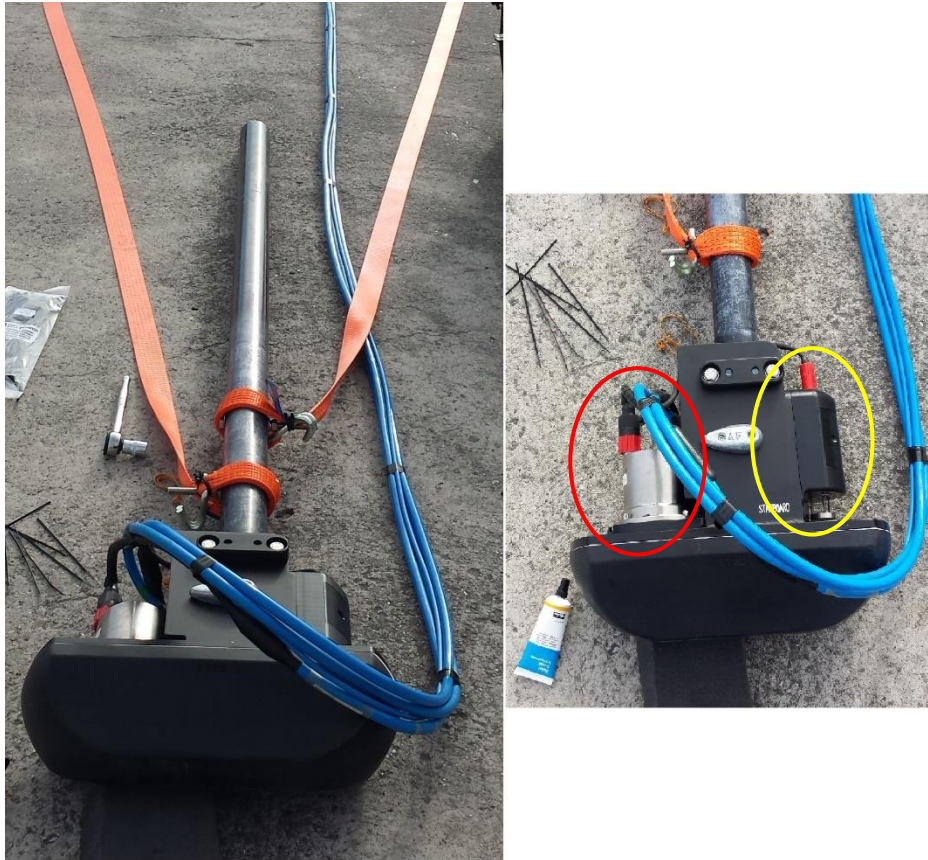


Figura 8 – Sonar de varredura lateral Geoacustics Geoswath 4R instalado em haste. À direita, no círculo vermelho tem-se o sensor de movimento e no amarelo o sensor de velocidade do som na face do transdutor.



Figura 9 – Lancha CEHLI com a haste instalada.

Para a realização dos testes comparativos foram escolhidos os seguintes equipamentos e softwares:

Ecobatímetro multifeixe *Kongsberg EM2040* nas respectivas configurações:

- Frequência central: 400 KHz;
- Ângulo de abertura: 120° (60° para cada bordo). No teste 3 foi mudado para 75° o bordo que faceou os pilares da ponte;
- Máxima varredura: 600 metros (300 metros para cada bordo);
- Espaçamento dos feixes: *High Definition Equidistant* (HD EQDST);
- Profundidade mínima: 1 metro;
- Profundidade máxima: 30 metros. No teste 2 foi mudado para 50 metros, devido às profundidades locais;
- Estabilização em *pitch*;
- Estabilização em *yaw*;
- Frequência de transmissão máxima: 50 Hz;
- Equipamento periféricos:
 - Sensor de movimento: *Seapath 300 equipado com MRU5*;
 - Posicionador: *Seapath 300*;
 - Sinal diferencial de posição: *DGNSS 3710 Fulgro* (1 m);
 - Sensor de velocidade do som na face do transdutor: *AML Micro X*; e
 - Software de navegação e aquisição: *SIS*, versão 4.3.2.

Sonar de varredura lateral *Geoacustics Geoswath 4R* nas respectivas configurações:

- Frequência central: 250 KHz;
- Não foi ajustada nenhuma outra configuração. A doutrina de aquisição de dados passada pelo Sr. James Baxter, operador da empresa *Geoacustics*, consistia em que os dados fossem adquiridos sem nenhum ajuste e fossem tratados em etapa posterior, no processamento;
- Equipamentos periféricos:
 - Sensor de movimento: *Aplanix POS MV WAVE MASTER 2*;
 - Posicionador: *Aplanix POS MV WAVE MASTER 2*;
 - Sinal diferencial de posição: *RTK Marinestar Fulgro* (10 cm);

- Sensor de velocidade do som na face do transdutor: *Valeport Mini SVS 25 mm*;
- Software de aquisição: *Geoswath Plus*, versão 1.0.21.14560; e
- Software de navegação: *Hypack 2017*.

1.3.2 Perfil de velocidade do som

A informação de perfil de velocidade do som foi adquirida pelo sensor *AML Minos X*, sendo realizada a estratificação de camadas com resolução de 10 cm. O processamento dos arquivos foi realizado no software SIS versão 4.3.2 e as informações foram inseridas nos dados durante a aquisição, no caso do MBES, e no processamento, no caso do PDBS. Foram realizadas, no total, 11 lançamentos, conforme Figura 10.

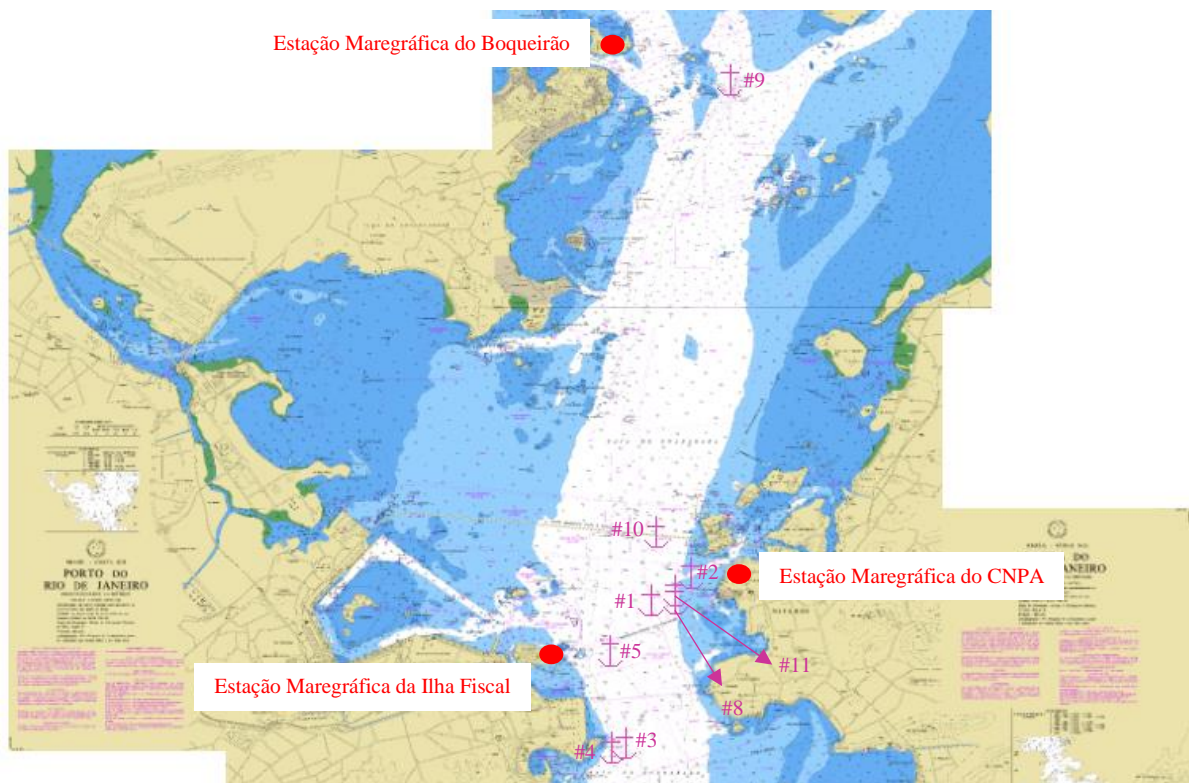


Figura 10 – Pontos nos quais foram adquiridos os perfis de velocidade do som (representados por âncoras magentas) e Estações Maregráficas utilizadas (círculos vermelhos).

1.3.3 Maré

As informações de maré para a redução da sondagem foram coletadas por meio de 3 estações diferentes, devido às distâncias das áreas de sondagem. A Estação Maregráfica do Boqueirão (F41 – Padrão – ILHA DO BOQUEIRÃO I – 50127 – Versão 1/2017)⁵ foi utilizada

⁵ A F41 é uma ficha descritiva da estação maregráfica, contendo todos os seus dados. Pode ser consultada no sítio da internet do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

para a área 1; a Estação Maregráfica do CNPA (F41 – Padrão – PONTA DA ARMAÇÃO – 50141 – Versão 1/2010) foi utilizada nas áreas 3 e 5; e a Estação Maregráfica da Ilha Fiscal (F41 – Padrão – ILHA FISCAL – 50140 – Versão 1/2010) nas áreas 2 e 4 (Figura 10).

Para processamento dos dados maregráficos foi utilizado o software *Microsoft Excel 2016* e as informações foram inseridas nos dados durante o processamento.

1.3.4 Condições de tempo

Durante toda a sondagem o tempo estava bom, vento fraco, oscilando entre nulo e brisa leve. O mar estava calmo, variando de aspecto espelhado à pequenas ondulações, quase imperceptíveis com a lancha. Dir-se-ia que o tempo oscilou entre 0 e 3 na escala *Beaufort*.

1.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Após a coleta dos dados, os oriundos do MBES foram processados diferentemente dos oriundos do PDBS. Segue a sequência de processamento adotada em ambos.

Ecobatímetro multifeixe *EM2040*:

1. Os arquivos de sondagem (.all) foram importados para o software *CARIS HIPS&SIPS* versão 10.2, respeitando a projeção Geográfica (Mercator) e usando como *datum* o WGS84.
2. Foi criado um arquivo de embarcação (Cehili.hvf) que continha as configurações da lancha e as incertezas dos sensores.
3. Verificadas as informações de posição e atitude.
4. Carregados os dados maregráficos.
5. Realizado o *Merge*.
6. Calculada a incerteza total propagada (*Total Propagated Uncertainty – TPU*), considerando a incerteza da medição da maré em 1 cm, a incerteza do perfil da velocidade do som em 0,5 m/s, a incerteza da velocidade do som na face do transdutor em 0,2 m/s e todas as outras fontes de incerteza provenientes do arquivo de embarcação (Cehili.hvf). Tal procedimento e valores de incertezas são sugeridos pela empresa *CARIS* (CARIS, 2014).
7. Criada uma superfície CUBE, resolução 0,5 m, e método de desigualdade densidade e localização (*Density & Locale*).

8. Aplicado um filtro de superfície CUBE com valor limite da incerteza (*Threshold Type Type Uncertainty*) no valor de 2x (95,44% de certeza) e rejeitando profundidades que não estão na superfície.
9. Foi usada a ferramenta *Subset Editor* para limpeza manual dos dados. O *slice* foi de 5 m, ficando menor em áreas de grandes gradientes ou feições e utilizado zoom de 20 a 50 cm. Nessa etapa, foram retirados vários dados considerados espúrios como também foram habilitados outros tantos.

Sonar de varredura lateral interferométrico *Geoswath 4R*:

1. O processamento desses dados foi realizado em duas etapas diferentes, cada uma em um software. A primeira etapa, eminentemente estatística⁶, foi realizada no software *Geoswath Plus*, versão 1.0.21.14560, onde foram verificadas as informações de navegação e atitude.
2. Ao contrário do processamento multifeixe, os dados de perfis de velocidade do som foram inseridos no processamento, embora tenham sido os mesmos dados.
3. Inserido maré.
4. Realizado processamento de dados aplicando filtros de Amplitude, Limites, *Acrosstrack* e *Alongtrack* em configurações diferentes de acordo com as peculiaridades de cada área (KONGSBERG MARITIME, 2014).
5. O *Feature Filter* só foi aplicado na Área 3, devido aos pilares da ponte.
6. Após isso, os dados foram exportados em GSF para serem inseridos no *CARIS HIPS&SIPS*, com os mesmos parâmetros usados no processamento do MBES.
7. Foi criado um novo arquivo de embarcação (*cehili_Geoswath1.vsf*), praticamente vazio, contendo apenas valores de TPU de acordo com os *offsets* e incertezas de cada equipamento retirados no site da CARIS (GENTILHOMME, 2016; SCHMIDT; JERRAM, 2015).
8. Realizado o *Merge*.
9. Realizado o TPU usando os mesmos parâmetros do MBES.
10. Os dados foram passados para o CARIS de forma a terem a mesma técnica e resolução de grade. Então, de forma análoga, foi criada uma superfície CUBE

⁶ Devido aos dados batimétricos provenientes do sonar de varredura lateral interferométrico serem extremamente ruidosos, fica impossível uma limpeza manual sem a passagem de filtros estatísticos e de limites antes. O procedimento ensinado pela *Kongsberg* em seus cursos e adestramentos de *Geoswath* é uma abordagem puramente focada em filtros, não havendo uma limpeza manual. Esse procedimento foi mantido no trabalho. O software CARIS foi usado apenas para criação das superfícies, de modo a comparar superfícies de mesma resolução, criadas com o mesmo interpolador e mesmo algoritmo.

através da mesma metodologia citada no item anterior. Não foi realizado nenhum tipo de processamento nesse software (*Subset Editor* ou Filtros de Superfície).

1.5 CONTROLE DE QUALIDADE

Faz-se necessário ter um controle de qualidade para saber se o dado adquirido tem sua incerteza dentro do preconizado para as ordens parametrizadas pela OHI. Para isso, faz-se mister o entendimento de alguns conceitos (OHI, 2008):

- Acurácia – extensão que uma grandeza medida está dentro do valor presumido ou tido como correto.
- Precisão – quanto o valor desvia do valor tido como presumido ou correto.
- Erro – diferença entre um valor computado ou observado de uma grandeza e seu valor real. Como não se pode saber o valor real de uma grandeza, o erro também não pode ser calculado com precisão, apenas estimado. Nesse estudo não será usado o vocábulo erro e sim incerteza para valorar a estimativa do erro.
- Incerteza – intervalo sobre um valor que conterá o valor real de uma determinada grandeza, medida dentro de um nível de confiança e de uma distribuição específica. Aqui, incerteza e intervalo de confiança são equivalentes.
- Nível de confiança – “... probabilidade em que o valor real de uma medida será situado dentro da incerteza especificada do valor medido.” (OHI, 2008) Neste estudo será considerado o nível de confiança de 95% e a distribuição será a Normal⁷. Nesses termos, o nível de confiança será $1,96\sigma$ (1,96 vezes o desvio padrão). Isso quer dizer que o valor real de uma grandeza estará dentro do intervalo $[-1,96\sigma; 1,96\sigma]$ dela mesma.

Assim, uma mensuração de determinada grandeza pode ter dois indicadores: precisão e acurácia. A precisão está relacionada com a dispersão dos dados e pode ser indicada através da incerteza da medida. A acurácia é o quanto esta medida está próxima do valor considerado real. Este trabalho vai realizar uma avaliação de precisão e acurácia de todas as superfícies (com exceção da área 5) que foram adquiridas pelo MBES (não será medida a acurácia do MBES, haja vista que ela está sendo considerada como o valor padrão) e pelo PDBS.

⁷ Em sondagem, se tratam os dados provenientes dos sonares como tendo distribuição Normal.

1.5.1 Precisão

A precisão será medida através de duas formas: a primeira será através da Incerteza Propagada Total (IPT) da hipótese do nó e a segunda por meio da incerteza amostral do nó.

A IPT da hipótese é a combinação da Incerteza Horizontal Total (IHT) e da Incerteza Vertical Total (IVT), sendo ambas calculadas por meio da Lei de Propagação de Incertezas (PEREIRA, 2016). A IPT combina a incerteza de várias fontes com outras que foram calculadas ou derivadas (PEREIRA, 2016). Dessa forma, a IPT é calculada no CARIS por meio da função “*Compute TPU* (do inglês *Total Propagated Uncertainty*)”, onde as incertezas estáticas são informadas por ocasião da construção do arquivo de embarcação (incertezas nominais dos equipamentos do posicionamento, sensores de movimento e medições de *offsets*) e os valores de incerteza da maré e do perfil de velocidade do som são informados na hora de computar o TPU (CARIS, 2017).

A OHI preconiza as máximas IHT e IVT para cada ordem de levantamento, de modo que todas as medições de profundidade, para estarem dentro de uma determinada ordem, devem ter tanto a IHT quanto a IVT dentro desta tolerância. Nesse ponto, a superfície CUBE é muito útil, pois a partir do momento que lhe é informada qual ordem ela deve atender, serão consideradas apenas, por ocasião de sua produção, as profundidades que atendam a esse requisito (CARIS, 2017). De forma análoga, a incerteza da hipótese também é calculada (CARIS, 2014) de modo que cada uma terá uma IPT associada. Assim, uma forma de controle de qualidade é assegurar que a incerteza vertical da hipótese não ultrapasse o preconizado pelo OHI. Tal procedimento pode ser realizado através das seguintes equações (para Ordem Especial (Eq. 1) e 1a (Eq. 2) respectivamente):

$$\begin{aligned} & \text{Resíduo da incerteza vertical da hipótese} \\ & = \text{Incerteza da hipótese} - \sqrt[2]{0,25^2 + (0,0075 \times \text{profundidade})^2} \leq 0 \quad (\text{Eq. 1}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Resíduo da incerteza vertical da hipótese} \\ & = \text{Incerteza da hipótese} - \sqrt[2]{0,5^2 + (0,013 \times \text{profundidade})^2} \leq 0 \quad (\text{Eq. 2}) \end{aligned}$$

Caso os valores resultantes das equações sejam negativos, significa que a IVT do nó está dentro do preconizado para determinada ordem. O ideal é que todos os nós tenham incerteza dentro da tolerância da ordem requerida.

A segunda forma de avaliação da precisão é por meio da incerteza amostral do nó. Esta é representada pelo desvio padrão de todas as informações de profundidade que estão contidas dentro de um nó (PEREIRA, 2016), ou seja, é a dispersão dos dados. É importante que a dispersão esteja dentro do intervalo preconizado para a ordem escolhida. Assim, será considerado como nível de confiança $1,96\sigma$ (95%), considerando distribuição normal. Na prática, seriam os valores das camadas *Node Standard Deviation*. Dessa forma, para um nó ser considerado como sendo de Ordem Especial (Eq. 5) ou 1a (Eq. 6), deve satisfazer as seguintes equações:

$$\text{Resíduo da incerteza amostral} = 1,96 \times \sigma - \sqrt[2]{0,25^2 + (0,0075 \times \text{profundidade})^2} \leq 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\text{Resíduo da incerteza amostral} = 1,96 \times \sigma - \sqrt[2]{0,5^2 + (0,013 \times \text{profundidade})^2} \leq 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

Dessa forma, pode-se observar a diferença entre as duas formas em que a incerteza será analisada e como ambas diferem entre si. Enquanto uma leva em consideração as incertezas que deram origem às informações de profundidade, a outra se baseia na coerência do resultado.

Na construção de uma superfície de grade regular, a resolução é um tópico importante a ser discutido. A resolução mais grosseira adotada pelo CHM para o controle de qualidade é 0,5 metros. Isso se deve ao critério de *Nyquist*, no qual para uma feição ser observada, deve pelo menos ter duas amostras que a perceberam (ALLABY, 2008). Assim, para a detecção de uma feição de 1 metro (ordem especial), é recomendável que a amostragem de profundidade seja feita de 0,5 em 0,5 metro.

1.5.2 Acurácia

A acurácia será avaliada de três formas: observando a dispersão dos dados MBES com relação à superfície do PDBS, por meio do cálculo de superfícies diferença das informações representativas de profundidades e cálculo das superfícies diferença das informações mais rasas de profundidade⁸.

⁸ Essa informação é vital para a atualização de documentos náuticos, visto que sempre constam neles as profundidades mais rasas encontradas.

A dispersão dos dados multifeixe frente a superfície gerada pelo interferométrico é feita por meio da ferramenta “*QC Report*”⁹ do *software CARIS HIPS&SIPS*. Nela, o programa verifica as estatísticas de algumas linhas consideradas como padrão (linhas multifeixe) com relação a uma superfície que será avaliada (superfície do interferométrico). Assim, são calculadas virtualmente duas superfícies paralelas à superfície de referência, distanciadas a valor máximo permitido pela OHI. Depois é verificada a porcentagem dos *pings* de cada linha que está dentro deste intervalo. Quando esta porcentagem é maior ou igual a 95%, a superfície pode ser considerada da ordem que foi avaliada (PEREIRA, 2016).

A superfície diferença é calculada a partir da subtração da camada *Depth* da superfície formada pelas linhas MBES da superfície *Depth* formada pelas linhas PDBS ($Depth_{MBES} - Depth_{PDBS}$). Tal procedimento gera uma superfície que contém a diferença dos valores alcançados por cada uma. Com ela, não será computada nenhuma estatística, uma vez que tal campo será explorado pelo procedimento anterior, contudo fornecerá uma análise qualitativa de comparação.

O cálculo de diferença das informações mais rasas é muito útil para os serviços hidrográficos. Para resguardar a segurança da navegação, a camada da superfície que é utilizada para a criação da carta náutica é a camada *Shoal*, que contém as informações de profundidade mais rasas encontradas em cada nó. Apesar de não ser o mais exato quando se trata da detecção do fundo marinho, se garante que não haverá obstáculos mais rasos do que os reportados durante o processamento dos dados. Assim, uma avaliação de tal camada não só verifica a detecção e dispersão dos dados, mas também o seu potencial uso pela DHN.

⁹ Os parâmetros do *QC Report* foram: *reference surface – Depth, selectic stactics – S44, available – Special Order e Order 1a, selecting group method – by angle, define ranges – minimum: -60, maximum: 60, in steps of: 1*. Isso significa que a camada que serviu de comparação foi a *Depth*, as estatísticas utilizadas foram as preconizadas pelas ordens Especial e 1a da S-44, que os feixes foram avaliados por ângulos, de 60 graus de um bordo até 60 graus do outro, sendo a análise feita a cada grau.

2. BIBLIOGRAFIA

ALLABY, Michael. *Dictionary of Earth Sciences*. 3 ed. New York, USA: Oxford University Press, 2008. 654p, p. 15-301.

BRISSON, L. N.; WOLFE, D.; STALEY, M. P. S. M. Interferometric swath bathymetry for large scale shallow water hydrographic surveys. In: 2014 Canadian Hydrographic Conference (CHC-2014), 1., 2014, St. John's N&L, Canada. *Proceedings...* . 2014. pp. 1-18.

CALDER, B. R.; MAYER, L. A. Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems: G3*, Washington, USA: American Geophysical Union & Geochemical Society, v. 4, n. 6, 2003. pp. 1-22, jun. 2003.

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

_____. *Caris Training Module Multibeam Data Processing With CUBE*, 2014. 220p.

CLARKE, J. E. H. *USHC in Gavelston*. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <rodrigo.carvalho@mar.mil.br> em 09 mai. 2017.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). *Carta 12000: símbolos, abreviaturas e termos usados nas cartas náuticas*. 4. ed. Niterói - RJ: Ed. DHN, 2014. 107p. Textos em português e inglês.

GENTILHOMME, M. *GeoSwath Plus - Importing GeoSwath Data in CARIS HIPS, the GSF Route 9-GS00-6322/A*. Norfolk - United Kingdom: KONGSBERG GEOACOUSTICS LTD, 2016. 21p.

GOSTNELL, C. Efficacy of an interferometric sonar for hydrographic surveying: Do interferometers warrant an in-depth examination? - A Preliminary Study. In: US Hydrographic Conference 2005, 1., 2005, San Diego, United States. *Proceedings...* . 2005.

GOSTNELL, C.; YOOS, J.; BRODET, S. NOAA test and evaluation of interferometric sonar technology. In: 2006 Canadian Hydrographic Conference (CHC-2006), 1., 2006, Halifax, Canada. *Proceedings...* . 2006.

JERRAM, K.; SCHMIDT, V. *Object Detection with Phase-Measuring Bathymetric Sidescan Sonar Depth Data*. Durham, United States, 2015a. White Paper - Center for Coastal and Ocean Mapping. Disponível em:

<http://sandy.ccom.unh.edu/publications/library/Object_detection_with_PMBS.pdf>. Acesso

em: 04 jan. 2018.

_____. *Storm Response Surveying with Phase- Measuring Bathymetric Sidescan Sonar*. Durham, United States, 2015b. White Paper - Center for Coastal and Ocean Mapping.

Disponível em:

<http://sandy.ccom.unh.edu/publications/library/Response_surveying_with_PMBS.pdf>.

Acesso em: 04 jan. 2018.

KJERFVE, B. et al. Oceanographic Characteristics of an Impacted Coastal Bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. *Continental Shelf Research*, Great Britain: Elsevier Science Ltd, v. 17, n. 13, p. 1609–1643, 1997.

KONGSBERG MARITIME. *GeoSwath Plus wide swath bathymetry system - Instruction Manual*, 2014. 639p.

ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). *Especificação da OHI para Levantamentos Hidrográficos*: Publicação Especial N° 44 (S-44). Trad. Peter Esteves. Niterói - RJ: DHN, 2008. 32p. Tradução de *IHO Standards for Hydrographic Surveys: Special Publication N° 44 (S-44)*. Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau. 2008. 28p.

_____. *Manual de Hidrografia*: Publicação C-13. Trad. Instituto Hidrográfico. Lisboa, Portugal: Instituto Hidrográfico, 2005 (correções até 2010). 548p. Tradução de *Manual on Hydrography*. Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau.

PEREIRA, D. L. DA S. Incertezas e Controle de Qualidade na Medição de Profundidades por Meio de Ecobatímetros Multifeixe. *Anais Hidrográficos*, Niterói: DHN, v. 73. p. 53-65, 2016.

SCHMIDT, V.; JERRAM, K. *GeoAcoustics GeoSwath Plus Data Processing with CARIS HIPS 8.1 in support of Sandy Supplemental Research*. Durham, United States, 2015. Best Practices - Center for Coastal and Ocean Mapping. Disponível em:

<http://sandy.ccom.unh.edu/publications/library/Caris_81_GeoSwath_guide.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2018.