

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

HUGO LEONARDO SILVA SOARES

**AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS SONARES INTERFEROMÉTRICOS  
EDGETECH 6205S2 E PING DSP 3DSS PARA GERAÇÃO DE PRODUTOS  
BATIMÉTRICOS**

NITERÓI

2023

HUGO LEONARDO SILVA SOARES

**Avaliação Qualitativa dos Sonares Interferométricos EdgeTech 6205S2 e Ping DSP  
3DSS para Geração de Produtos Batimétricos**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para obtenção do título de Mestre na área de Geologia e Geofísica, com ênfase em Hidrografia.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Tavares de Macedo  
Dias

NITERÓI

2023

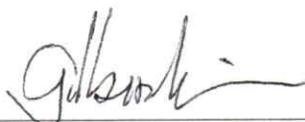
HUGO LEONARDO SILVA SOARES

**AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS SONARES INTERFEROMÉTRICOS  
EDGETECH 6205S2 E PING DSP 3DSS PARA GERAÇÃO DE PRODUTOS  
BATIMÉTRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Geologia e Geofísica com ênfase em Hidrografia.

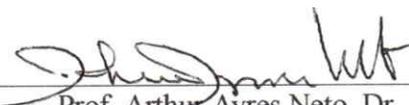
Aprovada em 07 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Gilberto Tavares de Macedo Dias, Dr (Orientador)  
Universidade Federal Fluminense



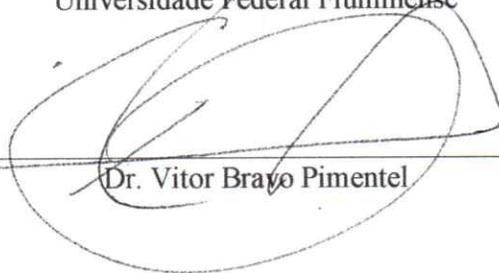
---

Prof. Arthur Ayres Neto, Dr.  
Universidade Federal Fluminense



---

Prof. Cleverson Guizan Silva, Dr.  
Universidade Federal Fluminense



---

Dr. Vitor Bravo Pimentel

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

S676a Soares, Hugo Leonardo Silva  
Avaliação Qualitativa dos Sonares Interferométricos  
EdgeTech 6205S2 e Ping DSP 3DSS para Geração de Produtos  
Batimétricos / Hugo Leonardo Silva Soares. - 2023.  
144 f.: il.

Orientador: Gilberto Tavares de Macedo Dias.  
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Instituto de Geociências, Niterói, 2023.

1. Hidrografia. 2. Interferometria. 3. Batimetria. 4. Sonar  
de varredura lateral. 5. Produção intelectual. I. Dias,  
Gilberto Tavares de Macedo, orientador. II. Universidade  
Federal Fluminense. Instituto de Geociências. III. Título.

CDD - XXX

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço ao meu orientador Professor Doutor Gilberto Tavares de Macedo Dias pela paciência e disponibilidade, primordiais para que este trabalho pudesse ser concluído.

Agradeço à instituição Marinha do Brasil, mais precisamente à Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), por ter me disponibilizado tempo e recursos necessários para a condução do curso, ora finalizado.

Não poderia deixar de agradecer, meu elemento de ligação e mentor, Capitão de Corveta Ivan Bodra Guimarães, que me auxiliou desde o início nesta jornada acadêmica e esteve presente nos momentos de mais aflição.

Agradeço, igualmente, às pessoas que possibilitaram a realização do estudo, cedendo-me dados, de forma amistosa. Ao senhor Patrick Nissen, da empresa EdgeTech, ao senhor Paul Kraeutner, da empresa Ping DSP e meu respectivo facilitador de acesso à este último, ao senhor Cesar Pimenta, muito obrigado pela confiança em mim depositada para análise de seus dados.

Por último e fundamental, não só para a conclusão desta etapa mas como um todo, minha esposa Marcella Braga, que entendeu e me incentivou nos momentos de dúvida, alertou nos momentos de procrastinação e continuou forte, sempre ao meu lado. Obrigado por tanto.

## RESUMO

Para uma navegação segura, é primordial que seja conhecida a profundidade na qual a embarcação navega. Estas profundidades são medidas e cartografadas pelos serviços hidrográficos dos diversos países que possuem águas navegáveis. Para que esta atividade ocorra de forma padronizada e sistemática, foi criada a OHI, Organização responsável por instruir e garantir a correta realização da hidrografia. Ela é responsável pela publicação S-44, a qual rege e dita normas a serem seguidas para a execução de levantamentos hidrográficos. Com esta finalidade, alguns equipamentos podem ser utilizados, principalmente ecobatímetros e sonares, utilizando tecnologias próprias e notadamente reconhecidas pela comunidade hidrográfica. A mais popular, e utilizada em larga escala, é a tecnologia de formação de feixes presente nos ecobatímetros multifeixe. Outra possibilidade é a utilização da interferometria, que faz uso da diferença de fase do sinal para a estimação das profundidades. Entretanto, esta ainda não é amplamente utilizada pelos serviços hidrográficos espalhados pelo mundo, inclusive o Brasil. Neste trabalho foram descritos os princípios de funcionamento de tais equipamentos, para que se pudesse entender todo o potencial dos dados posteriormente estudados. Contudo, o objetivo final da obra consistiu em analisar tais dados, tanto batimétricos, quanto de imageamento do fundo, de dois equipamentos disponíveis no mercado: o EdgeTech 6205s2 e o Ping DSP 3DSS, ambos denominados sonares interferométricos. Foram analisados os dados qualitativa e quantitativamente, a fim de verificar a possibilidade de utilização desses para produção/atualização de cartas náuticas padronizadas. Nesse intuito, foram utilizados os programas Caris Hips e SonarWiz, para o processamento dos dados batimétricos e de imageamento, respectivamente, cumprindo-se todo o fluxo exigido para uma correta análise. Após esta análise minuciosa dos resultados, ambos chegaram ao nível esperado de acordo com as Ordens da S-44 alcançadas, todas as áreas sondadas atingiram no mínimo a ordem especial e, uma especificamente, ordem exclusiva. O resultado foi comparado às imagens e alguns pontos notáveis puderam ser identificados concomitantemente.

**Palavras-chave:** Sonar interferométrico; hidrografia; batimetria; imageamento.

## ABSTRACT

Looking for a safe navigation, it is essential to know the depth at which the vessel navigates. These depths are measured and mapped by hydrographic services in several countries whose have navigable waters. In order to facilitate this activity in a standardized and systematic way, the IHO was created, an Organization responsible for instructing and guaranteeing the correct performance of hydrography. It is responsible for publication S-44, which governs and dictates standards to be followed for the execution of hydrographic surveys. For this purpose, some equipment can be used, mainly echo sounders and sonar, using proprietary technologies that are notably recognized by the hydrographic community. The most popular, and used on a large scale, is the beamforming technology present in multibeam echo sounders. Another possibility is the use of interferometry, which uses the signal phase difference to estimate depths. Although, this technique is not widely used yet by hydrographic services incorporated around the world, including Brazil. In this dissertation, the operating principles of such equipment were described, so that the full potential of the data studied later could be understood. However, the final objective of this dissertation was to analyze such data, both bathymetric and bottom imaging, from two equipments available on the market: the EdgeTech 6205s2 and the Ping DSP 3DSS, both known as interferometric sonars. These data were analyzed in qualitative and quantitative ways to verify the possibility of using them for production/updating nautical charts. In this sense, the programs Caris Hips and SonarWiz were used to process the bathymetric data and imaging, respectively, fulfilling all the flow required for a correct analysis. After this meticulous analysis of the results, both reached the expected level according to the S-44 orders achieved, all examined areas reached at least special order and, one specifically, exclusive order. The result was compared to the images and some notable points could be identified concomitantly.

**Keywords:** Interferometric sonar; hydrography; bathymetry; imaging.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Leque. ....	22
Figura 2 - Exemplos de USV (a) e AUV (b). ....	26
Figura 3 - Direções das incertezas envolvidas nos LH. ....	31
Figura 4 - Gráfico com a incerteza unidimensional (1D) para um intervalo de confiança de 95% = $1,96 \times \sigma$ . ....	33
Figura 5 - Gráfico com a incerteza bidimensional (2D) para um intervalo de confiança de 95% = $2,45 \times \sigma$ . ....	33
<b>Figura 6</b> - Comparação entre Precisão x Acurácia. ....	35
Figura 7 - Esquema de transmissão do SSS; (a) vista plana e (b) seção vertical. ....	37
Figura 8 - Esquema: sinal emitido x intensidade de retorno do SSS. ....	38
Figura 9 - Nadir representado em preto nas imagens de SSS. ....	39
Figura 10 - Comportamento do <i>backscatter</i> . ....	41
Figura 11 - Relação entre intensidade do <i>backscatter</i> e intensidade do pixel. ....	42
Figura 12 - Esquema de formação de feixes do MBES. ....	45
Figura 13 - Resultados da mesma área ensonificada por diferentes modulações de sinal. a) pulso FM; b) pulso CW de 600 $\mu$ s; c) pulso CW de 200 $\mu$ s; d) pulso CW de 70 $\mu$ s; e) pulso CW de 50 $\mu$ s. ....	46
Figura 14 - Demonstração esquemática do aumento do <i>footprint</i> em relação à distância do nadir de um MBES. ....	48
Figura 15 - Esquema de diferenciação por fase do sinal no MBES. ....	49
Figura 16 - Gráfico dos modos de detecção de fundo por amplitude e por fase no MBES. ....	50
Figura 17 - Exemplo de <i>grid</i> . ....	51
Figura 18 - Esquema de recepção de sinal utilizando a interferometria clássica. ....	53

Figura 19 – a) Figura referente à imagem de <i>sidescan</i> ; b) Figura referente à mesma imagem de <i>sidescan</i> , porém com padrão de interferência normalizado.....	53
Figura 20 – Valores de ‘np’ relativos aos máximos (franjas) de cada lóbulo. ....	54
Figura 21 - Disposição vertical do <i>array</i> de recepção na interferometria multifase com 4 (quatro) elementos de recepção. ....	58
Figura 22 - EdgeTech 6205s2.....	61
Figura 23 - Ping DSP 3DSS. ....	62
Figura 24 - Fluxograma de trabalho no Caris Hips. ....	66
Figura 25 - Embarcação criada para processamento dos dados do 6205s2.....	67
Figura 26 - Embarcação criada para processamento dos dados do 3DSS.....	67
Figura 27 - Possibilidade de filtros oferecidos pelo Caris Hips. ....	70
Figura 28 – Exemplo de arquivo “.tid” de maré entendido pelo Caris Hips; em vermelho, o padrão do formato.....	71
Figura 29 - Exemplo de arquivo “.svp” de SVP entendido pelo Caris Hips; em vermelho, o padrão do formato.....	72
Figura 30 - Exemplo de calibração ( <i>patch test</i> ) do transdutor no Caris Hips 10.4. ....	73
Figura 31 - Exemplo de dados espúrios na sondagem.....	74
Figura 32 - Inserção dos desvios-padrão da medição de maré e SVP, juntamente com os previamente lançados na embarcação.....	74
Figura 33 - Imagem de uma linha do 6205s2; em azul a linha de <i>bottom track</i> separando a zona cega do nadir do que será considerado como dado. ....	77
Figura 34 - Imagem de uma linha do 6205s2 já com a correção de <i>slant range</i> aplicada.....	77
Figura 35 - Mosaico de linhas corrigidas de uma área sondada/imageada com o 6205s2. ....	78
Figura 36 – Cobertura de 200% do fundo. ....	79
Figura 37 - Área sondada pelo 6205s2. ....	80

Figura 38 - mínimo em uma linha de sondagem numa profundidade variante de 9 a 10 metros. .....	81
Figura 39 - Alcance máximo em uma linha de sondagem numa profundidade variante de 9 a 13,5 metros. ....	81
Figura 40 - Área de maior fonte de rejeição de dados e incertezas relativas à área 2. ....	83
Figura 41 - Ferramenta de criação de <i>grids</i> no Caris Hips 10.4. ....	83
Figura 42 - Superfície <i>swath angle</i> com resolução de 15 cm (a) e superfície CUBE com resolução de 15 cm (b). ....	84
Figura 43 - Esquema de <i>gathering</i> e <i>scattering</i> do algoritmo CUBE. ....	85
Figura 44 - – Camadas <i>hypothesis count</i> da superfície CUBE da área 1 com resoluções de 25 cm (a) e 15 cm (b) comparadas com a camada <i>depth</i> com resolução de 25 cm (c). ....	86
Figura 45 - Figura 42 (a) ampliada na região de mais hipóteses. ....	86
Figura 46 – Pontos azuis, com 4 (quatro) hipóteses para a profundidade numa região da área 1 e sua representação vertical. ....	87
Figura 47 - Camadas <i>density</i> da área 2 com resoluções de 12,5 cm (a), 25 cm (b) e 50 cm (c); em amarelo seção transversal a uma única linha de sondagem e comparação com a camada <i>depth</i> com resolução de 25 cm (d). ....	89
Figura 48 - Camadas <i>density</i> da área 1 com resoluções de 12,5 cm (a), 25 cm (b) e 50 cm (c) comparadas com a camada <i>depth</i> com resolução de 25 cm. Escala da densidade. ....	90
Figura 49 - Superfície de diferença de profundidades entre as camadas <i>deep</i> e <i>shoal</i> da superfície CUBE (a) comparada com a camada <i>depth</i> com resolução de 25 cm (b) da área 1. ....	91
Figura 50 - Histograma com valores da diferença de profundidades entre as camadas <i>deep</i> e <i>shoal</i> da superfície CUBE da área 1. ....	92
Figura 51 - Região crítica da diferença de profundidades entre as camadas <i>deep</i> e <i>shoal</i> da superfície CUBE da área 2. ....	92
Figura 52 - Histograma com valores da diferença de profundidades entre as camadas <i>deep</i> e <i>shoal</i> da superfície CUBE da área 2. ....	92

Figura 53 - Áreas 1 (a) e 2 (b) onde as regiões em vermelho/vinho representam os nós onde a variação vertical ultrapassou o limite máximo imposto pela ordem especial da S-44 comparadas com as camadas <i>depth</i> das áreas 1 (c) e 2 (d).....	93
Figura 54 - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem especial para a área 1. ....	94
Figura 55 - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem especial para a área 2 (sem a região dos pilares da ponte). ....	94
Figura 56 - Região delimitada por pontos amarelos da área 1 (a) e região delimitada por pontos amarelos da área 2 (b), ambas onde o recobrimento foi de 100% (cobertura batimétrica de 200%).....	95
Figura 57 - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem exclusiva para a área 1.....	95
Figura 58 - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem exclusiva para a área 2.....	96
Figura 59 - Camada <i>uncertainty</i> (a) e camada <i>standard deviation</i> (b) da superfície CUBE comparadas com a camada <i>depth</i> (c) da área 1. ....	97
Figura 60 - Feixes mais externos, demarcados em vermelho, de uma seção transversal à 6 (seis) linhas de sondagem da área 1.....	98
Figura 61 - Seção transversal a 6 (seis) linhas de sondagem, relacionando a elevação com o aumento no desvio padrão. ....	99
Figura 62 - Histograma da amostragem do desvio-padrão distribuído na área 1. ....	99
Figura 63 - Camadas Camada <i>uncertainty</i> (a) e camada <i>standard deviation</i> (b) da superfície CUBE comparadas com a camada <i>depth</i> (c) da área 2.....	100
Figura 64 - Seção transversal a 2 (duas) linhas de sondagem na área 2 destacando-se, em azul, o descasamento entre as linhas, gerando uma incerteza vertical e aumentando o desvio padrão. ....	101
Figura 65 - 3 (três) linhas de sondagem e superfície com resolução de 50 cm consideradas para geração do QC <i>report</i> relativo à ordem especial da área 1.....	103

Figura 66 - Camada <i>depth</i> da superfície CUBE com resolução de 25 cm da área 1 onde o recobrimento foi de 100% (cobertura batimétrica de 200%).	104
Figura 67 - Camada <i>depth</i> da superfície CUBE com resolução de 25 cm da área 1 em vista 3D com exagero de 10x.	105
Figura 68 - Camada <i>depth</i> da superfície CUBE com resolução de 50 cm da área 2.	106
Figura 69 - Camada <i>depth</i> da superfície CUBE com resolução de 50 cm da área 2 em vista 3D com exagero de 10x.	107
Figura 70 – Áreas 1 (a) e 2 (b) imageadas com o 6205s2.	108
Figura 71 - Superfícies imageada (a) e batimétrica (b) da área 1.	109
Figura 72 - Análise da superfície batimétrica (a) utilizando o imageamento (b) com a correspondência de cores aos objetos relativos às duas figuras.	110
Figura 73 - Comparação entre a superfície batimétrica (a) e a imagem (b) da área 1 com a respectiva batimetria (c).	111
Figura 74 - Comparação das superfícies imageadas (a) e batimétrica (b) da sustentação da ponte na área 2.	112
Figura 75 - Área sondada/imageada pelo 3DSS.	113
Figura 76 - Alcance mínimo em uma linha de sondagem numa profundidade média de 7,6 metros.	114
Figura 77 - Alcance máximo em uma linha de sondagem numa profundidade média de 14 metros.	114
Figura 78 - Camadas <i>hypothesis count</i> da superfície CUBE da área 3 com resoluções de 50 cm (a) e 25 cm (b) comparadas com a camada <i>depth</i> com resolução de 50 cm (c).	116
Figura 79 - Região aproximada do cais da área 3; em azul, os pontos com maior números de hipóteses devido à grande variação vertical.	116
Figura 80 - Camadas <i>hypothesis count</i> da superfície CUBE da área 4 com resoluções de 50 cm (a) e 25 cm (b) comparadas com a camada <i>depth</i> com resolução de 50 cm (c); faixa amarela utilizada para avaliação dos dados de densidade.	117

Figura 81 - Camadas <i>density</i> da área 4 com resoluções de 50 cm (a) e 25 cm (b) comparadas com a camada <i>depth</i> com resolução de 50 cm (c). .....	118
Figura 82 - Camadas <i>density</i> da área 3 com resoluções de 50 cm (a) e 25 cm (b) comparadas com a camada <i>depth</i> com resolução de 50 cm (c). .....	119
Figura 83 - Superfície de diferença de profundidades entre as camadas <i>deep</i> e <i>shoal</i> da superfície CUBE da área 3 (a) e a mesma superfície sem os pilares e cais (b) comparadas com a camada <i>depth</i> com resolução de 50 cm (c). .....	120
Figura 84 - Histograma com valores da diferença de profundidades entre as camadas <i>deep</i> e <i>shoal</i> da superfície CUBE da área 3. ....	120
Figura 85 - Superfície da diferença de profundidades entre as camadas <i>deep</i> e <i>shoal</i> da superfície CUBE da área 4. ....	120
Figura 86 - Histograma com valores da diferença de profundidades entre as camadas <i>deep</i> e <i>shoal</i> da superfície CUBE da área 4. ....	121
Figura 87 - Áreas 3 (a) e 4 (b) onde as regiões em vermelho/vinho representam os nós onde a variação vertical ultrapassou o limite máximo imposto pela ordem especial da S-44 comparadas com as camadas <i>depth</i> das áreas 3 (c) e 4 (d). ....	122
Figura 88 - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem especial para a área 3. ....	122
Figura 89 - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem especial para a área 4. ....	123
Figura 90 - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem exclusiva para a área 4. ....	123
Figura 91 - Camada <i>uncertainty</i> (a) e camada <i>standard deviation</i> (b) da superfície CUBE comparadas com a camada <i>depth</i> (c) da área 3. ....	124
Figura 92 - Exemplo do descasamento na mesma linha de sondagem (área 3), porém em dois sentidos diferentes. ....	125
Figura 93 - Histograma da amostragem do desvio padrão distribuído na área 3. ....	125

Figura 94 - Camada <i>uncertainty</i> (a) e camada <i>standard deviation</i> (b) da superfície CUBE comparadas com a camada <i>depth</i> (c) da área 4. ....	126
Figura 95 - Exemplos de regiões da área 4 que contribuíram para o aumento no desvio-padrão das profundidades (em azul).....	126
Figura 96 - Camada <i>depth</i> da superfície CUBE com resolução de 50 cm da área 3.....	128
Figura 97 - Camada <i>depth</i> da superfície CUBE com resolução de 50 cm da área 3 em vista 3D com exagero de 5x.....	129
Figura 98 - Camada <i>depth</i> da superfície CUBE com resolução de 50 cm da área 4.....	129
Figura 99 – Camada <i>depth</i> da superfície CUBE com resolução de 50 cm da área 4 em vista 3D com exagero de 10x. ....	130
Figura 100 - Imageamento da área 3. ....	131
Figura 101 - Superfícies batimétrica (a) e imageada (b) da área 3.....	132
Figura 102 - Pilares de sustentação de um píer não identificado anteriormente pela sondagem. ....	133
Figura 103 - Região sem dados da superfície batimétrica (a) comparada à mesma região imageada (b). ....	133
Figura 104 - Objeto analisado; destacado em vermelho, tamanhos medidos manualmente para estimativa da altura do objeto.....	134
Figura 105 - Pequena região sem batimetria com respectivo objeto capturado pelo imageamento.....	134
Figura 106 - Superfície batimétrica (a) e imagem (b) da mesma região da área 3.....	135
Figura 107 - Imagem de objeto relevante à navegação. ....	136

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios para LH.....	30
Tabela 2 - Frequência x Profundidade recomendada. ....	44
Tabela 3 - Especificações do EdgeTech 6205s2 – destaque para as configurações utilizadas para obtenção dos dados. ....	61
Tabela 4 - Especificações do Ping DSP 3DSS. ....	63
Tabela 5 - Métodos de entrada no Caris Hips and Sips.....	63
Tabela 6 - Valores de acurácia do SBG Ekinox D utilizado em conjunto com o 6205s2.....	68
Tabela 7 - Valores de acurácia do SBG Ellipse2-E utilizado em conjunto com o 3DSS.....	69
Tabela 8 - Alcance horizontal mínimo e máximo, aproximados, em uma linha de sondagem. ....	81
Tabela 9 - Relação de pontos aceitos e rejeitados. ....	82
Tabela 10 - Contribuição com o número de pontos por nó relativos à resolução da superfície. ....	88
Tabela 11 - Percentual de nós dentro da tolerância máxima da incerteza vertical relativos às áreas 1 e 2 com base na ordem especial da S-44.....	94
Tabela 12 - Percentual de nós dentro da tolerância máxima da incerteza vertical relativos às áreas 1 e 2 com base na ordem exclusiva da S-44.....	96
Tabela 13 - Relação de detecção de estruturas/feições com resolução da superfície analisada, de acordo com as incertezas <i>a priori</i> das ordens previstas na S-44.....	102
Tabela 14 – QC <i>report</i> relativo à superfície CUBE com resolução de 25 cm. ....	103
Tabela 15 - Alcance horizontal mínimo e máximo, aproximados, em uma linha de sondagem. ....	113
Tabela 16 - Relação de pontos aceitos e rejeitados. ....	115

Tabela 17 - Contribuição com o número de pontos por nó relativos à resolução da superfície. .....	117
Tabela 18 - Percentual de nós dentro da tolerância máxima da incerteza vertical relativos às áreas 3 e 4 com base na ordem especial da S-44. ....	123
Tabela 19 - Relação de detecção de estruturas/feições com resolução da superfície analisada, de acordo com as incertezas <i>a priori</i> das ordens previstas na S-44.....	127
Tabela 20 - QC <i>report</i> relativo à superfície CUBE com resolução de 50 cm. ....	127

## LISTA DE ABREVIATURAS

AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
BASE	<i>Bathymetric Associated with Statistical Error</i>
CAATI	<i>Computed Angle-of-Arrival Transient Imaging</i>
CHS	<i>Canadian Hydrographic Service</i>
cm	centímetros
CN	Cartas Náuticas
CUBE	<i>Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
ENC	<i>Electronic Navigational Chart</i>
EUA	Estados Unidos da América
FM	<i>Frequency Modulation</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
IES	<i>Interferometric Editing System</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
kHz	kilohertz
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LH	Levantamento Hidrográfico
MB	Marinha do Brasil
MBES	<i>Multibeam Echosounder</i>
MPES	<i>Multi Phase Echo Sounder</i>
MRA	<i>Maximum Response Axis</i>
MSBS	<i>Multi-Angle Swath Bathymetric Sidescan</i>
MU	<i>Motion Unit</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmosphere Administration</i>
NORMAM	Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos
OHI	Organização Hidrográfica Internacional
PDBS	<i>Phase Difference Bathymetric Sonar</i>
RMS	<i>Royal Mail Ship</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>

SOLAS	<i>Safety Of Life At Sea</i>
SSS	<i>Sidescan Sonar</i>
SVP	<i>Sound Velocity Profiler</i>
THU	<i>Total Horizontal Uncertainty</i>
TPU	<i>Total Propagated Uncertainty</i>
TVG	<i>Time Variable Gain</i>
TVU	<i>Total Vertical Uncertainty</i>
SBET	<i>Smoothed Best Estimate of Trajectory</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1	OBJETIVOS.....	26
<b>2</b>	<b>ASPECTOS GERAIS.....</b>	<b>28</b>
2.1	PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES NA BATIMETRIA.....	28
<b>2.1.1</b>	<b>Ordens dos LH.....</b>	<b>28</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Erros e Incertezas.....</b>	<b>30</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Precisão x Acurácia.....</b>	<b>34</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Considerações Gerais.....</b>	<b>35</b>
2.2	SONAR DE VARREDURA LATERAL.....	37
2.3	ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE.....	43
<b>2.3.1</b>	<b>Detecção de Fundo.....</b>	<b>47</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Produtos.....</b>	<b>50</b>
2.4	INTERFEROMETRIA.....	52
<b>2.4.1</b>	<b>Interferometria Clássica.....</b>	<b>52</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Interferometria Diferencial.....</b>	<b>55</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Interferometria Multifase.....</b>	<b>57</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>60</b>
3.1	MATERIAIS.....	60
<b>3.1.1</b>	<b>EdgeTech 6205s2.....</b>	<b>60</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Ping DSP 3DSS.....</b>	<b>62</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Caris Hips and Sips.....</b>	<b>63</b>
<b>3.1.4</b>	<b>SonarWiz.....</b>	<b>64</b>
3.2	MÉTODOS.....	65
<b>3.2.1</b>	<b>Batimetria.....</b>	<b>65</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Imageamento.....</b>	<b>76</b>
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO E RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
4.1	RESULTADOS DE BATIMETRIA E IMAGEAMENTO OBTIDOS COM O EDGETECH 6205S2.....	79
<b>4.1.1</b>	<b>Batimetria.....</b>	<b>79</b>
4.1.1.1	Alcance Horizontal.....	80
4.1.1.2	Número de Pontos de Sondagem.....	82
4.1.1.3	Geração de Superfícies.....	83

4.1.1.4	Densidade dos Dados .....	88
4.1.1.5	Variação Vertical das Profundidades .....	91
4.1.1.6	Controle de Qualidade.....	96
4.1.1.7	Superfícies Finais e Considerações .....	104
<b>4.1.2</b>	<b>Imageamento.....</b>	<b>108</b>
4.2	RESULTADOS DE BATIMETRIA E IMAGEAMENTO OBTIDOS COM O PING DSP 3DSS.....	112
<b>4.2.1</b>	<b>Batimetria.....</b>	<b>112</b>
4.2.1.1	Alcance Horizontal.....	113
4.2.1.2	Número de Pontos de Sondagem.....	115
4.2.1.3	Quantidade de Hipóteses .....	115
4.2.1.4	Densidade dos Dados .....	117
4.2.1.5	Variação Vertical das Profundidades .....	119
4.2.1.6	Controle de Qualidade.....	124
4.2.1.7	Superfícies Finais e Considerações .....	128
<b>4.2.2</b>	<b>Imageamento.....</b>	<b>131</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>137</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	139
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>140</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com o avançar dos tempos, cresce no homem a vontade e a necessidade de descobrir o mundo que o rodeia. Para tal, ele cria e desenvolve equipamentos que o possibilitam explorar não só outros planetas e corpos distantes do sistema solar e outras galáxias, mas também as profundezas da Terra. Ainda nesse afã, a curiosidade sobre o fundo marinho figura entre os mais importantes objetivos a serem alcançados em sua plenitude, pois quanto mais é estudado, mais se descobre a necessidade de continuar esta exploração (no sentido do conhecimento, não econômico apenas). Com este propósito foi criado o projeto Seabed 2030 o qual empresas e serviços hidrográficos de alguns países já fazem parte com o objetivo de mapear totalmente o fundo do oceano até o referido ano.

Com esse objetivo, no decorrer dos séculos foram criados equipamentos capazes de estudar o fundo marinho sem que, necessariamente, se estivesse lá. Costuma-se chamar essa técnica de sensoriamento remoto, que “pode ser entendido como um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos” (MORAES, 2002), seja ele feito por ondas acústicas, eletromagnéticas, espectro ótico, entre outras formas de sensoriamento. Nesse sentido, cabe ressaltar que ondas eletromagnéticas não se propagam muito bem na água, “ondas eletromagnéticas com frequência acima de 30 kHz (kilohertz) sofrem atenuação muito forte pela água, causada principalmente pela absorção da radiação e pela dispersão causada por partículas em suspensão” (GUEDES, 2009), portanto não são amplamente utilizadas na batimetria, à exceção de algumas técnicas recentes que vêm ganhando espaço nessa área, como o LIDAR (*Light Detection and Ranging* – Detecção e Alcance por Luz) que foi amplamente estudado e analisado pelo trabalho de Nascimento (2019)

Essa discussão, aqui, tem por objetivo calcular a profundidade do local observado, pois a partir disso é possível montar através de *softwares* e algoritmos especializados o relevo do fundo do mar, através de modelos batimétricos, que por definição são uma “representação digital da topografia do fundo por coordenadas e profundidades” (OHI, 2020), para posterior confecção de auxílios à navegação. Porém, da mesma forma, será avaliada a utilização do princípio de ondas acústicas para imageamento do fundo e geração de superfícies batimétricas.

Especificamente para o estudo do fundo marinho e sua forma, atualmente, são adotados sinais elétricos que são transformados em ondas acústicas através de transdutores

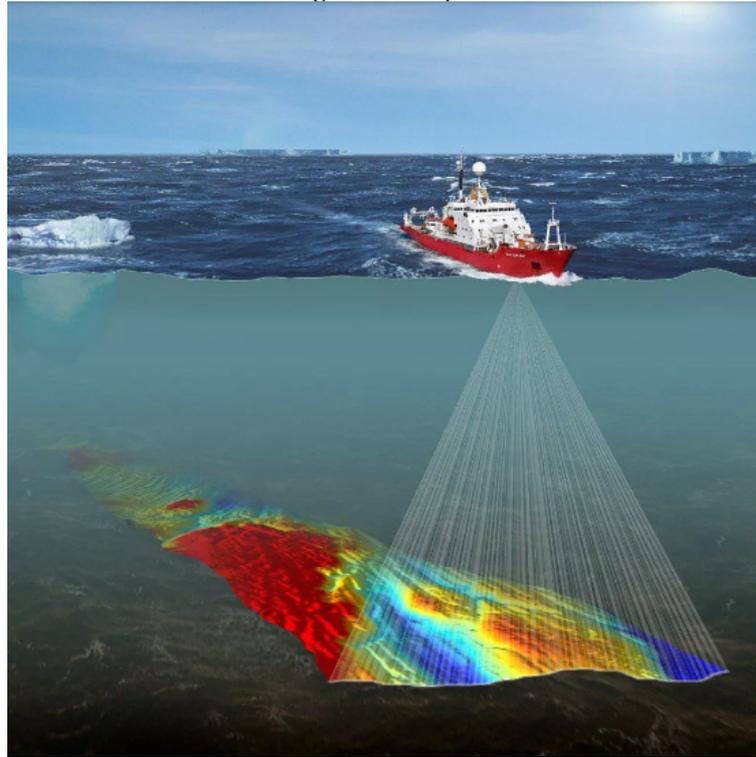
que recebem essa energia e a transforma em som. Este som é emitido na água e retroespalhado por inúmeras partículas e objetos, dentre eles a superfície do fundo do mar, e retorna para os transdutores, onde há a conversão, novamente, da energia acústica em elétrica de forma que o tempo de retorno do sinal consiga ser mensurado e interpretado por algoritmos desenvolvidos com essa finalidade.

No início do desenvolvimento desse tipo de tecnologia o cálculo do tempo foi o principal atributo estudado através de experimentos ainda rudimentares. Com a maior compreensão dos princípios físicos envolvidos na operação, começou a se olhar o par amplitude do sinal e ângulo de chegada e a partir destes realizar o cálculo da diferença entre o sinal emitido e recebido. Atualmente, vem ganhando mais espaço na comunidade acadêmica, mas ainda não sendo unanimidade, o cálculo da profundidade majoritariamente por diferença de fase, onde a “cobertura angular é geralmente maior do que do MBES (*MultiBeam EchoSounder* – Ecobatímetro Multifeixe), o que o torna mais eficaz em águas rasas” (GRALL; KOCHANSKA; MARSZAL, 2020). Chama-se esta última técnica de “interferometria” e será abordada de forma mais detalhada.

Por esse motivo, sonares interferométricos vêm sendo utilizados cada vez mais. Diversos estudos estão sendo desenvolvidos para entender melhor essa tecnologia e para que seja avaliado se é possível que esta seja o futuro da hidrografia, em detrimento ou concomitante, em relação aos ecobatímetros multifeixe que, hoje, ainda são amplamente utilizados.

Faz-se mister que os ecobatímetros multifeixe já utilizam, há alguns anos, a medição por fase do sinal, principalmente nos feixes externos do “leque”, porém nem sempre somente nestes, pois por vezes devido à irregularidade do terreno, o algoritmo utiliza essa técnica para diferenciar também os feixes mais centrais. Aqui, cabe ressaltar que se entende por leque o agrupamento de feixes acústicos emitidos com geometria *along track*, não existe tradução literal para este termo, porém entende-se como uma faixa limitada longitudinalmente em tamanho e geometricamente transversal em relação à embarcação como mostrado na figura 1.

**Figura 1** - Leque.



Fonte: GIOVANINI, 2020.

Desse, os feixes centrais são calculados por diferença de amplitude onde “o tempo de viagem do sinal para o ponto de profundidade correspondente é definido pela amplitude detectada do sinal refletido” (OHI, 2005), enquanto “o método de detecção de fase é comumente usado para grandes ângulos de incidência” (OHI, 2005), de forma a aproveitar melhor as características físicas de cada tipo de sinal. Entretanto aqui, para que ambas as tecnologias sejam diferenciadas didaticamente, será adotado que o MBES utiliza prioritariamente a detecção por amplitude e os sonares interferométricos prioritariamente pela diferenciação por fase, lembrando-se que ambos utilizam essas duas técnicas de detecção, porém em diferentes proporções e ocasiões.

Portanto tratando-se de uma técnica relativamente nova é necessário que sejam estudados os equipamentos e os produtos gerados por estes para subsidiar decisões quanto sua efetividade.

É interessante abordar primeiramente o que é a hidrografia e onde está inserido o termo levantamento hidrográfico, seu conceito, todos os equipamentos auxiliares e técnicas envolvidas bem como os requisitos para que seja efetivamente aceito pela autoridade marítima e especificar quem são essas pessoas e todas as possibilidades e alternativas da área para então, depois, abordar a interferometria em si.

De forma a mitigar o desentendimento e tentar unificar seu significado e de todas as atividades e ações envolvidas no assunto, em 1957, na 7ª Conferência Internacional de Hidrografia, “começaram as discussões formais em estabelecer padrões para Levantamentos Hidrográficos” (OHI, 2020). Como resultado desta conferência, em 1968, foi publicada “a 1ª edição da S-44 intitulada ‘*Accuracy Standards Recommended for Hydrographic Surveys*’ (Padrões de Acurácia Recomendados para Levantamentos Hidrográficos)” (OHI, 2020). Esta publicação norteou internacionalmente as regras para confecção de cartas náuticas de forma a padronizar a navegação mundial para que não houvesse tantos acidentes náuticos quanto estavam ocorrendo no início do século XX. Um exemplo clássico e emblemático de acidente náutico da época, que teve repercussão mundial, foi o caso do *RMS Titanic*, que além de enorme aclamação, foi fator determinante para que houvesse a primeira Convenção Internacional para discussão de assuntos pertinentes à segurança da navegação. Hoje este documento é conhecido por SOLAS (*Safety Of Life At Sea* – Segurança da Vida no Mar).

Entretanto para a hidrografia em si a S-44 continua sendo a referência para trabalhos na área. Esta, hoje, encontra-se em sua sexta edição. Novas edições são e devem ser lançadas devido a diversos fatores, dentre eles a atualização das tecnologias disponíveis para a realização das atividades hidrográficas e de acordo com sugestões enviadas periodicamente pelos países signatários da OHI (Organização Hidrográfica Internacional) com o intuito de melhorar a navegação e normas previamente estabelecidas. A OHI é o órgão de regulação e padronização das atividades hidrográficas exercidas em todo o mundo, ou seja, para que um país esteja em conformidade no que tange ao seu serviço hidrográfico, esse deve seguir fielmente as diretrizes determinadas por aquela Organização. De forma a padronizar esses trabalhos realizados pelos mais diversos países que utilizam suas águas navegáveis, a OHI lançou então um conjunto de regras a serem seguidas e determinadas exigências para que as atividades hidrográficas fossem conduzidas com a atenção e segurança necessárias para um produto final de qualidade e que auxiliasse o navegante. Nasceu daí a S-44, publicação que hoje padroniza a hidrografia no mundo.

Com o objetivo de descentralizar o serviço hidrográfico, cada país ficou com a responsabilidade de mapear suas áreas navegáveis e disponibilizar esses produtos, conhecidos por Cartas Náuticas (CN) a todos que porventura precisassem. Esta por sua vez segundo a NORMAM-25 (BRASIL, 2017) é um “documento cartográfico, em formato de papel ou digital, especificamente elaborado para a navegação aquaviária, publicado oficialmente por um Governo ou, sob a sua autoridade, por um Serviço Hidrográfico autorizado”. Surge então a necessidade de cada país criar seu próprio serviço hidrográfico, órgão responsável pela

realização da hidrografia. No Brasil, essa missão ficou a cargo da Marinha do Brasil (MB) através da Lei Complementar nº 97 de 1999 do Presidente da República, mais especificamente de uma de suas “subsidiárias”, a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) através do Anexo G da Portaria 156 de 2004 do Comandante da Marinha, onde esta tem por missão “produzir e divulgar informações de segurança da navegação e do ambiente marinho, a fim de contribuir para a salvaguarda da vida humana, o desenvolvimento nacional e aplicação do Poder Naval” (DHN, 2022).

Enfim, após o estabelecimento de certos padrões, a definição da palavra hidrografia pela OHI e a mais aceita até hoje é a da publicação S-32 - Dicionário Hidrográfico (2019):

Hidrografia é o ramo da ciência aplicada que lida com a medida e descrição de fatores físicos de oceanos, mares, áreas costeiras, lagos e rios, assim como a previsão de suas mudanças com o passar do tempo, para um propósito primário de segurança da navegação e suporte de todas as outras atividades marítimas, incluindo o desenvolvimento econômico, segurança e defesa, pesquisas científicas e proteção ambiental.

Aqui cabe um adendo: a definição anterior foi traduzida livremente pelo autor e na semântica da língua inglesa há uma diferença entre *safety* e *security* que vale a pena a discussão. Para a língua inglesa, ambas são traduzidas como “segurança”, porém com significados distintos quanto ao seu correto emprego. Segundo Figueiredo (2020), “*Safety* costuma referir-se à segurança física de pessoas individuais” e “*security* já se refere à segurança em um sentido mais amplo, como a segurança de um país ou de patrimônios”. Portanto a palavra comumente utilizada em artigos e trabalhos acadêmicos em inglês quando é tratado de segurança da navegação é a palavra *safety*, pois é usada para salvaguardar a vida humana que utiliza as embarcações em questão.

Retornando ao mote do trabalho, depois de explicitar a definição desse termo tão relevante, faz-se mister falar de outro termo que já foi e continuará sendo bastante utilizado: Levantamento Hidrográfico (LH). Segundo a NORMAM-25 (BRASIL, 2017), LH é o:

conjunto de atividades executadas na obtenção de dados batimétricos, geológicos, maregráficos, fluviométricos, topogeodésicos, oceanográficos e geofísicos, em áreas marítimas, fluviais, lacustres e em canais naturais ou artificiais, navegáveis ou não, que não tenham como finalidade a pesquisa pura e a investigação científica.

Ou seja, através dele é realizada a medição de profundidades para a confecção de CN para a segurança da navegação. Vale ressaltar que esta NORMAM-25 criada pela DHN norteia os trabalhos hidrográficos feitos no Brasil, sendo uma forma de adequação e

internalização da S-44, que é mundial. É através dessa que o profissional da área tem todo o suporte do que fazer, o que será exigido e o que se espera de produto final para aquilo que ele se propôs a realizar. Cabe ressaltar que esta possui critérios ainda mais rígidos, onde cada país tem liberdade para definir tais parâmetros, utilizando a S-44 como requisitos mínimos exigidos.

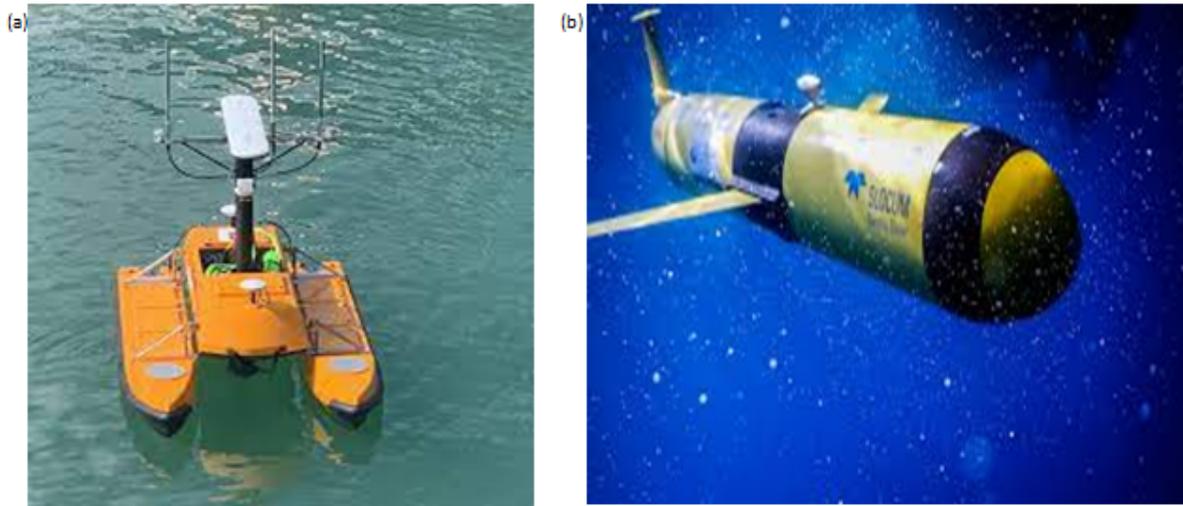
Entretanto, devido ao tamanho da costa brasileira e de suas águas interiores, essa missão não é realizada somente pela Marinha. Cabe a esta:

Analisar os dados resultantes dos LH realizados por órgãos ou entidades não pertencentes à MB, no que diz respeito ao aproveitamento dos dados especificamente para a construção e atualização de cartas e publicações náuticas (BRASIL, 2017).

Ou seja, navios particulares podem realizar os LH de acordo com as necessidades de seus contratantes, porém sempre será a MB que irá analisar e certificar aquele trabalho para futura produção cartográfica. Nesse contexto, os portos têm um interesse bastante elevado nesse assunto pois é através de um LH que é determinada a profundidade dos canais de acesso a estes, a profundidade de seus cais e a possível folga abaixo da quilha dos navios que pretendem adentrar essas águas. É entendido como folga abaixo da quilha “a distância entre o ponto mais baixo do casco de um navio e o fundo do mar, de um rio, etc” (OHI, 2020). Tais fatores são primordiais para a navegação e recebimento de navios maiores, com mais carga e assim tornando-se um fator economicamente muito relevante para os portos e para o Brasil como um todo.

Apesar de parecer algo simples à primeira vista, um LH exige diversos equipamentos específicos (e, muitas vezes, dispendiosos), pessoal capacitado e um meio que os carregue - aqui foi utilizada uma expressão genérica pois, há pouco tempo os AUV's (*Autonomous Underwater Vehicle* – Veículo Submarino Autônomo) e USV's (*Unmanned Surface Vehicle* – Veículo de Superfície não Tripulado) ganharam destaque e, por vezes, substituem as embarcações que antes eram unanimidades na área.

**Figura 2** - Exemplos de USV (a) e AUV (b).



Fonte: a) <https://geo-matching.com/usvs-unmanned-surface-vehicles/me120-usv>; b) <https://www.oilspillresponse.com/pt-br/hub-de-conhecimento/vigilancia/veiculos-submarinos-autonomos-auv/>

Tais equipamentos necessários para uma correta coleta de dados foram sendo aperfeiçoados ao longo dos anos e a forma como é feita ainda é considerada “recente”. Com o avanço da tecnologia no final do século XX, as possibilidades na área da hidrografia cresceram de forma exponencial devido ao aumento da capacidade de processamento dos computadores e, com isso, um novo tipo de tecnologia pode ser colocado em questão: o sonar interferométrico. Este atualmente vem disputando espaço com o já bastante utilizado ecobatímetro multifeixe e a principal discussão é se esse tipo de tecnologia irá substituir a que já está sendo utilizada por décadas ou veio somente como uma ferramenta auxiliar ao ecobatímetro multifeixe.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho foi realizado como sugestão proposta por Pimentel (2018) quando em sua obra sugeriu “3 – Testar os PDBS de diferentes fornecedores” (PIMENTEL, 2018) e, por isso, teve por objetivo analisar os dados de batimetria e de imagens coletados com os sensores interferométricos EdgeTech 6205s2 e Ping DSP 3DSS, elucidando seus pontos positivos, negativos e características em geral, para então avaliar se é possível utilizá-los para a formação de superfícies batimétricas (*grids*) e identificação de feições concomitantemente, bem como avaliar os resultados dentro das ordens preconizadas pela S-44 para LH’s. Entende-se por *grid*: “uma rede composta por dois ou mais conjuntos de curvas, nas quais os

membros de cada curva interceptam os membros de outras de uma forma sistemática” (OHI, 2020). Esta disposição é importante para definir se o produto gerado pelos equipamentos, ora estudados, são capazes de entregar os mesmos produtos que os serviços cartográficos brasileiros já recebem de forma padronizada, de forma a manter o fluxo de dados até o resultado final que são as CN ou correções em CN.

Os dados foram adquiridos pelas próprias empresas estrangeiras fornecedoras dos equipamentos em lide e, por isso, algumas premissas devem ser aceitas/verificadas: 1 – Os dados foram adquiridos da forma como determina a NORMAM-25? 2 – Houve uma filtragem inicial dos dados, antes da disponibilização para geração das superfícies batimétricas deste trabalho?

Adotar/responder estas premissas iniciais relativas ao processo de aquisição dos dados é extremamente importante pois “o processamento não gera um resultado final bom com base num trabalho de campo insatisfatório” (BRASIL, 2017).

Após avaliação das premissas anteriores, é importante que se analise: 3 - A qualidade dos dados; para que, depois, seja avaliada a: 4 - Possibilidade de utilização destes para confecção de produtos batimétricos.

Da mesma forma, como a tecnologia permite a entrega de dois produtos ao mesmo tempo, batimetria e imageamento, é necessário avaliar se é possível confiar na operação destes sensores e se, realmente, é importante e traz benefícios significativos ter os dois produtos ao mesmo tempo, bem como analisar exemplos gerados por ambos.

## 2 ASPECTOS GERAIS

### 2.1 PRINCIPAIS CONSIDERAÇÕES NA BATIMETRIA

Para que seja discutido o que é melhor ou não, ou até mesmo para estabelecer um critério comparativo entre tecnologias, métodos de aplicação de conhecimento e verificação de resultados, é extremamente importante que se tenha o conhecimento de como a atividade hidrográfica é dividida entre Ordens e o que é estabelecido por esses critérios, para que então seja possível uma abordagem mais ampla da gama de variáveis incluídas no assunto.

Segundo a OHI (2020) “os requisitos variam com a profundidade, as propriedades geofísicas e os tipos de navegação esperados”, pois dependendo do local, diversos materiais de fundo podem ser encontrados, alguns inclusive podem alterar o nível de percepção de alguns sensores, por serem extremamente lisos, rugosos, magnéticos, entre outros. Estas, ainda, devem cumprir requisitos específicos de tabelas dispostas na própria publicação onde ficam delimitados critérios de cobertura de fundo, linha de costa, incertezas vertical e horizontal, entre outros. É importante mencionar que existem “cinco Ordens diferentes de levantamentos, cada uma projetada para atender a uma variedade de necessidades” (OHI, 2020), e que são nomeadas por números e/ou letras ou por nome próprio. Por ordem de menor rigor dos critérios, são elas: Ordem 2, Ordem 1b, Ordem 1a, Ordem Especial e Ordem Exclusiva.

#### 2.1.1 Ordens dos LH

Antes de abordar todas as Ordens existentes, é necessário frisar que os requisitos estabelecidos pela S-44 são os mínimos a serem seguidos pelos países para que estejam em conformidade com essa. Entretanto, nada impede que os países determinem que sejam adotados requisitos mais rígidos que a própria S-44. Este é o caso do Brasil, onde “torna-se necessário, nos LH de Ordem Especial e de Ordem 1a, o emprego de ecobatímetros multifeixe

e a cobertura de 200% do fundo marinho” (BRASIL, 2017), diferentemente do que é preconizado na própria S-44.

Falando das Ordens em si, a primeira e menos restritiva é a Ordem 2. Ela é recomendada para profundidades maiores que 200 metros, por nessa faixa ser pouco provável encontrar estruturas de fundo que interfiram na navegação. Entretanto, caso seja detectada alguma profundidade menor no meio do trabalho, nada impede que a área seja “desmembrada” e diferentes Ordens sejam exigidas ou observadas. O que deve ser levado sempre em consideração é a segurança da navegação.

A próxima, bem parecida com a anterior quanto à rigurosidade, é a Ordem 1b. Esta, assim como a anterior, requer que a cobertura de fundo seja de 5% da área total uniformemente distribuída. Aqui, da mesma forma, a área em questão não deve apresentar perigos à navegação e os “espaços” entre as sondagens deve deixar claro que não existem feições ou perigos que interfiram na segurança da navegação.

Em seguida, tem-se a Ordem 1a. Esta, por sua vez, já é bem mais criteriosa quanto à detecção dos perigos à navegação e exige uma cobertura de fundo bem maior. Dependendo do calado dos navios que circulam ou irão circular na área, as feições podem apresentar perigo, porém não crítico e por isso devem ser ressaltados nesta Ordem. “Exemplos de áreas que podem exigir levantamentos de Ordem 1a são: águas costeiras, portos, zonas de atracação (acostagem), vias navegáveis e canais” (OHI, 2020).

Logo após, vem a Ordem Especial. Esta, até a última edição da S-44 lançada em 2020, costumava ser a mais restritiva de todas. Aqui é requerida uma cobertura de 100% da área, bem como seja realizada uma busca de todas as feições. Ou seja, fica clara a preocupação com a segurança da navegação e alguns exemplos destas áreas são zonas de atracação, portos e áreas mais críticas.

A última é a Ordem Exclusiva, que foi novidade da edição de 2020 da S-44. Esta é uma extensão da Ordem anterior. As áreas são as mesmas da anterior, porém os critérios de incertezas e recobrimento ficam bem mais rígidos por serem pontos específicos de áreas muito críticas à navegação. A cobertura batimétrica de 200% é exigida aqui, ou seja, a área deve ser sondada “através de uma sobreposição adequada entre os dados adquiridos por um só sistema ou através da aquisição de mais do que um conjunto de dados independentes dentro de um levantamento” (OHI, 2020), e é nesse ponto que o sonar interferométrico talvez ganhe destaque num futuro próximo devido ao seu teórico maior alcance horizontal e, conseqüentemente, levar menos tempo para sondar uma área.

Na publicação existem tabelas e parâmetros a serem seguidos para que o resultado seja a contento. A tabela a seguir exemplifica tais critérios.

**Tabela 1 - Critérios para LH.**

Critérios	Ordem 2	Ordem 1b	Ordem 1a	Ordem Especial	Ordem Exclusiva
Descrição da Área (De forma genérica)	Áreas onde a descrição geral do fundo é considerada adequada.	Áreas onde a folga abaixo da quilha não é considerada um problema para o tipo de navios à superfície esperado na área.	Áreas onde, embora a folga abaixo da quilha não seja um problema, espera-se que possam existir estruturas/feições que podem colocar em risco a navegação.	Áreas onde a folga abaixo da quilha é crítica.	Áreas onde a folga abaixo da quilha e a manobrabilidade são estritamente mínimas.
<u>THU</u> da Profundidade [m] + [% da Profundidade]	20 m + 10% da profundidade	5 m + 5% da profundidade	5 m + 5% da profundidade	2 m	1 m
<u>TVU</u> da Profundidade (a) [m] e (b)	a = 1.0 m b = 0.023	a = 0.5 m b = 0.013	a = 0.5 m b = 0.013	a = 0.25 m b = 0.0075	a = 0.15 m b = 0.0075
<u>Deteção de Estruturas/feições</u> [m] ou [% da Profundidade]	Não especificado	Não especificado	Estrutura cúbica > 2 m, em áreas com profundidades até 40 m; 10% da profundidade em áreas mais profundas do que 40 metros	Estruturas cúbicas > 1 m	Estruturas cúbicas > 0.5 m
<u>Busca por Estruturas/feições</u> [%]	Embora seja recomendado, não é exigido	Embora seja recomendado, não é exigido	100%	100%	200%
<u>Cobertura Batimétrica</u> [%]	5%	5%	≤ 100%	100%	200%

Fonte: OHI, 2020.

### 2.1.2 Erros e Incertezas

Atividades que estão relacionadas com medições, sempre estão intrinsecamente ligadas aos erros, que são as imperfeições na medida de um valor qualquer. Erro, que não é sinônimo de incerteza, pode ser dividido em três grupos:

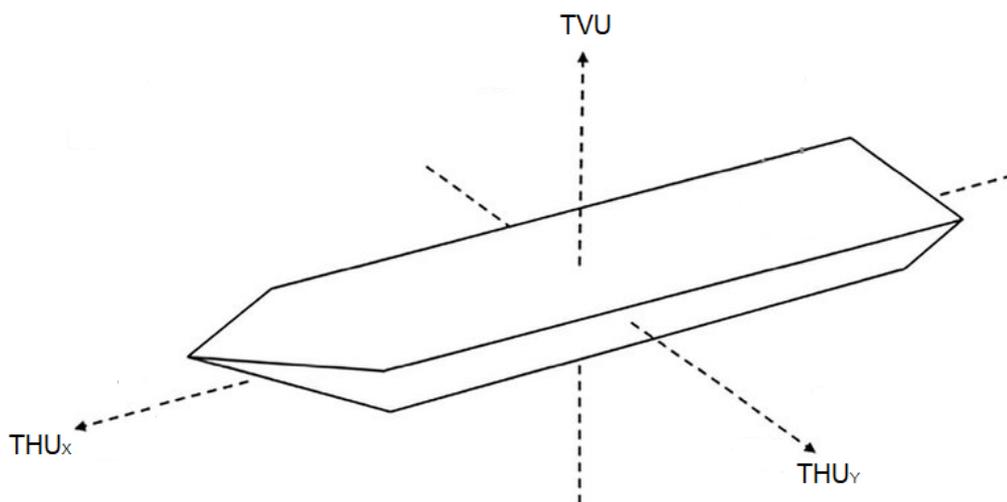
- Erro grosseiro: Aquele gerado pela falha do operador, de forma descuidada;
- Erro aleatório: “Tem origem em variações imprevisíveis também chamadas efeitos aleatórios. Esses efeitos são a causa de variações em observações repetidas do mensurando. O erro aleatório não pode ser compensado, mas pode ser reduzido” (TABACNIKS, 2009); e
- Erro sistemático: “É a componente do erro de uma medição que tem um valor constante ou que varia de uma forma previsível” (OHI, 2020).

Fica claro, portanto, que o grosseiro é eliminado quando se trabalha com a devida atenção e cuidado para que nada de anormal seja feito; o aleatório, como é inevitável, apenas reduzível, é um erro que sempre estará presente, em qualquer situação. Entretanto o sistemático pode ser reduzido através de calibrações periódicas nos equipamentos ou compensações previamente definidas.

Falando agora de incerteza, que significa “uma estimativa que caracteriza um intervalo de valores, dentro do qual se espera, que esteja o valor verdadeiro de uma medição, definida para um determinado nível de confiança” (OHI, 2020), deve-se diferenciá-la primeiramente em *a priori* e *a posteriori*. A “incerteza *a priori* é um valor teórico que se baseia nas melhores práticas empregadas para estimar todos os fatores que afetam as medições” (OHI, 2020) e *a posteriori* é um valor obtido após conclusão de todo o processamento e verificação de incertezas *a priori* e comparando tal resultado a uma área de referência previamente bem conhecida.

As incertezas *a priori* envolvem os valores referentes à medição da distância entre os sensores, aos fatores ambientais e às próprias incertezas dos equipamentos. Prioritariamente se separam nas três dimensões e são normalmente associadas a diferentes fatores como na figura 3.

**Figura 3** - Direções das incertezas envolvidas nos LH.



Fonte: elaborado pelo autor.

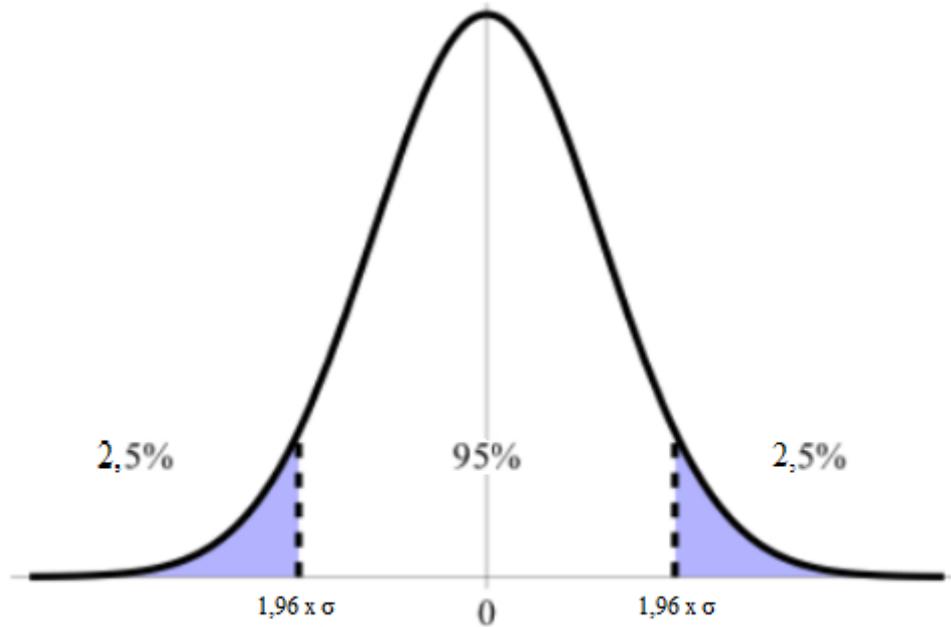
Na tabela 1 e na figura 3 acima aparecem alguns termos que são de extrema importância para a análise de dados batimétricos, dentre eles, o cálculo das incertezas. São eles (OHI, 2020):

- TPU (*Total Propagated Uncertainty* – Incerteza Propagada Total): É a incerteza tridimensional que inclui todas as incertezas que contribuem para a medição;
- THU (*Total Horizontal Uncertainty* – Incerteza Horizontal Total): É a componente da incerteza total propagada (TPU) calculada na dimensão horizontal. THU é uma variável bidimensional que contempla todas as incertezas individuais que podem contribuir para o cálculo da incerteza horizontal de uma medição; e
- TVU (*Total Vertical Uncertainty* – Incerteza Vertical Total): É a componente da incerteza total propagada (TPU) calculada na dimensão vertical. TVU é uma quantidade unidimensional que contempla todas as incertezas individuais que podem contribuir para o cálculo da incerteza vertical de uma medição.

Aqui cabe ressaltar que como num LH as coordenadas são medidas pelo mesmo posicionador, embora latitudes e longitudes façam referência a direções diferentes (bidimensional), “a incerteza da posição é expressa como um único número” (OHI, 2020). Tais incertezas costumam estar relacionadas a fatores fixos onde as principais associadas à THU são as de posicionamento e sensores de atitude da embarcação enquanto as principais relacionadas à TVU são dos próprios sensores acústicos, medição de marés e sensor de abaixamento/levantamento, este popularmente conhecido como sensor de *heave* (elevação).

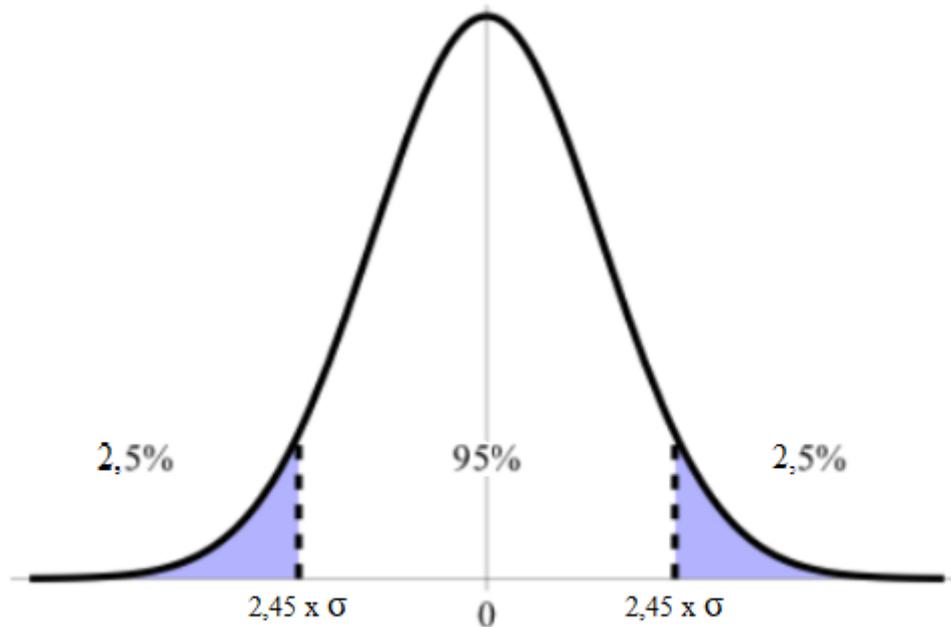
A TPU mencionada acima é o somatório vetorial das THU e TVU. Ambas são fundamentais para a medição da primeira (TPU) de um LH, que devem ser consideradas a um nível de confiança de 95%. “O termo nível de confiança não é a definição estatística rigorosa, mas é equivalente aos termos ‘grau de confiança’ ou ‘probabilidade de cobertura’” (OHI, 2020). Da mesma forma que se pressupõe uma distribuição normal, onde para um nível de confiança de 95%, e dependendo do dimensionamento da quantidade (1D ou 2D) fica definido pelas figuras abaixo onde o  $\sigma$  é o desvio-padrão:

**Figura 4** - Gráfico com a incerteza unidimensional (1D) para um intervalo de confiança de 95% =  $1,96 \times \sigma$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

**Figura 5** - Gráfico com a incerteza bidimensional (2D) para um intervalo de confiança de 95% =  $2,45 \times \sigma$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

Tais incertezas calculadas devem ser computadas sempre, para todos os LH realizados com a finalidade cartográfica. Outra razão das suas medições é o enquadramento do LH nas ordens previamente mencionadas, onde quanto mais rigorosas forem, menores são os valores aceitos preestabelecidos. Esse cálculo, no caso da TVU das profundidades é um pouco mais

específico e realizado pelas letras ‘a’ e ‘b’ constantes na tabela 1. Estes fatores “devem ser introduzidos na fórmula abaixo para calcular a TVU máxima admissível” (OHI, 2020):

$$TVU_{max}(d) = \sqrt{a^2 + (b \times d)^2} \quad (1)$$

Onde “‘a’ representa a parte da incerteza que não varia com a profundidade; ‘b’ é um coeficiente que representa a parte da incerteza que varia com a profundidade e ‘d’ é a profundidade” (OHI, 2020). Portanto com essa fórmula pode-se aplicar os valores contidos na tabela 1 e encontrar os valores máximos aceitáveis para a TVU para cada Ordem de LH. Entretanto “o *software* de processamento de dados batimétricos Caris Hips, adotado pela Marinha do Brasil (MB), possui como uma de suas funcionalidades o cálculo da THU e TVU (por meio da função “*Compute TPU*”) utilizando modelo matemático próprio” (BRASIL, 2017), por este motivo, no trabalho foram considerados os modelos matemáticos próprios do programa.

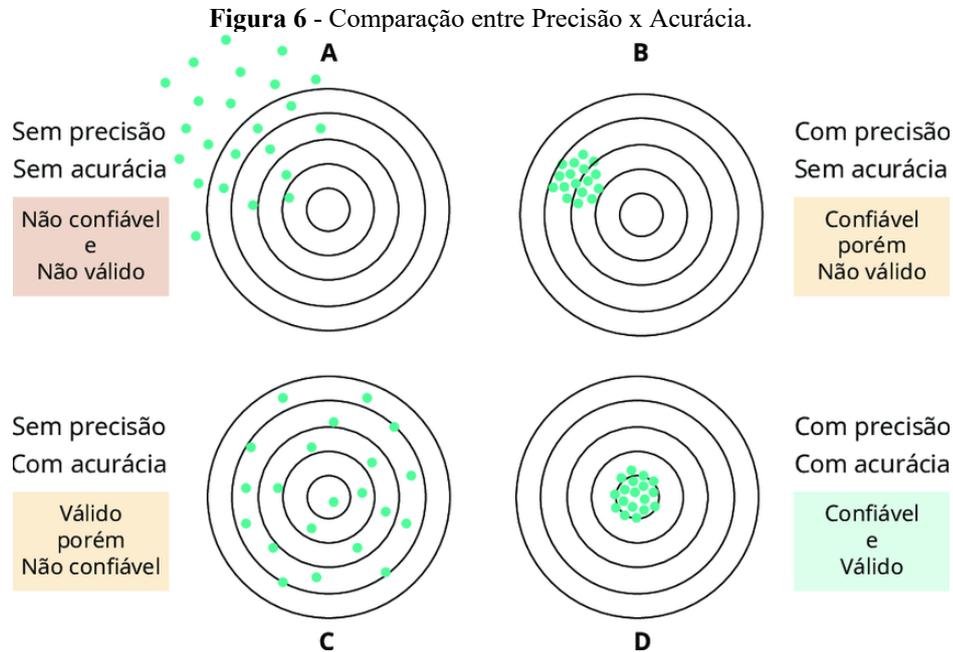
### 2.1.3 Precisão x Acurácia

Após se falar em erros e incertezas, faz-se necessário diferenciar estes dois termos comumente confundidos e que, se não diferenciados, podem causar confusão na avaliação dos resultados finais deste trabalho. Segundo a S-44 da OHI (2008) (apud PIMENTEL, 2018):

- Acurácia: Extensão que uma grandeza medida está dentro do valor presumido ou tido como correto; e
- Precisão: Quanto o valor desvia do valor tido como presumido ou correto. Quanto mais precisa uma medição, menor será a variabilidade entre os valores obtidos.

Portanto ao analisar a diferença entre ambos os termos, pode-se concluir que acurácia é um valor relativo à certeza da medição de uma grandeza real, ou seja, quanto esse valor está próximo de ser verdadeiro. Já o termo precisão está relacionado com a aproximação da medição em relação à sua média, ou seja, aqui pode não se saber o valor real da grandeza,

porém se a variação é pequena em relação à própria amostragem pode-se dizer que a medição é precisa. A figura 6 ilustra bem esta diferenciação e comparação entre os termos.



Fonte:

<https://www.researchgate.net/publication/356894018> Intencao de consumo de carne celular no Brasil e por que isto e importante Capitulo 9 - Cultivated meat consumption intention in Brazil and why this is important Chapter 9.

#### 2.1.4 Considerações Gerais

Após uma análise das Ordens, incertezas, precisão e acurácia observadas pela OHI e dispostas para todos os países signatários, pode-se discutir sobre alguns assuntos pertinentes. Aqui, após observação das exigências de cada Ordem, é possível inferir o tipo de equipamento requerido para cada tipo de área a ser sondada. Por exemplo, da Ordem 2 até a Ordem 1a, em ordem crescente de rigorosidade, podem ser utilizados em LH's ecobatímetros monofeixe, que são os equipamentos menos robustos no que tange à coleta de dados. Entretanto, cabe ressaltar, que existem requisitos mínimos e não máximos, portanto caso seja julgado necessário utilizar um equipamento mais robusto em áreas mais profundas, nada impede que seja feito. Já para as Ordens Especial e Exclusiva são recomendados ecobatímetros multifeixe ou sonares interferométricos devido ao seu tipo de varredura. Estes, por fazerem varreduras em leque, conseguem sondar toda a área de forma mais abrangente,

gastando menos tempo, ou seja, conseguem realizar a cobertura batimétrica de acordo com os critérios estabelecidos na S-44.

Após a observação destes critérios, pode-se discutir a viabilidade da implementação de tipos de equipamentos específicos para cada finalidade de mapeamento do fundo marinho. Por exemplo, numa área afastada da costa, onde a profundidade seja de 1.000 metros, não há a necessidade de utilização de ecobatímetros robustos que detalhem o fundo com precisão. Nestas áreas, de menor perigo à navegação, a própria OHI permite que seja aplicado um ecobatímetro monofeixe, a exemplo. Por esta razão nenhuma tecnologia é considerada ruim ou obsoleta em si, somente inadequada para alguma finalidade específica de acordo com o resultado que se espera.

Outro ótimo exemplo são as áreas onde, mesmo possuindo grandes profundidades, o fluxo de navios é intenso ou possui potencial notadamente conhecido. Aqui, como exemplo, pode-se citar a Bacia de Campos que segundo a Petrobras (2022), empresa brasileira de petróleo, possui 25 unidades de produção (de flutuantes a semissubmersíveis) que vai de “Espírito Santo, na altura de Vitória, até Arraial do Cabo, no litoral norte do Rio de Janeiro”. Aqui fica clara a importância, econômica, estratégica e também quanto à segurança da navegação.

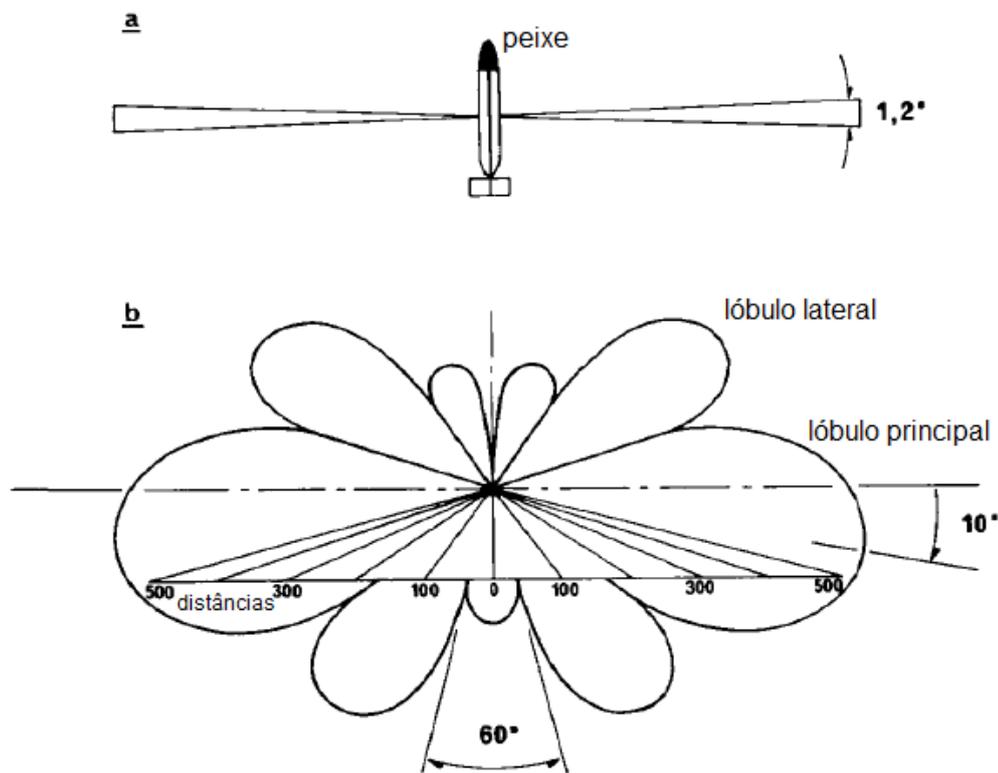
Também, vale lembrar que os equipamentos aqui mencionados e amplamente discutidos não servem apenas para a realização da hidrografia de fato. Os ecobatímetros e sonares servem para uma gama de estudos de habitat, biomas de interesse biológico, pesquisa do subsolo marinho com finalidade científica ou econômica, entre outros. Portanto o estudo dos produtos gerados por tais equipamentos aqui estudados podem servir para uma variedade enorme de áreas do conhecimento como geologia, biologia marinha, estratégia e assim por diante. Ressalta-se que, neste trabalho, o foco é a batimetria com finalidade da futura produção de produtos cartográficos.

Contudo, essas áreas de conhecimento, por vezes, tiram proveito das imagens vistas pelos equipamentos supracitados mesmo aqueles não sendo ideais ou até mesmo não terem sido fabricados para tal. É importante explicar as diferenças, finalidades e possibilidades dos equipamentos que são fabricados para realizarem batimetria (ecobatímetros) e aqueles que foram feitos para simplesmente imagear o fundo, um termo comumente utilizado para diferenciar os produtos gerados por tais equipamentos. Estes últimos, os imageadores, são conhecidos como Sonares de Varredura Lateral ou *Sidescan Sonar* (SSS).

## 2.2 SONAR DE VARREDURA LATERAL

Com intuito de desmistificar o assunto, é relevante fazer a diferenciação dos dois tipos de tecnologias supracitados. Estes, além de possuírem funcionamentos diferentes, diferem em tamanho, modo como são utilizados, produtos gerados, resultados esperados, entre outros. Primeiramente um Sonar de Varredura Lateral, consiste em uma matriz de transdutores que são dispostos para emitir um pulso acústico com ampla largura do feixe no plano vertical perpendicular à direção do sonar de movimento e largura de feixe estreita no plano horizontal (CHESTERMAN *et al.*, 1958; SOMERS & STUBBS, 1984 in Tamsett, 1992; BLONDEL, 2009, apud SUBARSYAH & ARIFIN, 2019).

**Figura 7** - Esquema de transmissão do SSS; (a) vista plana e (b) seção vertical.



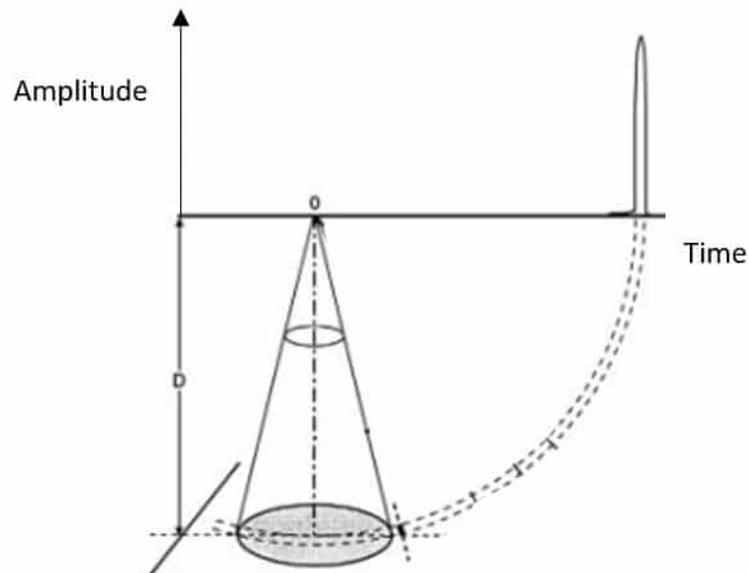
Fonte: adaptado de FLEMMING, 1976.

Na figura acima, os ângulos dos feixes não são padrão, ou seja, cada desenvolvedor de tecnologia define quais são as características de abertura dos feixes. Entende-se, pela figura, que devido à geometria de transmissão dos pulsos acústicos tanto dos lóbulos principais quanto dos laterais, a técnica utilizada pelo equipamento “garante uma resolução transversal razoável mesmo em grandes distâncias (500 metros)” (FLEMMING, 1976). Aqui é

importante destacar que, assim como outras tecnologias de ensonificação do fundo, o SSS também tem a preocupação com sua resolução mínima transversal, que “é a mínima distância entre dois objetos paralelos à linha de navegação que será gravada como objetos separados” (FLEMMING, 1976). A qualidade dessa resolução é muito importante para detecção de feições que estão muito próximas uma da outra no fundo marinho, e é extremamente importante na consideração de determinado equipamento para determinada tarefa.

Possui esse nome porque emite sinais lateralmente à sua trajetória e não consegue resolver os sinais exatamente do fundo abaixo dele, chamado de nadir. Este nome advém da astronomia e significa “ponto no espaço diretamente abaixo do lugar onde alguém se encontra” (NADIR, 2023), ou seja, o que está abaixo dele, no fundo, uma distância horizontal que varia de acordo com a profundidade em que ele esteja navegando/flutuando fica impossibilitada de ser imageada. O motivo para tal acontecimento é porque no nadir todos os retornos possuem um ângulo de incidência próximo a  $90^\circ$  e, como resultado, o transdutor recebe um retorno muito forte logo após a emissão do sinal, impossibilitando sua discriminação. O SSS mede a intensidade do sinal de retorno do fundo ao transdutor, chamado de *backscatter* (retroespalhamento). Na figura 8 a seguir fica mais fácil de entender o que acontece com o sinal no nadir.

**Figura 8** - Esquema: sinal emitido x intensidade de retorno do SSS



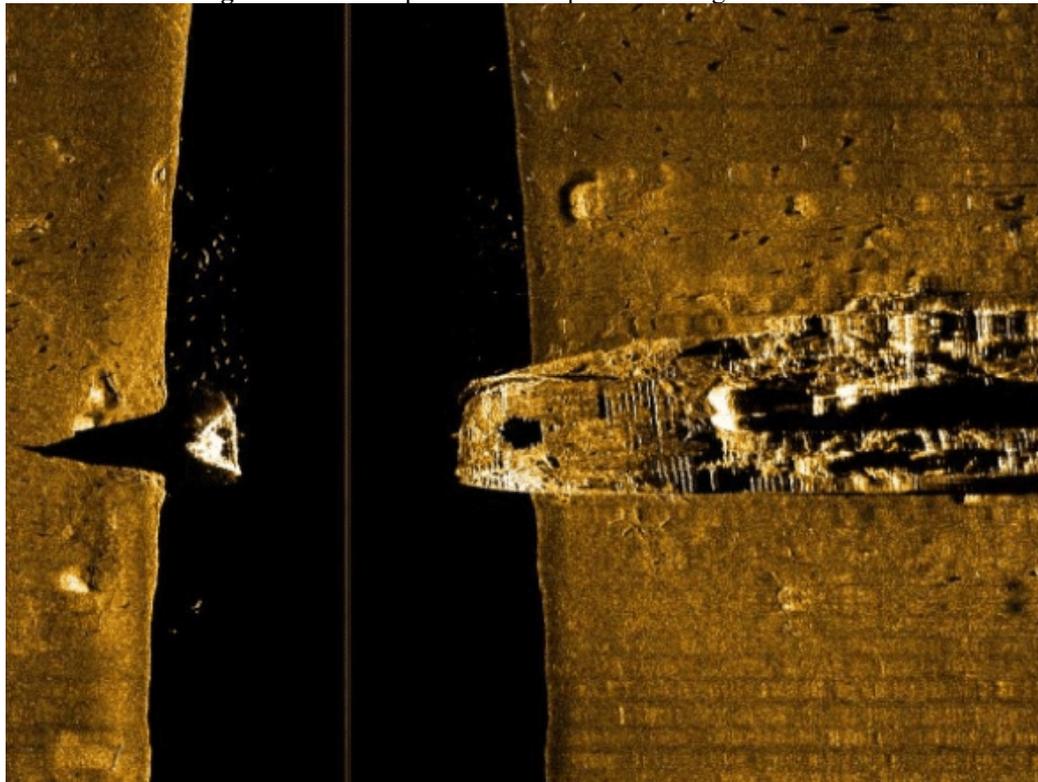
Fonte: R2SONIC, 2018.

Segundo Johnson e Helferty (1990):

Sendo um reflexo direto, o "retorno inferior" é invariavelmente um retorno muito forte. Devido à incidência quase vertical da frente de onda sonora conforme ela atinge as áreas imediatamente abaixo do navio, a taxa de amostragem do gerador de pixel precisaria ser muito alta para ser alcançada na prática. O resultado líquido é que a região do fundo do mar diretamente sob o corpo rebocado de varredura lateral não pode ser usada na imagem acústica. A maioria dos sistemas elimina automaticamente esses retornos acústicos do 'quase-nadir' do conjunto de dados.

A figura 9 a seguir representa o que normalmente é observado na tela dos SSS em relação ao retorno do nadir.

**Figura 9** - Nadir representado em preto nas imagens de SSS.



Fonte: R2SONIC, 2018.

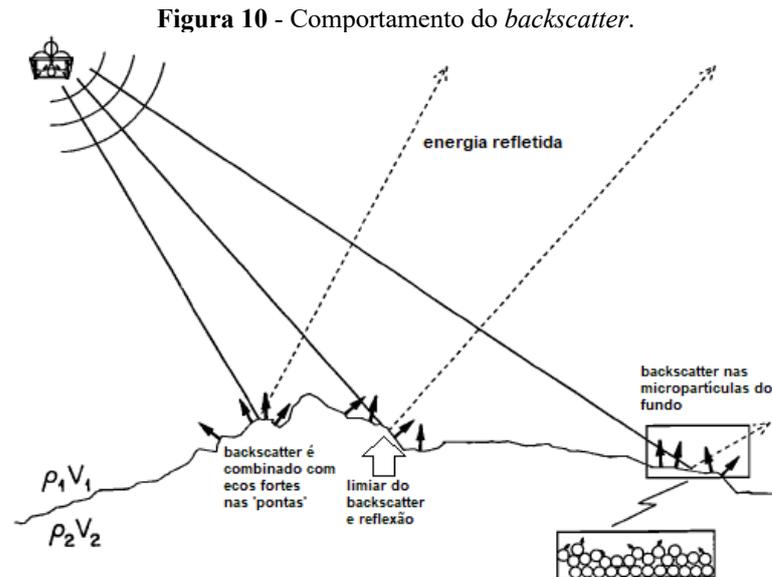
O nadir normalmente é representado em preto, pois há um filtro automático nos *softwares*, como diz Johnson e Helferty (1990), que melhoram a imagem para que não apareça a enorme intensidade de retorno de sinal que advém do nadir. No esquema de palheta de cores acima, um dos mais utilizados, em escala de amarelo a preto, se não houvesse tal filtro, o nadir seria totalmente amarelo (quanto mais amarelo, mais intenso é o *backscatter*) e impossível de ser observado da mesma forma.

Colocada em questão a limitação da identificação do fundo no nadir, é notório, nesse momento, salientar que os SSS não são capazes de medir a profundidade, pois eles trabalham com o fator intensidade de retorno do sinal e não do cálculo do tempo de retorno do sinal. Por consequência disto, é fundamental o entendimento que este equipamento não pode ser

utilizado para medição de profundidades quando se deseja uma acuidade nesse quesito. Este até consegue estimar a profundidade da imagem que está sendo observada, porém o faz não por sensores próprios para tal, mas apenas por geometria básica onde o operador informa algumas variáveis da operação e o programa calcula, sem muita precisão, a profundidade do fundo observado no momento. O que acontece, em alguns destes, é que são equipados com sensores de pressão atmosférica e conseguem estimar a altitude que estão em relação à linha d'água onde fazem a relação da pressão conhecida ao nível do mar (1 atmosfera) e o valor marcado em seu sensor no momento. Além disso, pela largura da zona de sombra do nadir, conseguem identificar, também por geometria básica, a distância do equipamento para o fundo observado. Portanto juntando os dois valores supracitados pode-se estimar a profundidade local.

Outro aspecto relevante é que este é um equipamento para ser rebocado pela embarcação. Podem ser utilizados em ROV's/AUV's da mesma forma - pois sua profundidade de operação é variável de acordo com a profundidade local. Aqui outro fator determinante para a utilização do SSS é saber a profundidade da área a ser estudada para que seja tirado maior proveito do equipamento e o mesmo navegue na altitude recomendada pelo fabricante, em relação ao fundo, geralmente em torno de 10% da profundidade local. Outro ponto que assume determinada relevância, quando o equipamento opera rebocado, ele dificilmente consegue ser posicionado de forma correta em qualquer sistema de referência horizontal. Isto interfere na sua capacidade de atribuir coordenadas exatas a pontos observados pelo seu imageamento do fundo. Aqui, da mesma forma, como na profundidade estimada, o cálculo da posição do equipamento rebocado é feito por uma série de cálculos no *software* com dados inseridos pelo operador, como: comprimento do cabo de reboque, altura do dispositivo de reboque, distância do dispositivo para a antena de posicionamento da embarcação, entre outros fatores. Por esse motivo, outra medida que não é muito precisa é o posicionamento (latitudes e longitudes) de feições submarinas registradas.

Caso o SSS esteja muito distante do fundo, o sinal recebido será tão fraco que não conseguirá ser interpretado e caso navegue muito perto, a zona de sombra do nadir será tão grande que não será eficiente sua utilização.



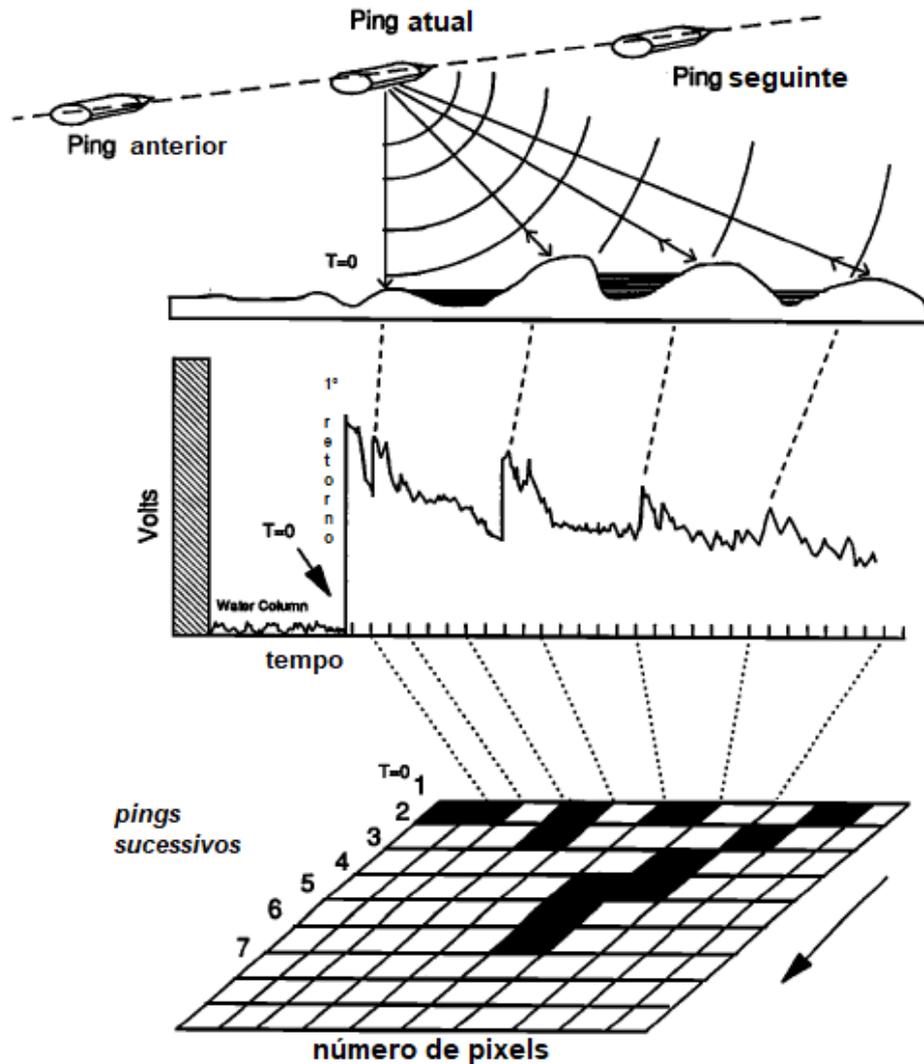
Fonte: adaptado de JOHNSON e HELFERTY, 1990.

Na figura 10, pode-se ter uma noção de como o retroespalhamento é observado. A “intensidade do sinal de retorno é uma função das propriedades do material assim como a topografia. Objetos grandes e ondas de areia (*sand waves*) não são apenas bons refletores, mas também produzem uma zona de sombra acústica atrás destes onde nada é gravado” (FLEMMING, 1976). Na figura 10, nota-se também as variáveis ‘ $\rho$ ’ representando densidade e a letra ‘V’ a velocidade do som em cada material. Com isso, é possível definir o termo Impedância Acústica, como uma grandeza “matematicamente representada pelo produto da velocidade de propagação do som num meio pela densidade, ou seja, a impedância de um meio é igual a: ‘ $i$ ’ = ‘V’ x ‘ $\rho$ ’” (SOUZA, 2006), variável extremamente importante quando se analisa imagens geradas por SSS, pois cada material possui características próprias e é por esse motivo que através da imagem formada pelo retroespalhamento pode-se inferir o tipo de material. Quanto mais viscoso o material, mais energia será absorvida e menor energia será refletida, consequentemente, o SSS receberá um sinal fraco de retorno. Enquanto em materiais duros como rochas, o sinal é prioritariamente refletido ao invés de absorvido e seu retorno é intensificado. Entretanto é importante salientar que tal “reflexão das ondas acústicas só ocorre quando existem contrastes representativos entre os meios atravessados pelo sinal acústico emitido” (SOUZA, 2006), representado normalmente pela transição do meio aquoso para o fundo marinho.

A “intensidade do retorno acústico é convertida num valor de pixel em escala de cinza (0 – 255) como imagem” (CERVENKA & DE MUSTIER, 1993; DANIEL *et al.*, 1998; MORENO *et al.*, 2014, BURGUERA & OLIVER, 2015; ZHAO *et al.*, 2017, APUD SUBARSYAH & ARIFIN, 2019). A palheta de cores ou de tons de cinza pode ser

configurada para quanto maior for a intensidade do retorno do sinal, mais clara a imagem irá aparecer na tela (ou vice-versa – ajustável pelo operador), conforme ilustrado na figura 11. Cabe salientar que neste trabalho as imagens dispostas estão no padrão amarelo e preto, o que significa: quanto maior o retorno, mais amarelo, quanto menor o retorno, mais escuro, chegando ao preto no caso de sombras (e nadir).

**Figura 11** – Relação entre intensidade do *backscatter* e intensidade do pixel.



Fonte: adaptado de JOHNSON e HELFERTY, 1990.

Através das sombras geradas pelos alvos consegue realizar medições de tamanhos de feições em relação ao fundo. Essa tarefa deve ser realizada pelo operador no pós-processamento dos dados e constitui-se em uma das principais ferramentas dessa tecnologia. Ademais, tem como outra importante utilização a identificação geomorfológica de fundos e identificação dos alvos submersos. O SSS é um rápido e fácil método de obter características básicas do local apenas com as imagens obtidas.

Outra utilização bastante relevante, esta para a hidrografia, é sua utilização para descobrir onde há pontos de interesse à navegação, seja um alto fundo, um recife de corais, naufrágios, áreas de cabos submarinos, dentre outras. A identificação destas feições se torna importante para uma posterior sondagem batimétrica minuciosa na área ou para identificação do fundo a ser lançado em CN para alertar o navegante sobre a qualidade do solo e a segurança que a embarcação terá ao fundear naquela área.

### 2.3 ECOBATÍMETRO MULTIFEIXE

Já abordado anteriormente, também conhecido por *MultiBeam EchoSounder* (MBES), faz-se necessária agora a discussão do modo de funcionamento atual e dos produtos entregues por este tipo de equipamento. Na área da hidrografia é a principal escolha para levantamentos hidrográficos de Ordem Especial e Exclusiva. Em associação com outros equipamentos primordiais para seu funcionamento, como as unidades de movimento, conhecidos como *Motion Units* (MU), que compensam os movimentos da embarcação em todas as direções; como o *Sound Velocity Profiler* (SVP - Perfilador da Velocidade do Som), que mede o comportamento da temperatura na coluna d'água bem como a pressão; como as diversas opções de posicionadores, para que seja atribuído um valor acurado das determinadas medidas batimétricas; dentre outros que são igualmente importantes para um levantamento hidrográfico completo; tem-se o principal equipamento que é o responsável por efetivamente medir a profundidade local, foco da operação.

Ademais é importante saber como a frequência central desses equipamentos afeta na sua operação e nos resultados desejados/obtidos. De nada adianta ter um equipamento robusto, todos os periféricos alinhados e em ótimas condições e o conjunto for empregado no lugar errado. Lugar errado entende-se profundidade errada. É importante fazer uma relação Frequência x Profundidade e entender porque este fator faz toda a diferença na operação com ecobatímetros.

Segundo Pacheco (2012), “o alcance de um pulso é inversamente proporcional à sua frequência, o que implica que as frequências mais altas são usadas em menores profundidades, e as mais baixas para maiores” (apud GAGG, 2016). A seguinte tabela faz uma boa relação entre frequência e profundidade.

**Tabela 2** - Frequência x Profundidade recomendada.

<b>Frequência</b>	<b>Aplicação</b>
> 200 kHz	Medição de profundidades até 100 m
50 kHz ~ 200 kHz	Medição de profundidades até 1.500 m
12 kHz ~ 50 kHz	Medição de profundidades maiores que 1.500 m
< 8 kHz	Verificação de sedimentos

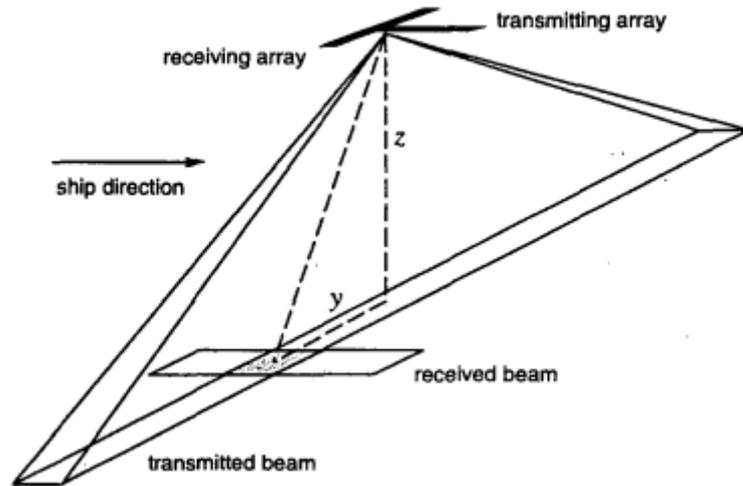
Fonte: OHI, 2005 (apud GAGG, 2016).

Ressalta-se que a tabela acima não é uma referência engessada do que deve ser utilizado, os objetivos de cada pesquisa/estudo devem estar alinhados com a utilização de determinado equipamento e/ou profundidade. Exemplificando: é possível utilizar equipamentos com frequência de emissão de 32 kHz para realizar LH's em profundidades menores do que 100 metros, caso não haja outro equipamento com frequências mais altas disponível. O fator determinante neste caso será a acurácia requerida para tal levantamento, ou seja, se for requerida uma Ordem Especial, provavelmente o equipamento supracitado não atingirá seu objetivo, mas conseguiria realizar um LH de Ordem 1a, por exemplo.

A frequência do sinal acústico emitido pelo transdutor é inversamente proporcional à resolução linear do sistema; ou seja, quanto maior a frequência, menor será a resolução linear. Já a largura do feixe determina a faixa de cobertura do sistema; quanto maior a largura do feixe, maior será a área que o sistema será capaz de detectar. O tamanho do transdutor também influencia na largura do feixe; quanto maior for o transdutor, maior será a largura do feixe e, conseqüentemente, menor será a resolução vertical do sistema. É importante encontrar um equilíbrio entre esses parâmetros de forma que se obtenha um equipamento eficiente e preciso para a batimetria.

Devido a essa interpretação fica claro que todos esses fatores são importantes para o tamanho do *footprint* (pegada) no fundo. Tal conceito é intrínseco ao entendimento da dinâmica da formação da imagem proveniente do fundo marinho. No caso de ecobatímetros multifeixe, “um *array* (conjunto de elementos) de recepção disposto ortogonalmente em relação ao *array* de projeção recebe sinais refletidos de todos os locais em uma direção semelhante à faixa no fundo do mar” (JUNG; KIM; BYUN, 2017), que é definido por *mills cross*, como ilustrado na figura 12.

**Figura 12** - Esquema de formação de feixes do MBES.



Fonte: RONHOVDE, 1999.

Quanto menor for essa pegada, melhor resolução a imagem gerada pelo equipamento terá. Isso significa que o equipamento pode detectar objetos ou imperfeições no fundo cada vez menores. Entretanto, quando o fundo tem um perfil análogo a uma rampa, conforme esta profundidade vai aumentando, se fosse utilizado o mesmo equipamento (com a mesma frequência) tanto nas áreas mais rasas quanto nas mais profundas, chegaria numa profundidade específica em relação à frequência utilizada onde o sinal refletido pelo fundo ficaria tão fraco que não retornaria ao transdutor. Por isso a frequência deve ser diminuída para que tenha maior alcance (profundidade), perdendo resolução, ou seja, *footprint* maior, menor poder de discernimento de objetos notáveis a grandes profundidades.

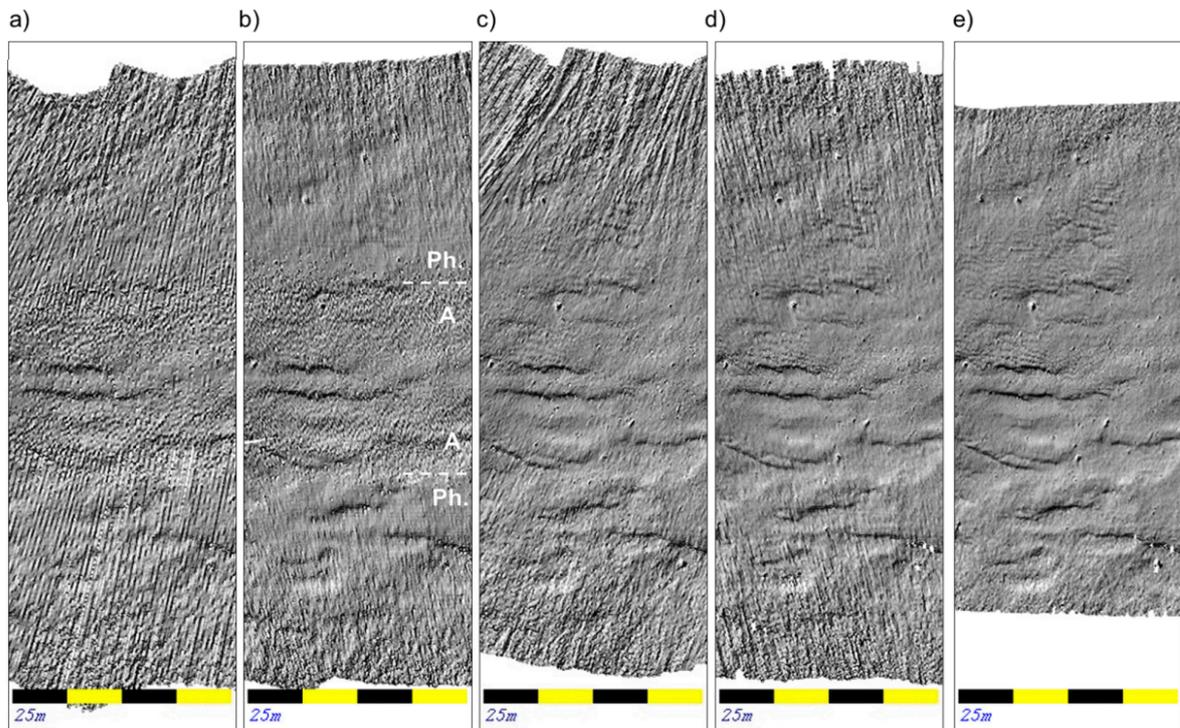
Porém não é só essa relação de sinais que é importante para a prática com ecobatímetros e alcance do sinal, o tipo de sinal influencia, da mesma forma, como a onda sonora se comporta e os resultados que seu reflexo no solo irá gerar. Esses tipos de onda são as ondas contínuas (CW) e frequência modulada (FM).

Sinais FM permitem a emissão de longas larguras de pulso, enquanto mantêm uma resolução de alto alcance. O comprimento de pulso longo permite a medição em largas distâncias, resultando em um aumento na faixa que se pode atingir. Apesar das vantagens adquiridas usando sinais FM, tem sido observado que mudar de CW para FM pode resultar em medidas batimétricas mais ruidosas (MOHAMMADLOO; SNELLEN; SIMONS, 2018).

Para que se entenda a diferença entre essas formas de modulação de sinal é importante que se defina o termo SNR (*Signal-to-Noise Ratio* – Relação Sinal-Ruído) como sendo: a relação entre o sinal desejado e o ruído, que conseguem ser interpretados pelo receptor.

Percebe-se então que quanto maior a SNR, melhor será a interpretação desse sinal. Para ilustrar tal diferença, Clarke (2018b) comparou o resultado gerado por diferentes modulações do sinal transmitido como ilustrado na figura 13.

**Figura 13** – Resultados da mesma área ensonificada por diferentes modulações de sinal. a) pulso FM; b) pulso CW de 600 $\mu$ s; c) pulso CW de 200 $\mu$ s; d) pulso CW de 70 $\mu$ s; e) pulso CW de 50 $\mu$ s.



Fonte: CLARKE, 2018b.

Ao observar a figura 13 acima, mais precisamente a figura 13 (b), percebe-se que é possível diferenciar os sinais que foram resolvidos por amplitude/diferença de fase. Também é possível realizar a análise da rugosidade do terreno a partir do valor SNR que difere conforme a mudança dos pulsos. Conforme o valor dos pulsos CW do sinal transmitido vai diminuindo, nas figuras 13 (b), 13 (c), 13 (d) e 13 (e), pode-se observar que a faixa de interpretação do sinal por amplitude vai ficando mais “larga”. Entretanto ao mesmo tempo em que isto ocorre, o alcance lateral fica prejudicado.

Aqui cabe um adendo que desde o início do desenvolvimento dessa tecnologia de emissão de sinais acústicos, o sinal era CW e com o desenvolvimento de novas técnicas passou a se utilizar amplamente a FM também, pois em algumas situações mostrou-se mais eficiente. Essas opções variam de acordo com o fabricante e se o equipamento possui a opção de escolha alternada entre ambas. Continuando na abordagem deste assunto, segundo Clarke (2018b) “um alongamento do pulso fornece uma área ensonificada maior (assim aumentando a força de retorno do fundo) e, para o caso de um pulso CW, uma largura de banda mais

estreita permitindo uma melhor supressão de ruído”. Porém quando isso ocorre, ocorre também o comprometimento da resolução em alcance, que pode impactar na identificação de feições.

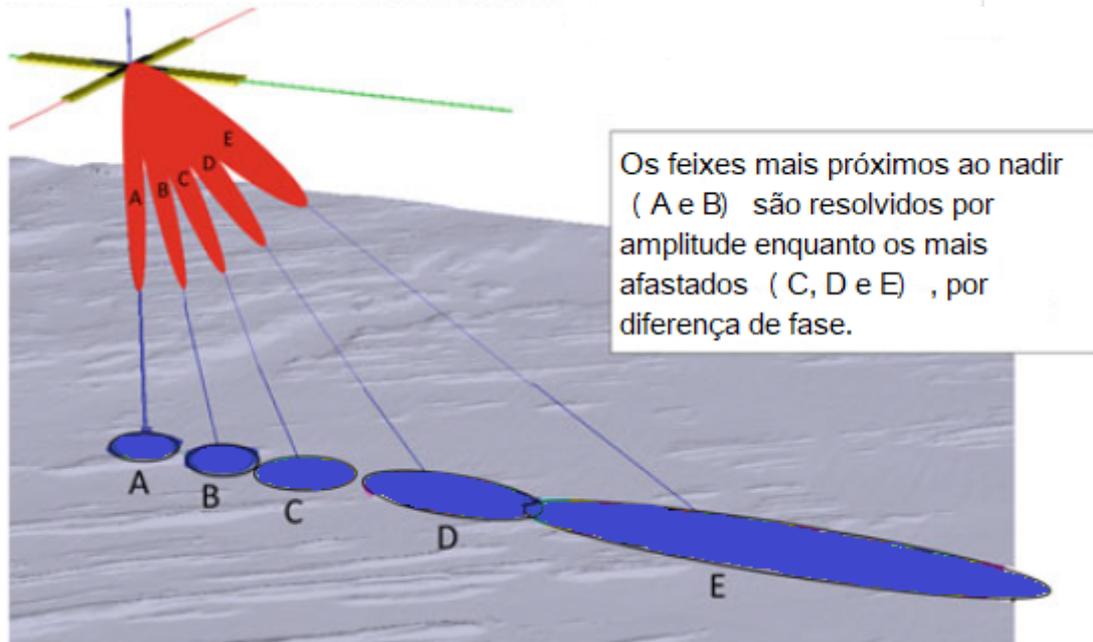
Entretanto não só essa questão da frequência utilizada é pertinente nessa discussão. Outro ponto relevante dos ecobatímetros multifeixe é como os feixes são formados no transdutor e, conseqüentemente, propagados pelo mesmo. Cada elemento do *array* é responsável por emitir (no caso do *array* de transmissão) um feixe sonoro que será recebido por outro elemento do *array* de recepção, conforme já mencionado anteriormente onde os dois são dispostos fisicamente ortogonais. Isso possibilita uma característica que só o ecobatímetro multifeixe possui, o *beamforming* (formação de feixe), “uma técnica usada para enviar sinais ou receber sinais de uma direção específica. Também é chamado de filtragem espacial e é conduzido usando uma matriz de sensores ou através de processamento de sinal” (JUNG; KIM; BYUN, 2017). Esse detalhe, por muito tempo foi um entrave para a construção dos MBES porque para funcionarem da maneira correta, precisavam ser muito grandes em tamanho. Numa escala evolutiva da tecnologia, a técnica de *beamforming* proporcionou a diminuição do tamanho de construção do equipamento, do mesmo modo que melhorou a qualidade do sinal. Ele proporcionou uma significativa melhora no processamento do sinal de cada *footprint*, no caso.

Entretanto o que diferencia a tecnologia multifeixe das demais, além do *beamforming*, é, na maioria das vezes porém não sendo uma regra engessada, a resolução dos feixes centrais por amplitude e dos feixes externos por diferença de fase. Essa diferença entre as formas de resolução dos sinais costuma ser chamada de forma de detecção de fundo.

### **2.3.1 Detecção de Fundo**

A forma como o fundo é resolvido nos MBES é separado em “duas divisões principais: algoritmos de detecção por amplitude e detecção por fase” (OHI, 2005). Esta divisão é uma das principais diferenças entre esse tipo de tecnologia e a que será abordada mais a frente (o sonar interferométrico), pois aqui, há uma combinação de procedimentos que utiliza a melhor forma de detecção de cada tecnologia.

**Figura 14** - Demonstração esquemática do aumento do *footprint* em relação à distância do nadir de um MBES.



Fonte: adaptado de CLARKE, 2018a.

Ainda nesse quesito a detecção por amplitude pode ser subdividida em três métodos e cabe ao usuário definir qual será o método utilizado de acordo com as características do fundo. São eles (OHI, 2005):

- *Leading Edge* (Primeira borda): Este método é comumente usado quando o ângulo de incidência do sinal acústico para o fundo é aproximadamente zero graus. O tempo de detecção do fundo é definido para a primeira chegada dentro do ângulo do feixe;
- *Maximum Amplitude* (Amplitude Máxima): A detecção do fundo é definida no momento da amplitude máxima de retroespalhamento; e
- *Centre of Mass* (Centro de Massa): Este método consiste em determinar o tempo correspondente ao centro de gravidade do sinal de amplitude.

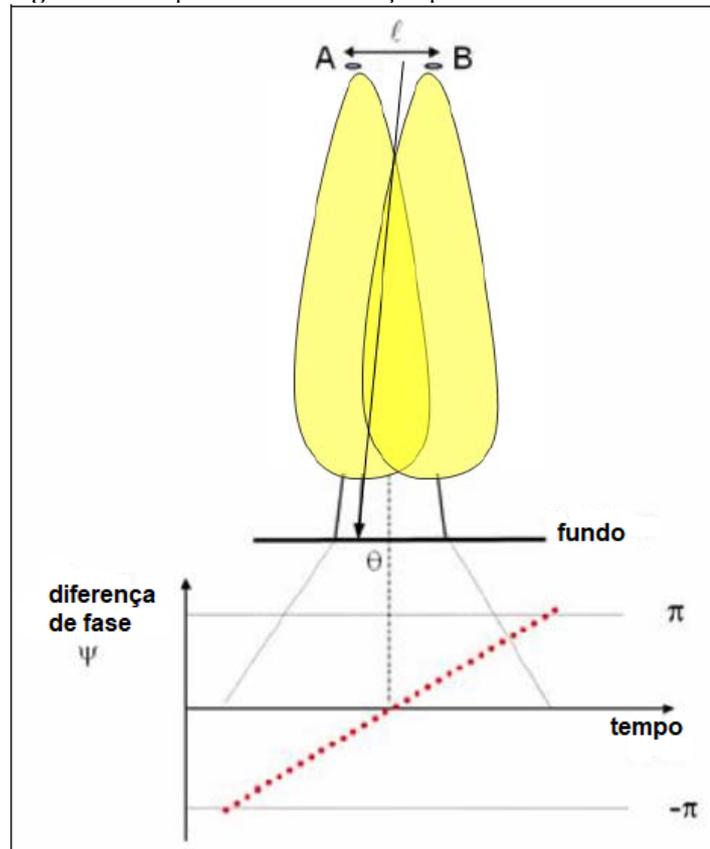
A partir do entendimento destes métodos fica claro que a melhor solução para os feixes incidentes em um fundo prioritariamente plano é a ‘primeira borda’, pois o *footprint* é pequeno o suficiente para garantir uma uniformidade no mesmo. De acordo com o objetivo do levantamento e inclinação do fundo, esta sendo fator determinante no tipo de método a ser utilizado para detecção do fundo, fica a cargo do usuário determinar por qual dos outros dois métodos a detecção por amplitude irá ocorrer. Quando o *footprint* chega num tamanho onde a

identificação por amplitude se torna inexequível, o algoritmo passa a utilizar a detecção por fase, onde:

o transdutor de cada feixe é dividido em duas subdivisões, geralmente sobrepostas, com os centros das subdivisões separados por 'n' comprimentos de onda. As direções angulares são pré-determinadas e cada subdivisão forma um feixe nessa direção (OHI, 2005).

“A sequência de estimativas de diferença de fase é então usada para estimar o tempo de chegada do eco na direção pré-determinada encontrando o cruzamento no zero (*zero crossing*) da sequência de fase” (DE MOUSTIER, 1993, apud OHI, 2005) como ilustra a figura a seguir.

**Figura 15** - Esquema de diferenciação por fase do sinal no MBES.

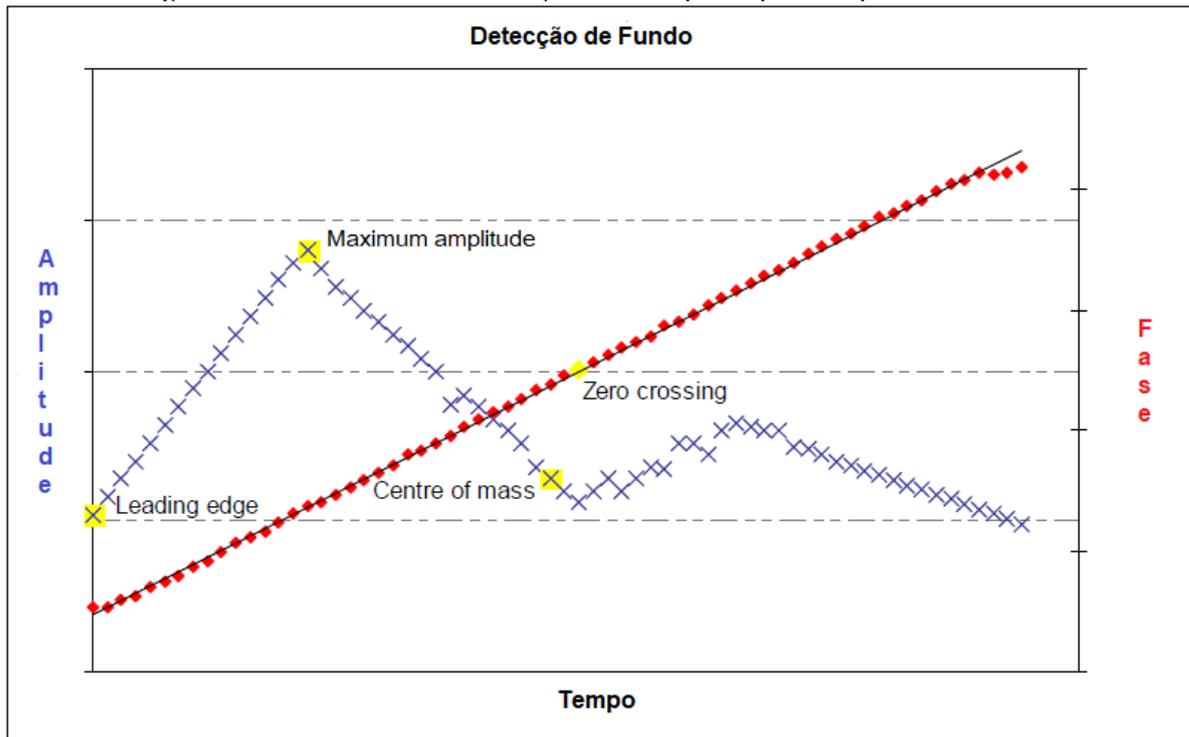


Fonte: adaptado de OHI, 2005.

“O cruzamento no zero é o ponto de escolha para medir a fase e a frequência. A referência é geralmente fácil de ser estabelecida e a taxa de variação da amplitude do sinal é máxima no sinal zero” (WALL, 2003).

A figura abaixo sintetiza os modos de detecção de fundo abordados aqui, tanto os três por amplitude quanto o por diferença de fase do sinal.

**Figura 16** - Gráfico dos modos detecção de fundo por amplitude e por fase no MBES.

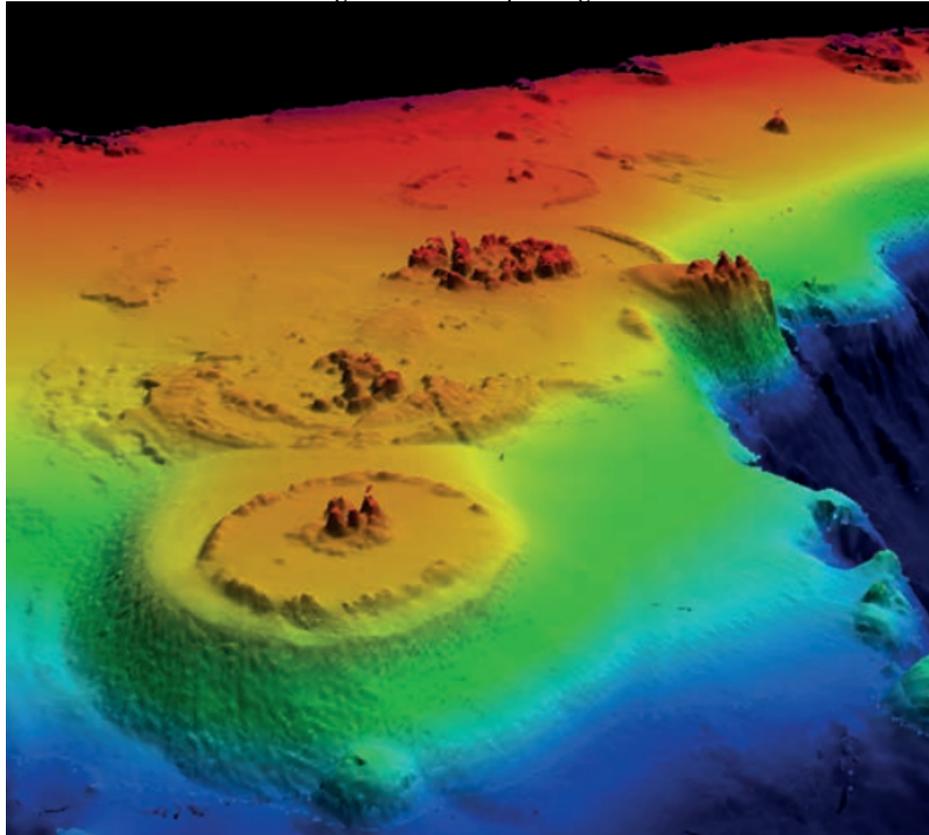


Fonte: adaptado de OHI, 2005.

### 2.3.2 Produtos

Entendido o esquema de transmissão, recepção, formação dos sinais e resultado a partir da reflexão dos mesmos no fundo, pode-se discutir suas possibilidades e principais utilizações. Esse é prioritariamente utilizado pelos serviços hidrográficos espalhados pelo mundo com a finalidade de confecção de CN, sejam elas físicas ou digitais. Como já mencionado, essa informação chega ao serviço hidrográfico através de *grids*, que possuem todo o resultado e 'nós' das profundidades reduzidas de um determinado local com suas respectivas incertezas. Entende-se por nó do *grid* "um ponto, com uma localização geográfica definida e referenciada pela definição e pelo registro da *grid*" (OHI, 2020).

**Figura 17** - Exemplo de *grid*.



Fonte: imagem de João Ventura da Cruz. Disponível em: <https://www.codevintec.it/media/downloadPdf/1805-caris-hydrographicsurvey.pdf>

Porém não só confecção, mas também atualização e manutenção da confiabilidade da sondagem das áreas. Vale ressaltar que devido aos diversos agentes externos e processos de sedimentação a morfologia do fundo pode ser alterada. Daí a importância do constante serviço hidrográfico para a manutenção da correta informação sobre a profundidade de determinada área para aqueles navegantes que porventura utilizarão a mesma. Nesse ramo há a constante preocupação da informação ser a mais acurada possível, para isso, como já mencionado, foi criada e vem sendo atualizada de tempos em tempos, a S-44 pela OHI, de forma a garantir a padronização e qualidade necessárias ao ramo da hidrografia. Tal preocupação deve-se, principalmente, com entradas e saídas de portos onde o fluxo de embarcações é muito alto e os materiais por elas carregados representam, possivelmente, um perigo em caso de colisão/encalhe, além do prejuízo financeiro. Essa é uma ótica do ponto de vista do país que recebe tais embarcações, em garantir a segurança estratégica do seu comércio aquaviário e, para tal, a necessidade de fortalecer seu serviço hidrográfico.

## 2.4 INTERFEROMETRIA

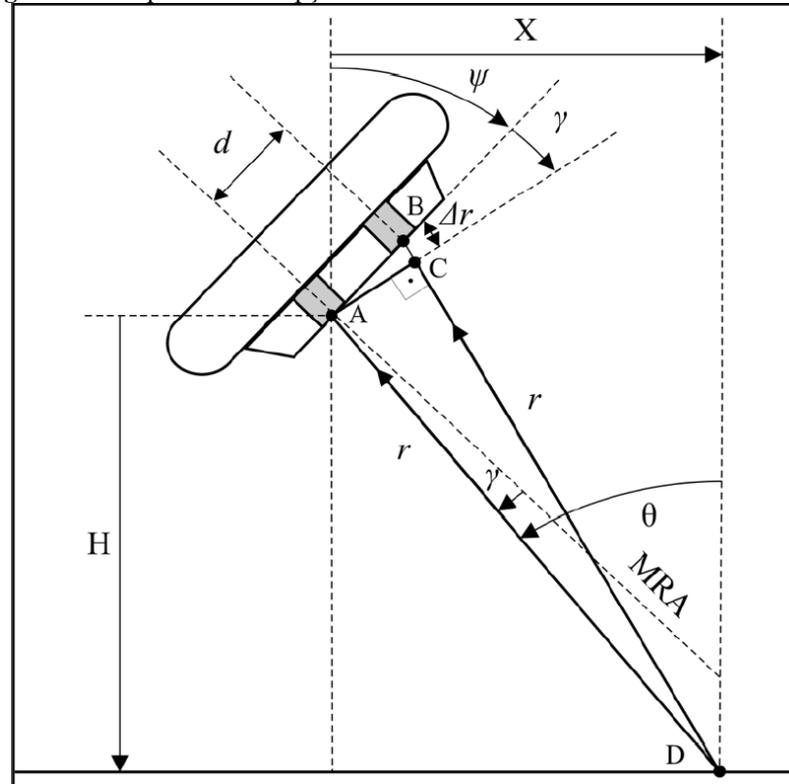
“Interferômetros são dispositivos que permitem medir ou comparar comprimentos de onda com grande precisão utilizando franjas de interferência” (FREITAS, 2011) Define-se por interferometria, no ramo da acústica submarina, quando “o ângulo de elevação de um alvo no fundo do mar é medido a partir da diferença de fase entre os sinais recebidos em dois receptores separados do *array* do sonar” (LURTON, 2000). Antes de continuar a discussão nessa área, cabe salientar que o princípio da interferometria é um fenômeno intrínseco a todos os tipos de onda, sejam eletromagnéticas, gravitacionais ou mecânicas, esta última podendo ser desmembrada em acústica, a qual é o foco deste trabalho. A partir dessa ideia de diferenciação de fase, a interferometria ainda pode ser dividida em três tipos: clássica, diferencial e multifase. Serão explanados a seguir.

### 2.4.1 Interferometria Clássica

É a técnica mais rudimentar e foi a precursora do que existe hoje de mais sofisticado na área. É baseada tanto na geometria simples de recepção do sinal retroespalhado por um ponto no fundo quanto em pares de coordenadas pré-estabelecidas. “A princípio, o elemento transmissor gera um pulso de feixe largo. Depois de ser refletido no fundo, o eco do pulso se propaga de volta para um par de elementos de recepção idênticos” (GRALL; KOCHANSKA; MARSZAL, 2020). Na figura 18 abaixo podem ser observadas essas duas subdivisões do *array* de recepção (pontos A e B) que recebem o sinal de um ponto do fundo (D). Esse sinal obtido é devido à interferência dos sinais combinados nos dois elementos. Aqui assume-se que  $r \gg d$ , onde  $r$  é a distância entre o ponto A do transdutor e o ponto D, e “a distância entre os elementos de recepção  $d$  é fixa e geralmente igual a vários comprimentos de onda” (GRALL; KOCHANSKA; MARSZAL, 2020). A consideração acima permite que sejam feitos os cálculos necessários. Através de geometria, no triângulo ABC, onde  $\Delta r$  é a pequena diferença (vetor) entre os dois retornos (em A e B) e  $\gamma$ , sendo este o ângulo em relação ao MRA (*Maximum Response Axis* – eixo de resposta máxima), que é ortogonal ao elemento de recepção, a primeira equação relevante fica:

$$d \sin(\gamma) = \Delta r \quad (2)$$

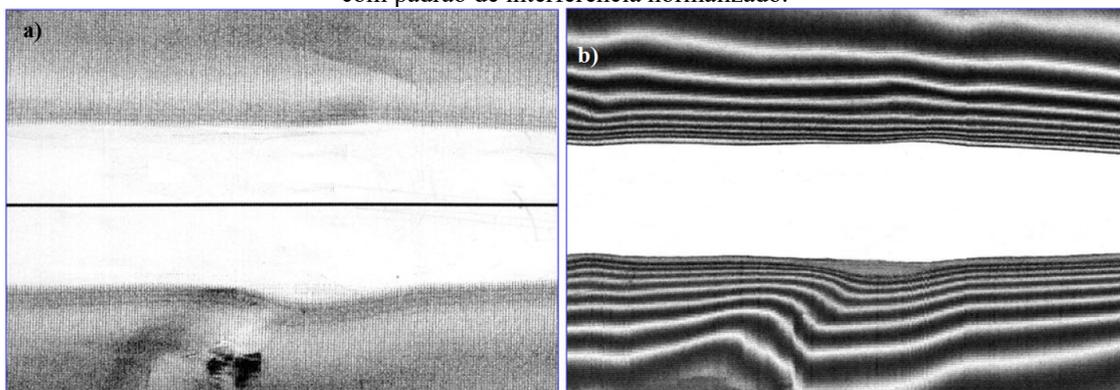
Figura 18 - Esquema de recepção de sinal utilizando a interferometria clássica.



Fonte: GRALL; KOCHANSKA; MARSZAL, 2020.

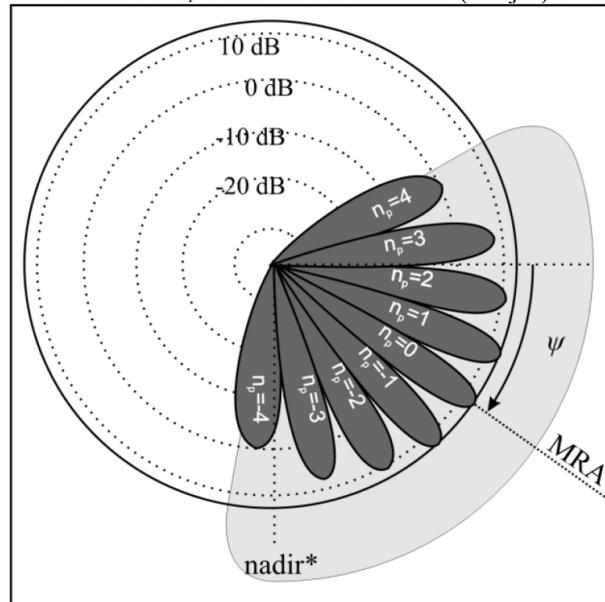
A partir desta fórmula, é criado um par de coordenadas estabelecendo um valor de ‘ $n_p$ ’ inteiro para cada valor de ‘ $\gamma_{n_p}$ ’ relativo ao retorno de cada máximo dos lóbulos de recepção (figuras 19 e 20).

Figura 19 – a) Figura referente à imagem de *sidescan*; b) Figura referente à mesma imagem de *sidescan*, porém com padrão de interferência normalizado.



Fonte: Adaptado de CLARKE, 2013.

**Figura 20** – Valores de ‘ $n_p$ ’ relativos aos máximos (franjas) de cada lóbulo.



Fonte: GRALL; KOCHANSKA; MARSZAL, 2020.

Da figura 19 (b) é possível perceber os máximos e mínimos referentes às interferências destrutivas e construtivas. Onde as linhas apresentam-se brancas a interferência é destrutiva e em preto, construtivas.

Por conseguinte, A e B são separados fisicamente por um múltiplo do comprimento de onda do sinal ( $\lambda$ ). Com isso, tem-se:

$$d \sin(\gamma_{n_p}) = n_p \lambda \quad (3)$$

Essas coordenadas estabelecem uma relação entre os ângulos de chegada  $\gamma$  dos máximos no receptor do *array* e as distâncias  $r$  relacionadas, e por semelhanças de triângulos, tem-se H para profundidade e X para afastamento horizontal da embarcação:

$$X = r \sin \theta = r \sin(\psi + \gamma) \quad (4)$$

$$H = r \cos \theta = r \cos(\psi + \gamma) \quad (5)$$

Acima, substituindo o  $\gamma$  e  $r$  conhecidos devido aos pares estabelecidos, e levando em consideração o também conhecido ângulo de construção do *array* ( $\Psi$ ), acha-se a profundidade  $H$  e a distância  $X$  para a embarcação para cada ponto no fundo em relação ao ângulo de chegada ( $\theta$ ).

Por um lado essa técnica pode ser boa pela simplicidade na operação e relativamente baixo custo, porém a “principal desvantagem do ecobatímetro interferométrico é sua vulnerabilidade a interferências de sinais vindos de outras direções que não o fundo do mar. A interferometria clássica, por princípio, só pode determinar uma direção de chegada por vez” (GRALL; KOCHANSKA; MARSZAL, 2020). Além do “fato de que a interferometria clássica requer o pós-processamento manual e demorado dos interferogramas para encontrar os máximos e atribuir um número e intervalo para cada faixa de imagem” (GRALL; KOCHANSKA; MARSZAL, 2020). Isso fez com que fossem desenvolvidas novas técnicas que aperfeiçoassem esse esquema, surgindo assim a interferometria diferencial, a qual já é amplamente utilizada.

#### 2.4.2 Interferometria Diferencial

Aqui, devido à evolução da capacidade de processamento dos sinais, não só os máximos dos lóbulos são consideradas, mas sim o valor da diferença de fase em qualquer instante da recepção do sinal. Aqui cabe ressaltar que essas máximas calculadas anteriormente com os valores de ‘ $n_p$ ’ correspondem à fase fracionária zero, por isso foi adotado antes um múltiplo inteiro de diferença de comprimentos de onda.

Devido à essa possibilidade de aumento da faixa considerável para a diferença de fase, um valor ‘ $k$ ’ referente ao de número de onda pode ser acrescentado à equação (2), além de ser estabelecido um limite de diferença de fase para o sinal, pois esta diferença deve estar dentro do intervalo de  $2\pi [-\pi, +\pi]$ .

Com essa técnica, o número de possibilidades de respostas provenientes do fundo aumentou vertiginosamente, porém com esse aumento, cresceu também a ambiguidade, pois agora o intervalo de possíveis ângulos de chegada ficou muito maior. Isso significa que o que antes era controlado, pelo número limitado de pares (‘ $n_p$ ’, ‘ $\gamma_{n_p}$ ’), agora pode ser mensurado considerando uma faixa mais ampla de resultados, o que também aumenta a incerteza destes.

Por essa perspectiva, antes de analisar os resultados pura e simplesmente encontrando o X e H das fórmulas (4) e (5), que ainda fazem-se presentes aqui, é necessário que se veja primeiro como se determina a diferença de fase, que ainda utilizando a figura 18 e a equação (2), fica (adaptado de LURTON, 2000, apud HALMAI *et al.*, 2020):

$$\Delta\varphi_{AB} = k\Delta r = kd\sin\gamma = 2\pi\frac{d}{\lambda}\sin\gamma, \quad (6)$$

Onde ( $k = 2\pi/\lambda$ ) é o número de onda. Após se obter os possíveis valores de diferença de fase, calcula-se ‘ $\theta$ ’ para ‘ $n$ ’ possíveis ângulos de incidência, agora não sendo mais o limitador, como era na interferometria clássica, o que aqui é feito pelo intervalo de  $2\pi$ , (adaptado de LURTON, 2000, apud HALMAI *et al.*, 2020):

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta\varphi_{AB} + 2\pi\cdot n}{kd}\right) + \Psi \quad (7)$$

Onde ‘ $\Delta\varphi_{AB}$ ’ é a diferença de fase entre os pontos A e B; ‘ $n$ ’  $\in Z$  ( $n = \dots-2,-1,0,1,2\dots$ ). “isso introduz uma séria incerteza em nossos cálculos: para o mesmo valor ‘ $\Delta\varphi_{AB}$ ’ podemos obter vários ângulos ‘ $\theta$ ’, e as soluções errôneas devem ser filtradas pelo sistema eletrônico interno do sonar em consideração aos pontos vizinhos na faixa dada” (HALMAI *et al.*, 2020). Aqui, segundo Grall, Kochanska e Marszal (2020) “quando ‘ $d \leq \lambda/2$ ’ o ângulo de incidência é calculado sem ambiguidade” porém essa estruturação é mais propensa a ruídos.

Outro ponto relevante é a incerteza envolvida na consideração do ângulo de chegada ‘ $\theta$ ’ do sinal. Segundo Lurton (2000) esta pode ser obtida pela diferenciação da equação (6), substituindo ‘ $\gamma$ ’ por ‘ $\theta - \Psi$ ’, tem-se:

$$\delta\theta = \frac{\delta\Delta\varphi_{AB}}{2\pi} \frac{\lambda}{d} \frac{1}{\cos(\theta - \psi)} \quad (8)$$

Daqui pode-se inferir que a precisão da medição do ângulo de incidência é proporcional à precisão da diferença de fase e, ainda, estabelecer uma relação entre ‘ $d$ ’, que é o distanciamento entre as subdivisões do *array*, e o comprimento de onda ‘ $\lambda$ ’ onde quanto maior o primeiro em relação ao segundo, melhor a precisão de ‘ $\theta$ ’. Bem como quanto maior ‘ $\theta$ ’, ou seja, retornos de ângulos de incidência mais afastados do nadir, melhor a precisão, da mesma forma.

Após essa avaliação, a propagação do erro em ‘ $\theta$ ’ leva a uma propagação de erro na profundidade também, expressa por (LURTON, 2000):

$$\frac{\delta z}{z} = \tan \theta \delta \theta = \frac{\delta \Delta \varphi_{AB}}{2\pi} \frac{\lambda}{d} \frac{\tan \theta}{\cos(\theta - \psi)} \quad (9)$$

Onde ‘z’ é o eixo da profundidade orientado para baixo, ou seja, positivo para baixo. Aqui percebe-se que quando o ângulo de incidência ‘θ’ é no nadir, o valor é zerado (‘tan θ’ = 0). Porém quando vai se afastando há uma compensação entre numerador/denominador do último termo da equação (9).

Entretanto, mesmo quantificadas as incertezas, ainda existem alguns problemas na interferometria: o *multipath* (multicaminhamento), um fenômeno no qual o sinal é afetado por múltiplos caminhos ou trajetos antes de chegar ao detector; e a ambiguidade de resultados, a qual ocorre quando a diferença de fase entre os feixes interferentes é repetida e isto impossibilita o reconhecimento exato de qual ângulo de retorno aquela diferença de fase se trata.

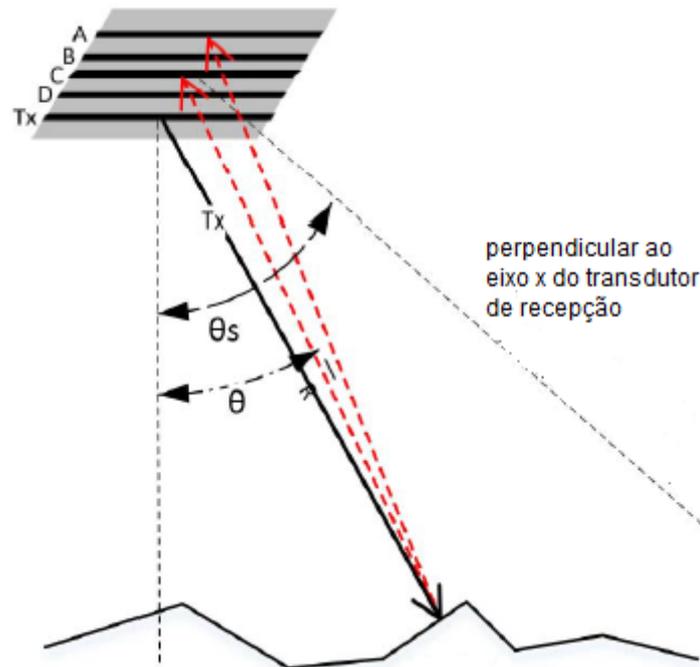
Para mitigar os efeitos da ambiguidade de resultados, surge então a interferometria multifase.

### 2.4.3 Interferometria Multifase

Esta técnica é amplamente utilizada por equipamentos específicos que podem possuir diversos nomes como MSBS (*Multi-angle Swath Bathymetric Sidescan* – Varredura Batimétrica Lateral em Multi-Ângulos), PDBS (*Phase Differencing Bathymetric Sonar* – Sonar Batimétrico de Diferenciação de Fase), MPES (*Multi Phase Echo Sounder* – Ecobatímetro de fase múltipla), entre outros, porém utilizam a mesma tecnologia de diferenciação de fase e portanto cabem na explicação a seguir sobre seu modo de funcionamento.

Estes surgiram de forma a mitigar o problema do *multipath* e das ambiguidades relativas a mesma diferença de fase provenientes de sinais diferentes. Para tal, estes “sistemas usam ambas as informações de amplitude e fase de um pequeno *array* para resolver diretamente as direções e amplitudes do retroespalhamento” (KREUTNER, 2002) através de um *array* de N elementos capazes de receber o *backscatter* do mesmo ponto no fundo por diferentes ângulos de recepção, resolvendo a ambiguidade então.

**Figura 21** - Disposição vertical do *array* de recepção na interferometria multifase com 4 (quatro) elementos de recepção.



Fonte: adaptado de SEWADA *et al.*, 2018.

Pela figura entende-se que essa técnica utiliza a base da interferometria diferencial, com os mesmos princípios e cálculos, entretanto aqui a disposição de  $N$  elementos transdutores verticalmente espaçados e com distância conhecida proporcionam diversas combinações de ‘ $d$ ’ (distância entre pontos do transdutor que irão resolver o mesmo ponto do fundo). “Isso foi chamado de técnica Vernier, e continua em uso na maioria dos sistemas interferométricos, mas com menor separação no *array* e aumento do número de pares” (SEWADA *et al.*, 2018). A técnica de Vernier é um método de medição de alta precisão que envolve a medida através de uma fonte principal e outra(s) auxiliar(es), permitindo a obtenção de valores mais precisos por meio da interpolação das medições das duas fontes.

Com isso, o número de soluções para pontos com mesma distância ou mesmo ângulo de recepção é aumentado, através da utilização de algoritmos internos capazes de interpolar os diversos retornos, tanto do fundo quanto de partículas em suspensão e criar inúmeras possíveis soluções.

Em comparação com o ecobatímetro multifeixe, teoricamente, “enquanto o MBES geralmente produz 200–400 feixes (pontos de medição) por *ping*, o IES (*Interferometric Editing System* – Sistema de edição interferométrico) geralmente produz 8.000–10.000 pontos de medição por *ping*” (GRALL; KOCHANSKA; MARSZAL, 2020), já contando os dois lados do sensor justamente por levar em consideração as medições provenientes da grande

quantidade de resultados obtidos no intervalo considerado. Entretanto, devido à grande quantidade de pontos, existe uma incerteza associada ao valor vertical da profundidade em cada coordenada. Tal limitação é atenuada pela filtragem dos dados com algoritmos internos dos próprios equipamentos ou no pós-processamento, pelo próprio usuário final.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os equipamentos com os quais os dados estudados foram obtidos e os *softwares* de edição e avaliação de estatísticas. Vale ressaltar que devido à novidade da tecnologia, no Brasil, poucos equipamentos estão disponíveis. Por isso, a dificuldade em achar dados de qualidade fez com que essa pesquisa utilizasse dados obtidos por terceiros para avaliação dos padrões de desvios e incertezas, bem como suas resoluções e qualidade do imageamento simultâneo. Tais dados foram adquiridos e já pré-filtrados pelos *softwares* característicos de cada fabricante antes de serem disponibilizados. O “processamento dos dados, no caso do PDBS, é realizado com aplicação de filtros sequenciais de intensidade do sinal, estatísticos e de distâncias” (PIMENTEL, 2023). Caso contrário não seria possível trabalhar com os mesmos, pois precisam desse passo para que seja possível a conversão por outros programas, denominados de *third-party softwares* (programas de terceiros). Dados interferométricos, por possuírem a característica carregarem mais informação do que aqueles provenientes de ecobatímetros mono e multifeixes, além de representarem múltiplos retornos do fundo, que precisam ser filtrados de acordo com o esquema de criação dos feixes e/ou construção dos transdutores. Cada fabricante tem seu modo de construir física e virtualmente os feixes, portanto os *softwares* específicos deles já possuem um determinado padrão de filtragem em relação aos dados espúrios ou falsos. Para os dados do 6205s2 foi utilizado o *software Discover* enquanto para os dados do 3DSS um *software* também patenteado e exclusivo da empresa Ping DSP.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 EdgeTech 6205s2

É descrito pelo fabricante como sendo MPES, um “sistema de faixa larga de batimetria e sonar de varredura lateral de dupla frequência que produz em tempo real, imagens de varredura lateral de alta resolução e mapas tridimensionais do fundo do mar” (EDGETECH,

2022). Este utiliza “múltiplos *arrays* de recepção e combina a formação de feixes (*beamforming*) e técnicas de diferenciação de fase para determinar cada sondagem ao longo do fundo do mar” (EDGETECH, 2022). Ou seja, dessa forma permite que seja utilizada, mesmo que em menor escala, a tecnologia de formação de feixes característica dos MBES perto do nadir e, em larga escala, a interferometria através da resolução do sinal de acordo com os ângulos de incidência. A figura 22 e a tabela 3 a seguir ilustram o equipamento em si e suas configurações, além de destacar o que foi utilizado para a obtenção dos dados estudados.

**Figura 22** - EdgeTech 6205s2.



Fonte: EDGETECH, 2022.

**Tabela 3** - Especificações do EdgeTech 6205s2 – destaque para as configurações utilizadas para obtenção dos dados.

BATIMETRIA			
Frequência	520 kHz	850 kHz	
Largura do feixe *	1° x 0.5°	1° x 0.4°	
Profundidade Ótima de Operação **	< 50 m	< 25 m	
Máximo Alcance Lateral ***	200 m	75 m	
Largura Máxima do Setor	200°		
Máximos Pontos por Ping	800		
Padrão do Som	Equidistante e sob o mesmo ângulo		
IMAGEAMENTO LATERAL			
Frequência	520 kHz	850 kHz	1600 kHz
Largura do Feixe Horizontal (2 vias)	0.36°	0.29°	0.20°
Resolução em Distância	10 mm	9 mm	6 mm
Distância Máxima **	150 m	75 m	35 m
SISTEMA			
Modulação do Pulso	CW & FM CHIRP		
Taxa de Ping (Dependente da Distância)	Até 60 Hz		

\* Resolução horizontal expressa como largura de feixe no nadir  
 \*\* Dependente de condições ambientais (absorção, reverberação, interferência marinha etc.)  
 \*\*\* Assumindo-se um fundo liso e dependendo de condições ambientais

Fonte: adaptado de EDGETECH, 2022.

### 3.1.2 Ping DSP 3DSS

É um equipamento que, segundo o fabricante (PingDSP, 2020), utiliza uma “metodologia de processamento de sinal patenteada que estende o princípio de ângulo de chegada único usado em sistemas interferométricos para acomodar múltiplas chegadas simultâneas de retroespalhamento (*backscatter*)”, ou seja, diminui o problema do *layover*, definido por Pimentel, Florentino e Neto (2020) como um efeito que “ocorre quando dois diferentes ecos chegam ao mesmo tempo no transdutor”. Este efeito ocorre principalmente quando “o feixe do sonar atinge o topo de uma estrutura alta antes de atingir a base dela” (PIMENTEL; FLORENTINO; NETO, 2020)

A tecnologia patenteada é chamada de CAATI (*Computed Angle-of-Arrival Transient Imaging* – Imageamento Transitório do Ângulo de Chegada Computado) e consiste no aproveitamento das “matrizes de transdutores multicanais desenvolvidos internamente, juntamente com metodologias proprietárias de processamento de sinal” (Ping DSP, 2018) de forma a melhorar o pós-processamento dos dados e permitir sua correta visualização e análise.

Pode ser utilizado tanto para batimetria quanto para imageamento do fundo, como será ilustrado mais a frente. A figura 23 e a tabela 4 apresentam o equipamento e suas especificações técnicas.

**Figura 23** - Ping DSP 3DSS.



Fonte: PING DSP, 2018.

**Tabela 4 - Especificações do Ping DSP 3DSS.**

ESPECIFICAÇÕES DO SONAR			
Frequência de Operação	450 kHz	Inclinação Mecânica do Transdutor (Fixo)	20°
Formas de Transmissão de Ondas	CW, Banda Larga	Inclinação Eletrônica da Transmissão	-45° to 45°
Comprimento de Pulsos	10 – 200 Ciclos	Taxa Máxima de repetição de Pings	~45 Hz
Largura do Pulso Horizontal (2 vias)	0,4°	Largura do Pulso Vertical (Selecionável)	19° - 125°
ESPECIFICAÇÃO DO IMAGEAMENTO 2D			
Dados de Saida	Alcance e Amplitude		
Largura da Faixa do Imageamento 2D	10 a 20 vezes a altitude do sonar, variando com o perfil de velocidade do som, geometria e tipo de fundo		
Alcance Máximo	200 m por lado		
Máxima Resolução em Alcance	1.67 cm		
ESPECIFICAÇÃO DO IMAGEAMENTO 3D			
Dados de Saida	Alcance, Ângulo e Amplitude		
Largura da Faixa do Imageamento 3D	8 a 14 vezes a altitude do sonar, variando com o perfil do som, geometria e tipo de fundo		
Alcance Máximo do Imageamento 3D	100m por lado		
Resolução Máxima	1.67 cm		
ESPECIFICAÇÃO DA BATIMETRIA			
Dados de Saida	Alcance do Som, Ângulo e Amplitude		
Largura da Faixa da Batimetria	8 a 16 vezes a altitude do sonar, variando com o perfil do som, geometria e tipo de fundo		
Alcance Máximo da Batimetria	100m por lado		
Profundidade Mínima da Sondagem	0.7m		
Profundidade Máxima da Sondagem	75m (Largura de Faixa Reduzida)		
Acurácia da Sondagem	Excede ordem especial da OHI, atende ou excede a norma holandesa 1A e ordem exclusiva canadense		
Modos de Configuração Multifeixe	Largura de Feixe(0.25°-5°), Setor (90°-220°), Feixes (3-1024), Modos (Equidistância, Equiângulo e Híbrido)		

Fonte: adaptado de Ping DSP, 2020.

### 3.1.3 Caris Hips and Sips

É um *software* que, segundo o fabricante, “oferece recursos essenciais e ferramentas de nível profissional para processamento de dados hidrográficos” (TELEDYNE, 2020). Ele suporta diversos formatos de arquivo gerados pelos inúmeros equipamentos de sondagem disponíveis no mercado internacional. Na tabela abaixo podem ser identificados os tipos de dados de entrada que o programa aceita que, por si só, ratifica seu multipropósito.

**Tabela 5 - Métodos de entrada no Caris Hips and Sips.**

ENTRADAS	
Equipamentos Suportados	Ecobatímetros Mono e Multifeixes, Sonar de Varredura Lateral e de Abertura Sintética, LIDAR, Interferométricos
Formatos de Entrada	Atlas SDA/ASD/ACF, Bathyswath SXI/SXP/SXR, ChirpScan 3D BRF, CMAX CMX/CM2, Coda, Edgetech Midas/JSF/EGG260, Eiva SBD, Elac XSE, Furuno, GeoAcoustics RDF/RFF, GSF, Hypack RAW/HSX/HS2, Imagenex D1P/83P/83M, Klein, Kongsberg KMALL/ALL/OUT/RAW/DEPTH, Kraken TIL, LADS CAF, MarineSonics MST, ProSAS IMG, QMIPS DAT, Seabeam, SEGY Singlebeam, SHOALS OUT/HOF/TOF, SPAWAR DAT, Teledyne TDY, Teledyne Reson S7K/PDS, Winfrog RAW, XTF
Suporte para Sistemas de Aquisição	Eiva, Hypack, SIS, QPS, PDS2000, Sistemas Nativos dos Sonares

Fonte: adaptado de TELEDYNE, 2020.

Sua vantagem é a integração dos dados gerados por todos os periféricos componentes de um LH e a possibilidade de editar cada um deles a critério do usuário, permitindo a eliminação, correção ou somente avaliação de possíveis erros que porventura tenham sido

cometidos em campo. É uma das ferramentas utilizada pela Marinha do Brasil, autoridade na área, para pós-processamento dos dados batimétricos e construção de *grids* que posteriormente se tornarão documentos náuticos. O programa foi utilizado no intuito de visualização, edição e avaliação das profundidades.

Outro ponto relevante do *software* é a possibilidade de cálculo das incertezas *a priori* envolvidas em todo o processo do LH através de algoritmos próprios que já qualificam o trabalho e permitem que seja avaliado o nível de confiança das profundidades. Da mesma forma, o programa disponibiliza alguns métodos de geração dos *grids*, que são de extrema importância na hora de visualizar/utilizar os dados, pois cada método possui uma forma diferente de amostrar os dados de profundidade, de acordo com o determinado/esperado pelo usuário. Como exemplo, cabe citar um dos métodos mais utilizados pelo serviço hidrográfico brasileiro, o CUBE (*Combined Uncertainty and Bathymetric Estimator* – Estimador Combinado de Incerteza e Batimetria).

Este “faz uso da elevação e da incerteza total propagada (TPU) para cada profundidade considerada, a fim de calcular uma ou várias hipóteses na área de interesse” (OHI, 2020). Após esse cálculo, “as hipóteses resultantes são usadas para estimar estatisticamente a profundidade mais representativa em cada posição nodal” (OHI, 2020). Aqui o algoritmo escolhe qual a profundidade que será considerada em relação ao cálculo previamente realizado de todas as incertezas. Este método é importante para a verificação da confiabilidade total do LH, por exemplo.

### 3.1.4 SonarWiz

É um programa especializado em visualização e edição de imagens obtidas através de sonares de varredura lateral e/ou outros dispositivos que entreguem o mesmo produto (ex.: sonares interferométricos). Ele “opera com quase todos os fabricantes de sonar” (CHESAPEAKE TECHNOLOGY, 2023) e, da mesma forma, “faz interface com quase todas as marcas de sonar de varredura lateral disponíveis comercialmente, perfiladores de subfundo, magnetômetros, ecobatímetros e interferômetros batimétricos” (CHESAPEAKE TECHNOLOGY, 2023), ou seja, não fica limitado a imagens apenas, também trabalha com profundidades e ondas sísmicas, entretanto no trabalho em questão foi utilizado somente

como visualizador e editor de imagens adquiridas pelos equipamentos já descritos anteriormente.

Uma das ferramentas utilizadas do programa foi a correção de *slant range* (distância inclinada) onde “após o processamento dos dados, a zona cega no centro da imagem ‘desaparece’, e cada *datum* é realocado para uma posição mais representativa do fundo do mar real” (CHANG; HSU; TSAI, 2010), levando em consideração que a palavra ‘desaparecer’ foi utilizada no sentido de ‘redistribuição’, com isso tem-se as posições horizontais da imagem melhor correlacionadas com o fundo do mar, além da amenização da falta de dados do nadir.

Outra ferramenta importante do programa é o ajuste automático de TVG (*Time Variable Gain* – Ganho em Tempo Variável) e se faz necessária pela diferença da intensidade do retorno entre os pontos mais perto e mais longe do transdutor do sonar. A “função Auto TVG opera dividindo os dados em muitas faixas paralelas, tentando equalizar o retroespalhamento de cada faixa” (CHESAPEAKE TECHNOLOGY, 2019), com isso permitindo uma melhor visualização das imagens.

Por último foi utilizada a ferramenta de “mosaicagem”, que nada mais é do que a junção das imagens adquiridas pelos equipamentos, para que ficassem dispostas de modo georreferenciado e permitissem uma visualização completa da área.

## 3.2 MÉTODOS

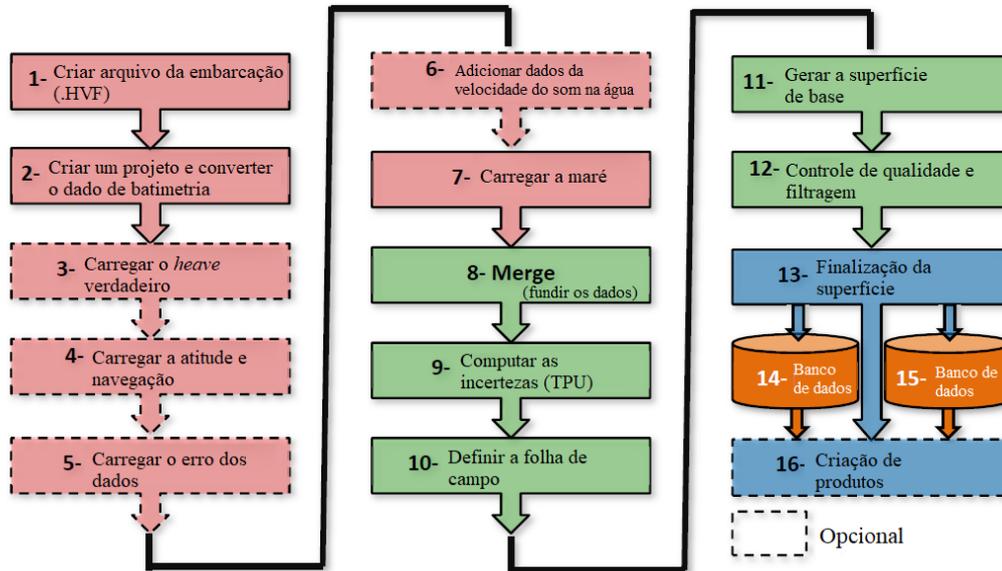
### 3.2.1 Batimetria

Para análise dos dados de batimetria foi utilizado o *software* Caris Hips 10.4 da Teledyne Geospatial, que além de ser uma ótima ferramenta para tal tipo de atividade, já foi ou continua sendo utilizada por alguns serviços hidrográficos ao redor do mundo, como os USACE (*United States Army Corps of Engineers* – Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos), que realizam serviços hidrográficos em algumas áreas dos EUA, pelo CHS (*Canadian Hydrographic Service* – Serviço Hidrográfico Canadense) (CHS, 2012) e também pelo Serviço Hidrográfico Brasileiro.

Os dados foram analisados de forma separada, pois além de serem de diferentes equipamentos, foram coletados em diferentes áreas. Entretanto aqui será explicado o que foi feito para ambos os dados, pois a execução foi a mesma, e após, será discutido o que foi possível observar separadamente de ambos.

Primeiramente para uma correta disposição dos dados, o programa exige que seja cumprido um fluxograma até que seja gerado o resultado final do processamento, ou seja, esse passo a passo deve ser executado para que o programa consiga responder da forma desejada.

**Figura 24** - Fluxograma de trabalho no Caris Hips.



Portanto o primeiro passo feito no programa foi a criação da embarcação de acordo com os *offsets* (compensações) enviados juntamente com os dados. As embarcações aqui foram criadas de forma figurativa visto que os valores importantes são as distâncias entre sensores, as quais foram inseridas no momento da aquisição. Cabe ressaltar que sem esses valores seria impossível mensurar as incertezas *a priori* envolvidas no processo, pois o cálculo destas está intrinsecamente relacionado com as distâncias entre esses sensores componentes da embarcação de sondagem. Tanto para os dados do 6205s2 e do 3DSS foram “montadas” as embarcações dispostas nas figuras seguir, utilizando a ferramenta “*Vessel Editor*” (Editor de Embarcação) onde devem ser colocados quais equipamentos foram utilizados para aquisição dos dados batimétricos (caso o Caris já reconheça o equipamento), o número de feixes, o tipo de tecnologia empregada (multifeixe, monofeixe, varredura lateral etc.), ponto de referência e principalmente as distâncias entre o transdutor os sensores de navegação e IMU (*Inertial Measurement Unit* – Unidade de Medição Inercial). Por convenção



consideravelmente. Também é importante mencionar que no caso da sondagem realizada com o 6205s2, os dados relativos ao posicionamento foram adquiridos já utilizando a IMU como referência na aquisição, por este motivo, na figura 25 não está disposto o esquema de antenas, entretanto o valor relativo à distância destas à IMU foi inserido na aba “TPU values” (valores de TPU) onde o programa os utiliza para calcular as incertezas de acordo com a distância entre os sensores. Da mesma forma foram inseridos os desvios-padrão de todos os componentes do sistema, de acordo com o manual dos fabricantes. Para a sondagem com o 6205s2 foi utilizado o SGB Ekinox-D; e para o 3DSS o SBG Ellipse2, ambos para medição de posicionamento e atitude. A acurácia de ambos os sensores segue nas tabelas 6 e 7 e foram inseridas nas embarcações do programa.

**Tabela 6** - Valores de acurácia do SBG Ekinox D utilizado em conjunto com o 6205s2.

### 3D ORIENTATION

<b>Roll, Pitch</b>	0.02°	GNSS aiding
	0.015°	RTK aiding
	0.01°	Post-Processing
<b>Heading</b>	0.03°	Dual Antenna GNSS (baseline > 2 m)
	0.02°	Dual Antenna GNSS (baseline > 4 m)
	0.02°	Post-Processing

### POSITION

<b>Single Point L1/L2</b>	1.2 m	
<b>SBAS</b>	0.6 m	
<b>DGPS</b>	0.4 m	
<b>RTK</b>	0.01 m + 0.5 ppm	
<b>RTK 30s Outage</b>	3 m	Marine conditions
<b>RTK 60s Outage</b>	0.2% TD	Marine conditions, DVL* aided
	3 m	Automotive mode - With odometer
<b>PPK**</b>	0.01 m + 0.5 ppm	

### HEAVE

<b>Real-time</b>	5 cm or 5%	Whichever is greater, velocity aided
<b>Wave period</b>	0 to 20 s	Auto-adjusting
<b>Delayed</b>	2 cm or 2.5%	Whichever is greater, velocity aided
<b>Wave period</b>	0 to 40 s	

Fonte: SBG SYSTEMS, 2022.

**Tabela 7** - Valores de acurácia do SBG Ellipse2-E utilizado em conjunto com o 3DSS.  
**ACCURACY (RMS)** 360° sensing in all axes, no mounting limitation

Model	A	E <sup>(1)</sup> / N / D
Roll / Pitch	0.1°	0.1° SP 0.05° RTK 0.03° PPK <sup>(4)</sup>
Heading	0.8° Magnetic <sup>(2)</sup>	0.2° Dual antenna 2m 0.2° Single antenna with dynamics 0.1° PPK <sup>(4)</sup>
Velocity <sup>(3)</sup>	-	0.03 m/s
Navigation <sup>(3)</sup>	-	1.2 m Single Point 1 m SBAS 1 cm RTK / PPK <sup>(3)</sup> + 1 ppm
Heave accuracy	5 cm or 5% - Valid for Marine version	
Heave period	Up to 15 s - Automatically adjusts to the wave period	

<sup>(1)</sup> With Supported GNSS receiver

<sup>(3)</sup> Under good GNSS availability

<sup>(2)</sup> Under homogenous magnetic field

<sup>(4)</sup> Optional PPK = Post-processing Kinematic

Fonte: SBG SYSTEMS, 2021.

Ainda nesta etapa de construção do modelo da embarcação é importante dizer quais sensores serão considerados para todos os cálculos relativos às incertezas e em ambos os casos foram utilizados um transdutor, navegação, *heave*, *pitch*, *roll*, SVP (*Sound Velocity Profiler* – Perfilador da Velocidade do Som) e linha d'água. Estes sensores devem ser marcados para posterior consideração no decorrer do processamento. É igualmente importante que a data relativa à embarcação seja anterior ao dia da sondagem para que o programa reconheça em qual dia a embarcação foi utilizada, pois há a possibilidade de inserção de várias datas diferentes para a mesma embarcação. Isso se dá para que em diferentes trabalhos ao longo dos meses não seja necessário refazer esse passo, caso todos os sensores (ou parte deles) sejam fixos e não sejam alterados de posição.

Criadas as embarcações, foram criados diferentes projetos, um para cada sensor utilizado neste trabalho (EdgeTech 6205s2 e Ping DSP 3DSS). Em ambos os projetos foi utilizado o sistema de coordenadas WGS84/World Mercator, amplamente utilizado na navegação e, da mesma forma, na aquisição dos dados.

O próximo passo foi converter os dados para um formato que o programa pudesse interpretá-los através do “*Conversion Wizard*” (Assistente de Conversão). Essa conversão diz respeito apenas à conversão de um arquivo, no formato em que ele está para uma leitura possível pelo programa. Para que ele seja convertido da forma correta, é preciso dizer qual o tipo de arquivo para que o programa entenda o que é batimetria, o que é atitude, o que é navegação, entre outras informações, do dado em questão. Por isso essa etapa é tão importante. Os arquivos de dados do 6205s2 foram convertidos previamente no *software*

*Discover* em “.jsf”, que é um arquivo padrão da EdgeTech, e compatível com o Caris Hips. Já os arquivos do 3DSS foram convertidos previamente em “.xtf” (*eXtended Triton Format – Formato Triton Extendido*) que, da mesma forma, também são compatíveis com o Caris Hips.

Neste processo de conversão é possível, ainda, que seja realizada mais filtragem dos dados, de acordo com a vontade do usuário. Entretanto em ambos os casos, como os dados já vieram filtrados, somente foi aplicado o filtro de *Angle* (ângulo), pois quando há transdutores de ambos os lados, o programa obriga o usuário a aplicar tais filtros. Já os outros filtros que são *Amplitude* (Amplitude), *Range* (Distância) e *Statistical* (Estatístico) não foram necessários, de modo que os dados não fossem filtrados duas vezes, o que ocasionaria em perda de informação.

**Figura 27** - Possibilidade de filtros oferecidos pelo Caris Hips.

Bathymetry Filtering Options	
<b>Angle</b>	
Filter Method	Both
<b>Transducer 1</b>	
Minimum	-20.0000000
Maximum	100.0000000
<b>Transducer 2</b>	
Minimum	-20.0000000
Maximum	100.0000000
<b>Amplitude</b>	
Filter Method	None
Percent	0.0000000
<b>Range</b>	
Filter Method	None
<b>Slant Range</b>	
Minimum	0.0
Maximum	200.0
<b>Swath</b>	
Port	50.0
Starboard	50.0
Depth Multiplier	0
<b>Statistical</b>	
Filter Method	None
Threshold	1.0000000
Confidence Interval	68.2600000
<b>Sector Angle</b>	

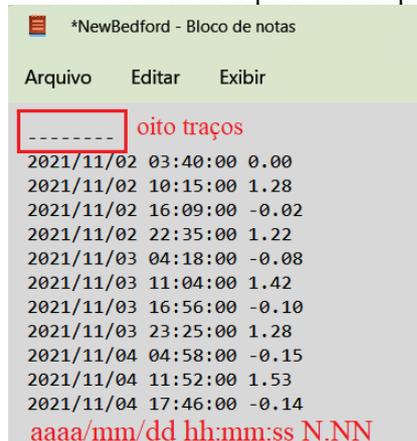
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Após essa etapa concluída, as linhas de sondagem já aparecem no projeto para edição e verificação dos dados. Em seguida, foi carregado um arquivo “.out” nas linhas, o qual

representa a correção SBET (*Smoothed Best Estimate of Trajectory* – Melhor Estimativa da Trajetória Suavizada). Estes são dados GNSS (*Global navigation Satellite System* – Sistema Global de Navegação por Satélite) e INS (*Inertial Navigation System* – Sistema de Navegação Inercial) pós-processados. Registrou-se todos os dados de navegação/movimento dos IMU's SBG durante a operação e os mesmos foram pós-processados. Esse arquivo pós-processado (SBET) foi gerado pelo programa POSPac da Applanix e aplicado às linhas de sondagem em ambos os projetos. Em vez de usar o posicionamento em tempo real, foi utilizado o SBET, que resulta na precisão centimétrica tanto na horizontal quanto na vertical. Com a utilização desta técnica, é possível que seja aproveitada ao máximo a precisão horizontal (posicionamento) e vertical (maré GPS). Em caso de utilização desta última, esta proporcionaria uma diminuição da necessidade de arquivos de maré, porém ainda importantes para o correto fluxo do processamento. Entretanto não foram utilizados os dados de maré GPS do arquivo SBET e sim as marés previstas/observadas.

Como bem mencionado, após a realização do carregamento do arquivo SBET, foram carregados os arquivos de maré. Para os dados do 6205s2 a maré disponível no site da NOAA (*National Oceanic and Atmosphere Administration* – Administração Nacional Oceânica e da Atmosfera) era a prevista. Os dados de maré foram adquiridos no site da NOAA pois a área sondada fica em New Bedford, Massachusetts, EUA. Já os dados de maré relativos à sondagem com o 3DSS foram adquiridos no site do governo canadense, e foram os observados em Sidney, British Columbia, Canadá. Ambos, após adquiridos, foram adaptados ao formato entendido pelo Caris, no bloco de notas, e convertidos em arquivos “.tid” para que o programa pudesse reconhecê-los. A referência utilizada foi o nível de redução de cada país e o horário UTC (*Coordinated Universal Time* – “Tempo Coordenado Universal”), que foi o mesmo de aquisição das linhas de sondagem.

**Figura 28** – Exemplo de arquivo “.tid” de maré entendido pelo Caris Hips; em vermelho, o padrão do formato.



```

----- oito traços
2021/11/02 03:40:00 0.00
2021/11/02 10:15:00 1.28
2021/11/02 16:09:00 -0.02
2021/11/02 22:35:00 1.22
2021/11/03 04:18:00 -0.08
2021/11/03 11:04:00 1.42
2021/11/03 16:56:00 -0.10
2021/11/03 23:25:00 1.28
2021/11/04 04:58:00 -0.15
2021/11/04 11:52:00 1.53
2021/11/04 17:46:00 -0.14
aaaa/mm/dd hh:mm:ss N.NN

```

Fonte: elaborado pelo autor no Bloco de Notas do Windows 11.

Logo após, foram inseridos às linhas os dados de SVP, importantíssimos para a correta interpretação do sinal na coluna d'água, pois a temperatura faz muita diferença na propagação do som. Estes arquivos foram, da mesma forma, adaptados no bloco de notas para que o programa os reconhecesse e transformados em arquivos “.svp” com o correto dia no formato juliano e horário UTC de lançamento do equipamento. Este horário é importante, quando há mais de um lançamento, para que o Caris associe corretamente cada dado à velocidade medida. Essa ferramenta ainda dá a opção de inserir a posição do lançamento do SVP, porém como as áreas sondadas foram pequenas, não foram necessários vários lançamentos. Quando há a necessidade de realizar vários lançamentos, pode-se escolher quais dados serão aproveitados, se o mais próximo em tempo, mais próximo em distância ou ambos.

**Figura 29** - Exemplo de arquivo “.svp” de SVP entendido pelo Caris Hips; em vermelho, o padrão do formato.

```

NewBedford_SVP - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Exibir
Section 2021-307 15:20:01
0.15 1495.41
0.45 1495.46
0.75 1495.51
1.05 1495.56
1.35 1495.65
1.65 1495.77
1.95 1495.96
2.25 1496.08
2.55 1496.25
2.85 1496.59
3.15 1496.93
3.45 1497.77
3.75 1498.50
4.05 1499.04
4.35 1499.35
4.65 1499.50
4.95 1499.58
5.24 1499.63
5.54 1499.66
5.84 1499.74
6.14 1499.96
6.44 1500.17
6.74 1500.28
7.04 1500.36
7.34 1500.52
  
```

Fonte: elaborado pelo autor no Bloco de Notas do Windows 11.

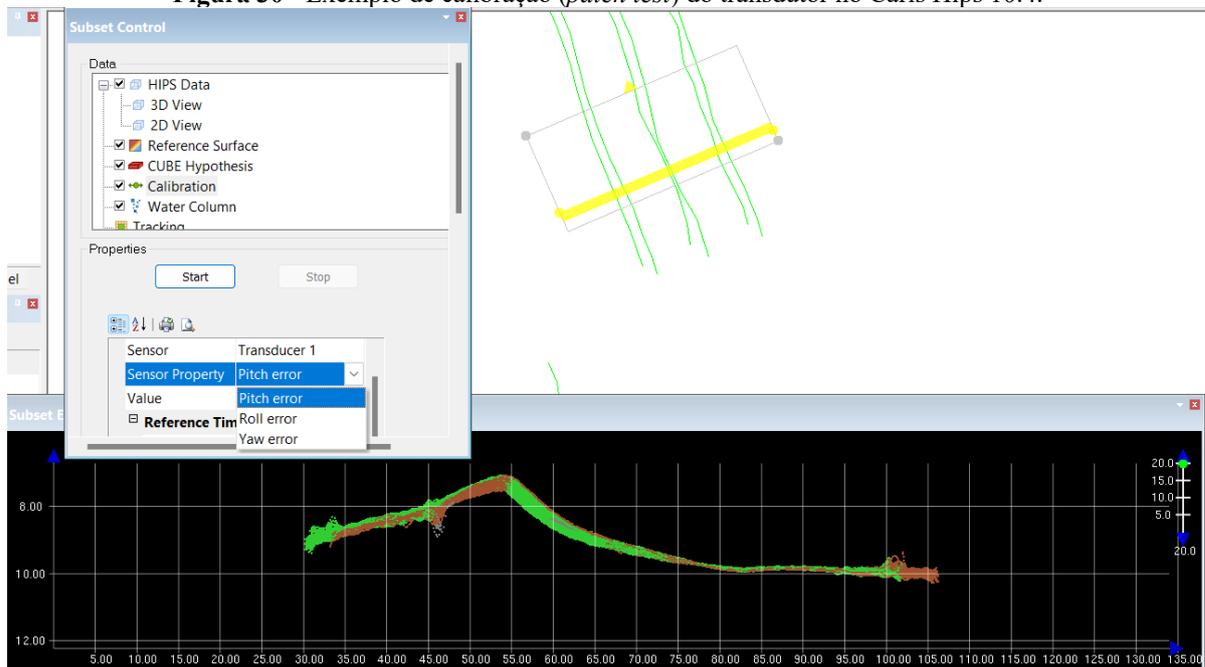
Após a inserção dos dados a fim de corrigir o comportamento do som, o próximo passo foi dar “merge” (fundir) em todos os dados lançados para que fossem fundidos com o

objetivo de juntar os valores obtidos por todos os sensores envolvidos no LH com os dados lançados pelo usuário diretamente no programa.

Logo após foi realizado o “*patch test*” (calibração) no próprio programa Caris Hips com os dados disponíveis, que é a medição dos desvios sistemáticos de *roll*, *time delay*, *pitch* e *yawn* (rolamento no eixo X, atraso no tempo, caturro em Y e cabeceio para os lados em Y). Estes se fazem necessários para correções específicas dos transdutores (*roll*, *pitch* e *yawn*) e navegação (*time delay*). Em ambos os casos, tanto do 6205s2 e do 3DSS os valores encontrados na *patch test* foram lançados no arquivo “.hvf” da embarcação, entretanto os valores foram mínimos ou nulos.

Para a realização destes deve-se abrir o “*Subset Editor*” (Editor de Subseção), selecionar as linhas específicas para cada teste (*roll*, *time delay*, *pitch* e *yawn*) e ir em “*calibration*” (calibração). Para cada par de linhas de sondagem específicas para esse teste é encontrado um valor ótimo de correção que deve ser lançado manualmente na embarcação ou nessa própria janela ao final da calibragem.

**Figura 30** - Exemplo de calibração (*patch test*) do transdutor no Caris Hips 10.4.

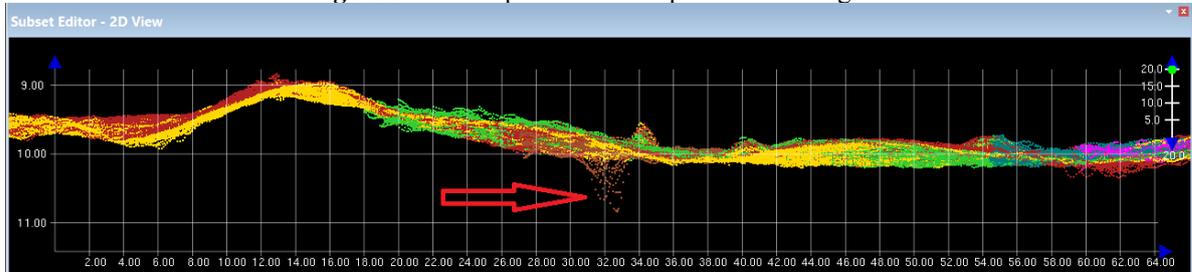


Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

A partir daí já pode ser realizada a correção de profundidades manualmente pelo operador, caso ele julgue necessário. Essa correção minuciosa diminui a incerteza vertical relativa à sondagem com a finalidade de segurança da navegação. Normalmente se descarta os pontos mais profundos para que quando seja gerada a superfície mais adiante, a variação vertical de um mesmo ponto não seja muito grande. Essa técnica de análise de dados, quando

se tem o objetivo de gerar um produto cartográfico, é realizada em várias etapas onde mais de uma pessoa confere o que foi feito de modo a haver o mínimo possível (idealmente nenhum) de erros grosseiros.

**Figura 31** - Exemplo de dados espúrios na sondagem.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Na figura 31 acima, um exemplo do processamento com o 6205s2, com exagero vertical de 20x (vezes) para melhor visualização, cada linha de sondagem está representada por uma cor. Na posição indicada na seta, várias linhas de sondagem (verde, amarela, magenta e marrom) passaram por ali e não conseguiram identificar a depressão, somente a linha marrom. Provavelmente é um dado espúrio e daria uma diferença de profundidade na ordem 1 metro do ponto mais raso ao mais fundo nessa posição. Portanto, foi corrigida e essa depressão rejeitada. Este foi somente um exemplo do que foi feito manualmente em todo o trabalho, tanto para o 6205s2 quanto para o 3DSS, de forma a melhorar o dado e possibilitar a análise mais precisa dos mesmos.

**Figura 32** - Inserção dos desvios-padrão da medição de maré e SVP, juntamente com os previamente lançados na embarcação.

Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Corrigidos os desvios de atitude, navegação e profundidades, antes de criar a superfície, deve-se computar os desvios (*Compute TPU*) de todos os equipamentos envolvidos na operação, conforme já lançado no arquivo da embarcação. Como já foram lançados desvios relativos à navegação inercial, atitude, transdutores, nessa etapa lança-se os erros relativos aos dados carregados posteriormente, que foram a maré e o SVP. No caso da maré, normalmente o erro é a metade da marcação mínima na régua de medição e do SVP é informado pelo fabricante do mesmo (figura 32).

Após computada a incerteza total propagada às linhas de sondagem, pode-se criar a superfície para quaisquer avaliações e comparações. Esta superfície (*grid*) é chamada de BASE (*Bathymetric Associated with Statistical Error* – Batimetria Associada com Erro Estatístico) *surface*, que “é uma imagem georreferenciada de uma superfície multiatribuída com suas médias ponderadas” (CARIS, 2013), ou seja, é o resultado final de um LH e compreende todos os pontos sondados (profundidade) atrelados à uma posição com suas devidas incertezas, “esses dados podem ser usados posteriormente para criar uma ENC (*Electronic Navigational Chart* – Carta Eletrônica de navegação) ou carta raster” (CARIS, 2013). Nessa etapa de criação de BASE *surface*, o programa permite que sejam utilizados quatro tipos diferentes de superfície, são elas (CARIS, 2013):

- *Uncertainty* (Incerteza): usa um esquema de ponderação baseado na incerteza da profundidade conforme especificado por uma ordem de levantamento selecionada da S-44;
- *Swath Angle* (Ângulo de Faixa): usa um esquema de ponderação baseado na interseção do ângulo de feixe com o fundo do mar;
- *Shoalest Depth True Position* (Posição Verdadeira da Profundidade mais Rasa): armazena a menor profundidade dentro de um determinado nó na camada de profundidade. A verdadeira posição desta profundidade também é armazenada na BASE *surface*; e
- *CUBE surface*: usa várias hipóteses para representar as variações das potenciais profundidades ao longo do fundo do mar.

As quatro opções acima permitem ao usuário selecionar a resolução da célula, onde quanto menor for este valor, mais definido fica o fundo, porém nem todo levantamento

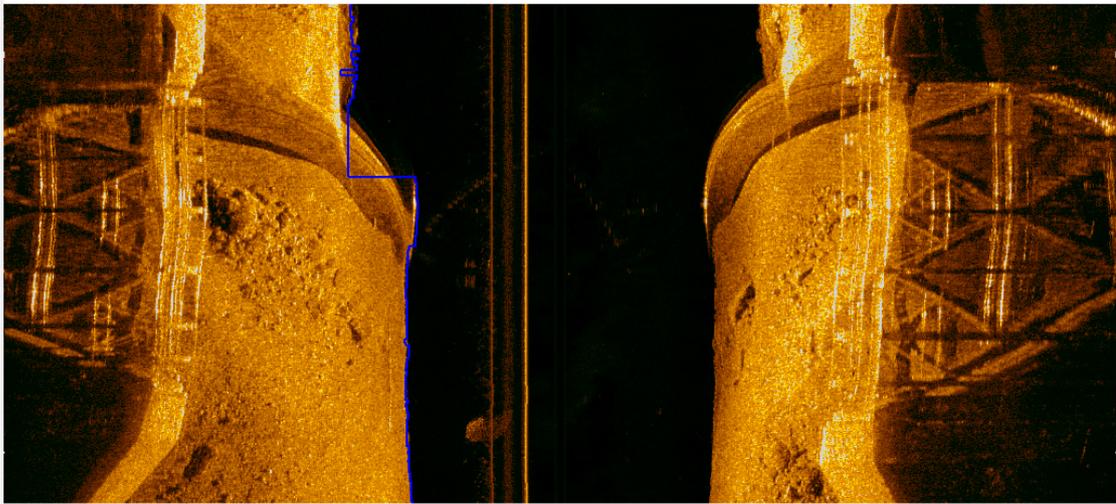
permite uma boa resolução, pois esse fator está diretamente ligado à densidade de dados que se tem para formar um nó. Todas estas possibilidades serão exploradas no capítulo seguinte, fazendo avaliações e comparações dentro das ordens previstas da S-44 e adequações para a produção de um possível produto cartográfico.

### 3.2.2 Imageamento

Para a visualização das imagens geradas, tanto pelo 6205s2 quanto pelo 3DSS, foi utilizado o *software* SonarWiz da Chesapeake Technology. Diferentemente do processamento da batimetria, a visualização das imagens é mais simples, devido ao fato de primordialmente serem utilizados equipamentos no intuito da visualização instantânea do fundo. Então a imagem vista em tempo real pelo operador é a mesma imagem que fica gravada para uma posterior análise, caso desejado, já com todos os *offsets* inseridos na própria aquisição.

Ao abrir o programa e serem carregadas as linhas de sondagem/imageamento de cada equipamento, o programa já exibe as imagens gravadas e as perfila corretamente. Logo após foi realizada a correção de “*bottom track*” (trilha de fundo) onde o operador diz ao programa exatamente a partir de qual ponto os dados devem ser considerados a partir da área não imageada no nadir. Esse diz ao programa o que deve ser considerado como “zona cega” no nadir, em ambos os lados. Relembrando que no imageamento realizado pelos equipamentos em lide, o nadir não consegue ser imageado e, caso se queira informações de toda a área, é necessário que a linha de navegação seguinte cubra o nadir da linha anterior e assim por diante.

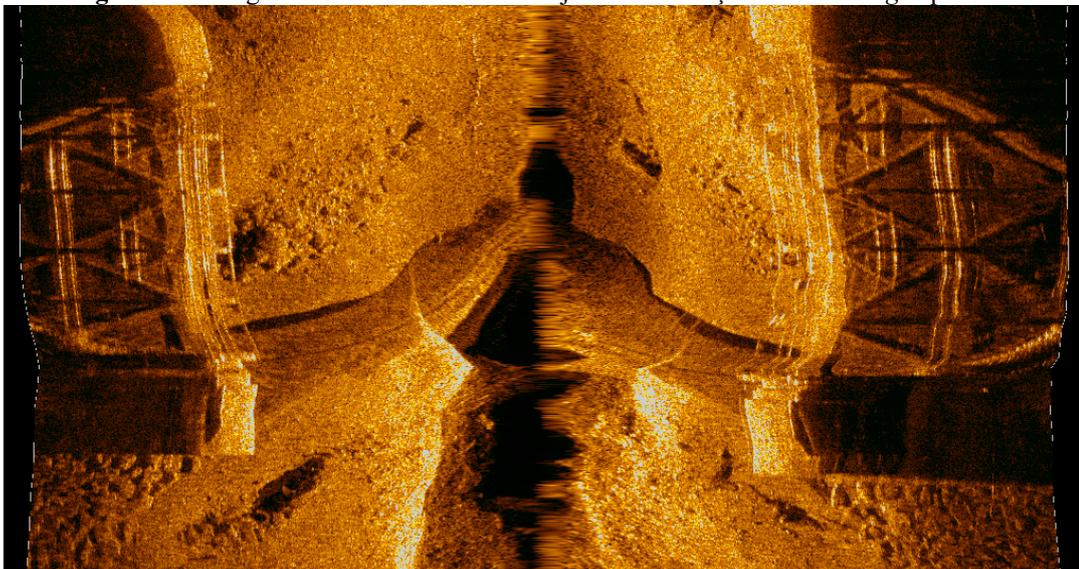
**Figura 33** - Imagem de uma linha do 6205s2; em azul a linha de *bottom track* separando a zona cega do nadir do que será considerado como dado.



Fonte: elaborado pelo autor no SonarWiz 7.

Após esta ação em todas as linhas do projeto, foi feita a correção de *slant range* (alcance inclinado), que correlaciona as distâncias medidas horizontalmente ao longo do percurso da embarcação com suas posições já georreferenciadas.

**Figura 34** - Imagem de uma linha do 6205s2 já com a correção de *slant range* aplicada.

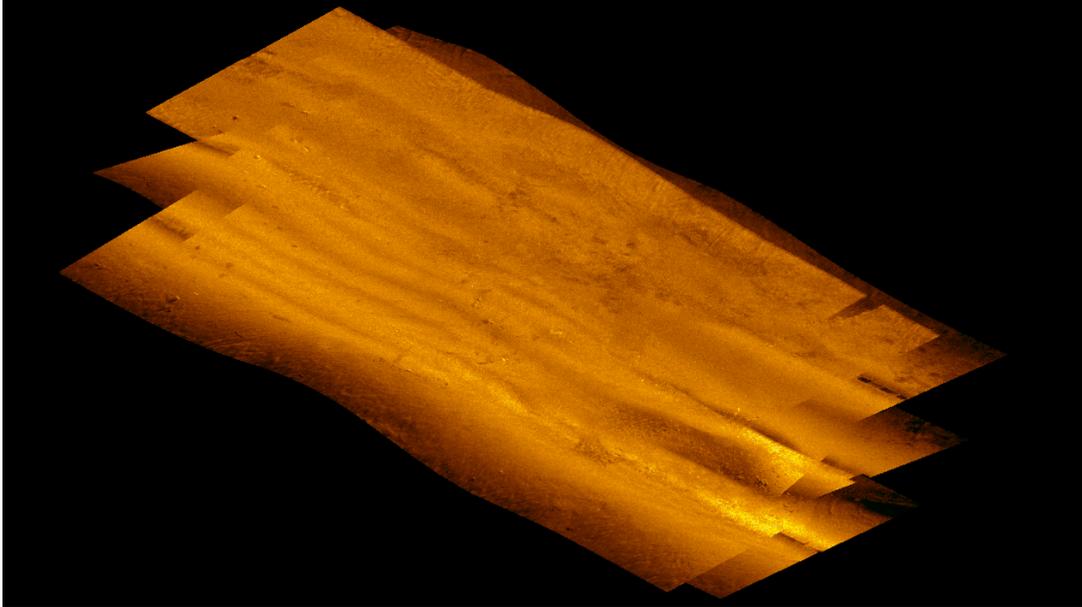


Fonte: elaborado pelo autor no SonarWiz 7.

Após foi inserido em cada linha o ajuste de TVG, que equaliza o brilho/luminosidade da intensidade do retorno tanto dos feixes que retornam mais perto do nadir quanto dos mais afastados. Esse passo é importante para que se consiga ver a imagem após o próximo passo que foi a mosaicagem. Foram colocadas todas as linhas em exibição na tela e escolhido o modo *shine through* (brilho através) que suaviza o brilho das imagens conectando uma à outra, melhorando a visualização. Cabe ressaltar que existem outros modos de visualização

como *average* (média) e *cover up* (cobrir), onde o primeiro faz a média das intensidades de retorno e o segundo coloca as imagens uma por cima da outra.

**Figura 35** - Mosaico de linhas corrigidas de uma área sondada/imageada com o 6205s2.



Fonte: elaborado pelo autor no SonarWiz 7.

Ao final de todo o processo, pode-se avaliar o mosaico gerado pelas linhas e verificar o detalhamento do fundo do mar. Há a possibilidade de exportação do produto como imagem, com opções de resolução escolhidas pelo usuário. Quanto melhor resolução da imagem, mais pesado o arquivo e mais tempo o programa irá precisar para renderizar a mesma.

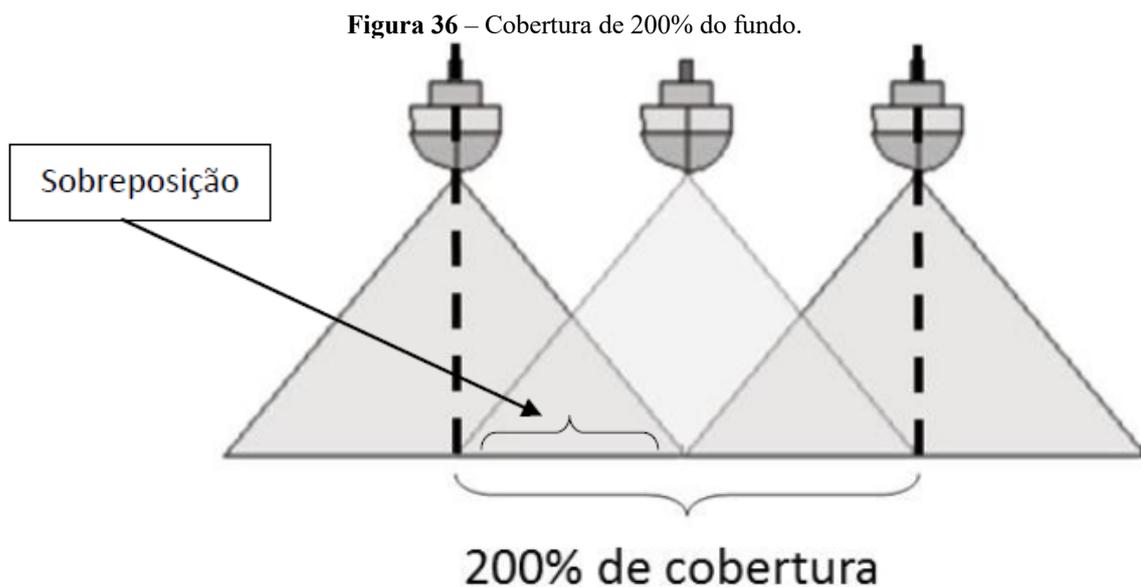
Aqui foi falado o passo a passo para obtenção das imagens corrigidas de ambos os equipamentos estudados, entretanto a discussão sobre os resultados será abordada no próximo capítulo, da mesma forma como a batimetria.

## 4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

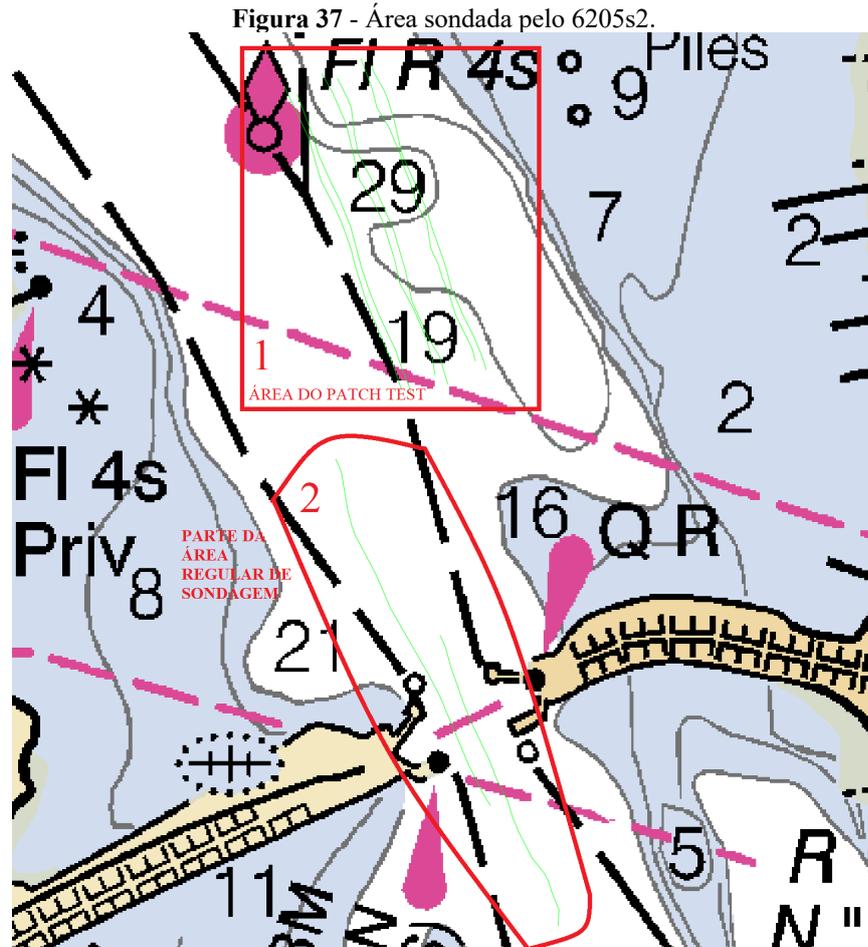
### 4.1 RESULTADOS DE BATIMETRIA E IMAGEAMENTO OBTIDOS COM O EDGETECH 6205S2

#### 4.1.1 Batimetria

Foram realizadas 8 (oito) linhas de sondagem em New Bedford, Massachusetts, EUA, incluindo as linhas de *patch test* que também foram utilizadas para avaliação de resultados neste trabalho. Inclusive essa área de *patch test* possui robustez necessária para que seja avaliada com a rigidez exigida pela NORMAM-25, ou seja, uma cobertura do fundo de 200% como ilustrado na figura 36. Ressalta-se, mais uma vez, que a NORMAM-25 é mais rígida do que a S-44, portanto para que neste trabalho pudessem ser avaliados todos os dados disponibilizados, estes foram avaliados segundo o critério da S-44, mais brandos, com a finalidade de realizar as análises qualitativas julgadas pertinentes. Para facilitar a apresentação dos resultados, as áreas foram divididas em área 1 e área 2.



Fonte: BRASIL, 2017.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

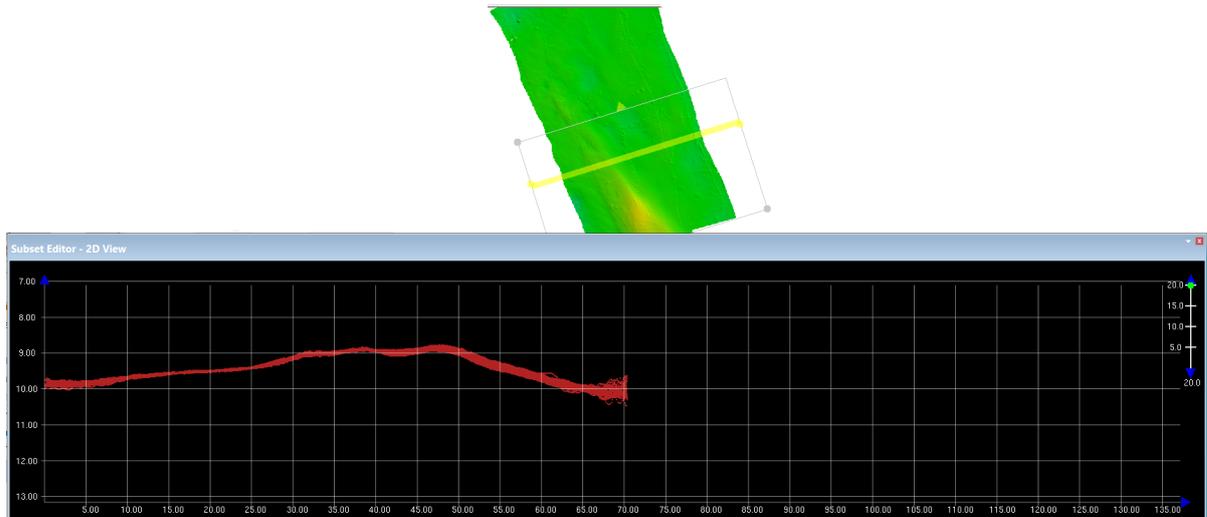
#### 4.1.1.1 Alcance Horizontal

Após realizados todos os procedimentos descritos no capítulo anterior é importante fazer análises condizentes com a teoria da tecnologia. A primeira delas é o alcance horizontal relativo a uma linha de sondagem. De todos os dados disponíveis a mínima e máxima distâncias obtidas aproximadamente, relativas aos dois lados do equipamento estão dispostas na tabela 8 e figuras 38 e 39. Sabe-se que vários fatores influenciam para melhorar esse alcance, como profundidade local, condições do mar, variações do fundo e boa navegação (manter a linha).

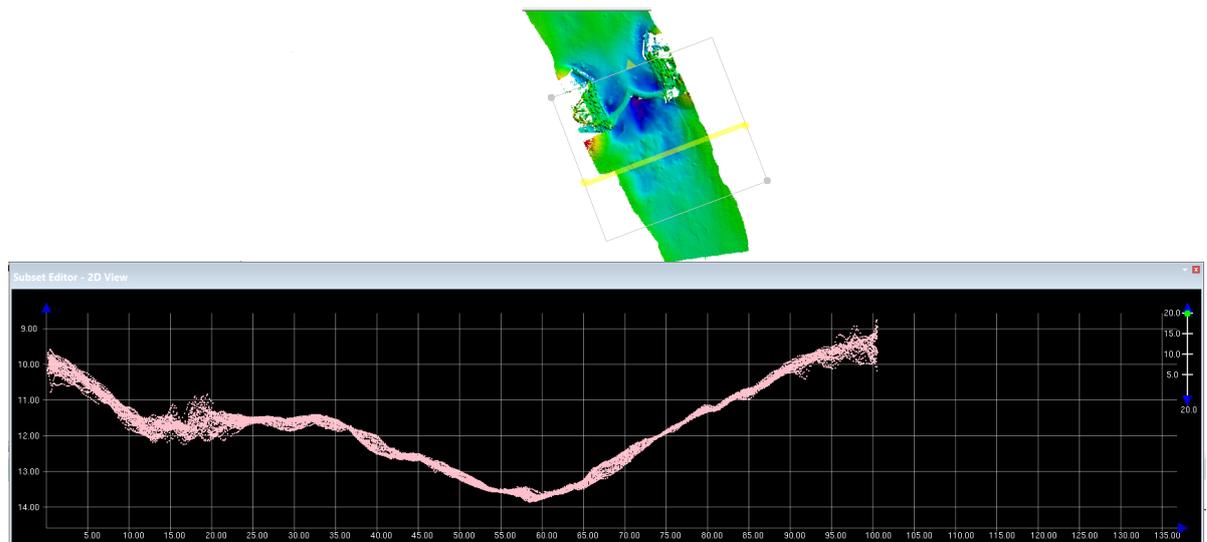
**Tabela 8** - Alcance horizontal mínimo e máximo, aproximados, em uma linha de sondagem.

	Alcance horizontal	Profundidade média	Alcance em relação à profundidade
Mínima	70 metros	9,5 metros	7,4 vezes
Máxima	100 metros	11,2 metros	8,9 vezes

Fonte: elaborado pelo autor.

**Figura 38** - mínimo em uma linha de sondagem numa profundidade variante de 9 a 10 metros.

Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 39** - Alcance máximo em uma linha de sondagem numa profundidade variante de 9 a 13,5 metros.

Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Após esta análise, conclui-se que o alcance horizontal do 6205s2 foi de 7,4 a 8,9 vezes, aproximadamente, a profundidade local; uma das vantagens observadas pelos sonares interferométricos.

#### 4.1.1.2 Número de Pontos de Sondagem

Para se dimensionar a quantidade de dados espúrios, é importante observar a relação da quantidade de pontos aceitos e rejeitados para a posterior formação dos *grids*. Os dados rejeitados não são contabilizados para tal e pode-se ter uma ideia da quantidade de pontos obtidos por esta tecnologia, o que sim, aumenta a resolução, entretanto aumenta também a ambiguidade em certos pontos, como será mostrado mais a frente. A tabela 9 apresenta essa relação de pontos, aceitos e rejeitados, com suas porcentagens.

**Tabela 9** - Relação de pontos aceitos e rejeitados.

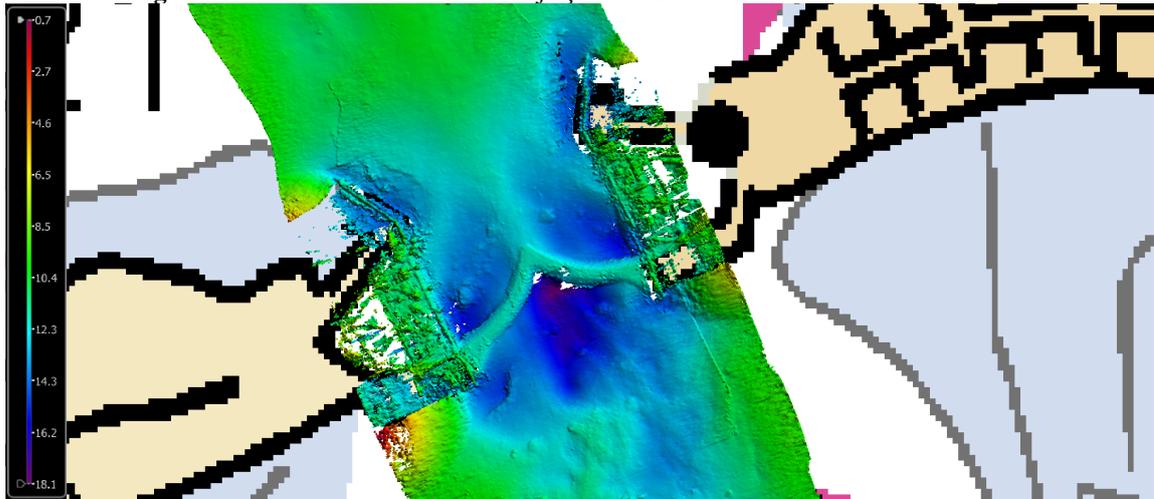
	Área 1	Área 2
Total de pontos	8.990.380	3.156.590
Aceitos	6.484.727 (72,13%)	1.776.598 (56,28%)
Rejeitados	2.505.653 (27,87%)	1.379.992 (43,72%)

Fonte: elaborado pelo autor.

Aqui é observado um número maior de pontos rejeitados na área 2 devido à incerteza relativa aos pilares da ponte (figura 40), onde não se sabe ao certo onde está o fundo devido aos múltiplos retornos e por serem somente 2 (duas) linhas de sondagem, onde quanto menos linhas maior o nível de incerteza e menor a acurácia. Enquanto na área 1, além de haver 6 (seis) linhas praticamente concomitantes, como o fundo é majoritariamente plano, as rejeições são relativas aos dados espúrios não filtrados.

Cabe um adendo que, conforme já mencionado, a filtragem dos dados já havia sido feita por programas específicos antes da análise pelo Caris Hips, portanto, provavelmente, muito mais dados foram rejeitados antes de serem avaliados aqui.

**Figura 40** - Área de maior fonte de rejeição de dados e incertezas relativas à área 2.

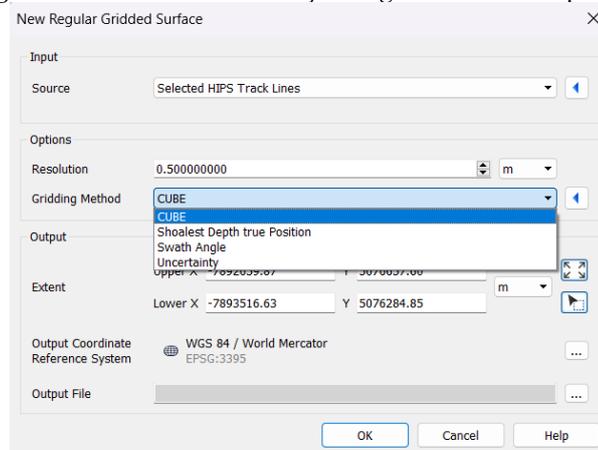


Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

#### 4.1.1.3 Geração de Superfícies

O produto final das profundidades sondadas é a criação de superfícies onde ficam gravados os dados de profundidade, incertezas e posição, conforme já mencionado, porém a NORMAM-25 “não especifica nada relacionado à interpolação dos dados ou geração de modelos batimétricos” (FERREIRA, 2018). Essas podem ser geradas de 4 (quatro) formas diferentes: *Uncertainty*, *Swath Angle*, *Shoalest Depth True Position* e *CUBE*; e ainda, com diferentes resoluções.

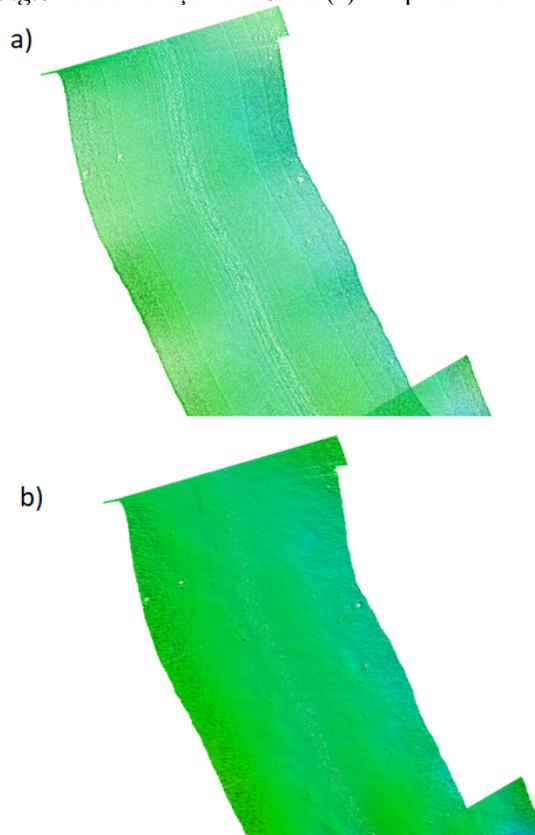
**Figura 41** - Ferramenta de criação de *grids* no Caris Hips 10.4.



Fonte: *print screen* realizado pelo autor do Caris Hips 10.4.

Entretanto, visto estas 4 (quatro) possibilidades, foi considerada a geração para análise somente pelo método CUBE pois, esta cria camadas que usam critérios parecidos aos da *uncertainty* e da *shoalest depth true position* criando, além das outras, estas 2 (duas) *layers* (camadas): *uncertainty* e *shoal*, onde a primeira apresenta o grau de incerteza de cada nó e a segunda apresenta a profundidade mais rasa de cada nó, sendo esta última extremamente importante para criação de produtos cartográficos. Já a *swath angle* não condiz com a tecnologia de interferometria, pois este método atribui pesos maiores às sondagens mais próximas ao nadir, o que difere do método empregado pelos sensores interferométricos por justamente estes apresentarem melhor desempenho nos feixes mais afastados do nadir.

**Figura 42** - Superfície *swath angle* com resolução de 15 cm (a) e superfície CUBE com resolução de 15 cm (b).



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Na figura 42 acima percebe-se que a densidade de pontos na superfície (a) é muito menor do que na superfície (b) com a mesma resolução devido ao peso atribuído às sondagens mais próximas ao nadir da primeira, prejudicando a resolução geral da superfície.

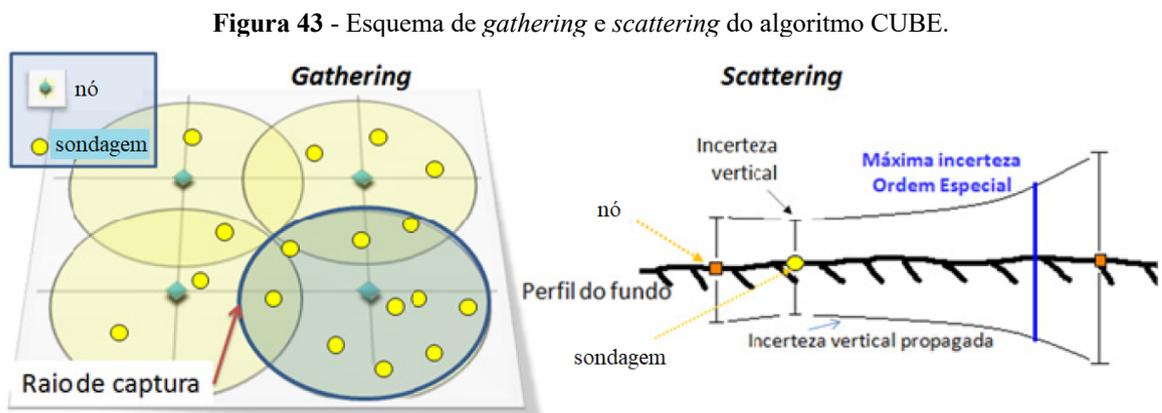
Ademais, como as áreas em questão representam perigo à navegação e estão numa profundidade de até 18 metros nas regiões mais profundas, porém em sua maior parte apresenta médias de 10 metros, além de compreenderem um canal de navegação; o ideal é que seja realizado um LH de ordem especial ou exclusiva, onde 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). Por este motivo foram geradas superfícies com essas resoluções para as discussões posteriores.

Para dar continuidade com as análises, faz-se necessário descrever como funciona o algoritmo CUBE, visto que este foi principalmente utilizado para a criação das superfícies finais do trabalho. Para que seja criada uma superfície CUBE, é necessário que se haja pontos de sondagem georreferenciados com todas as incertezas envolvidas no processo, conforme foi descrito no capítulo anterior. Carregados esses atributos, o CUBE “transforma as sondagens numa malha regular de profundidades estimadas, através de três funções básicas: assimilação, intervenção e desambiguação” (VICENTE, 2011).

O algoritmo efetua a compilação das sondagens contribuintes para a determinação da profundidade nodal, processo designado por *gathering* (reunião) e definido por um raio de captura; a propagação da incerteza vertical associada a cada sondagem, processo designado por *scattering* (espalhamento) que serve para colapsar as incertezas 3D de uma sondagem numa única dimensão de incerteza, que irá contribuir para a estimação da incerteza vertical dos nós (VICENTE, 2011).

Portanto, os pontos mais próximos do nó e com menos incertezas contribuem mais para estimação da profundidade da superfície.

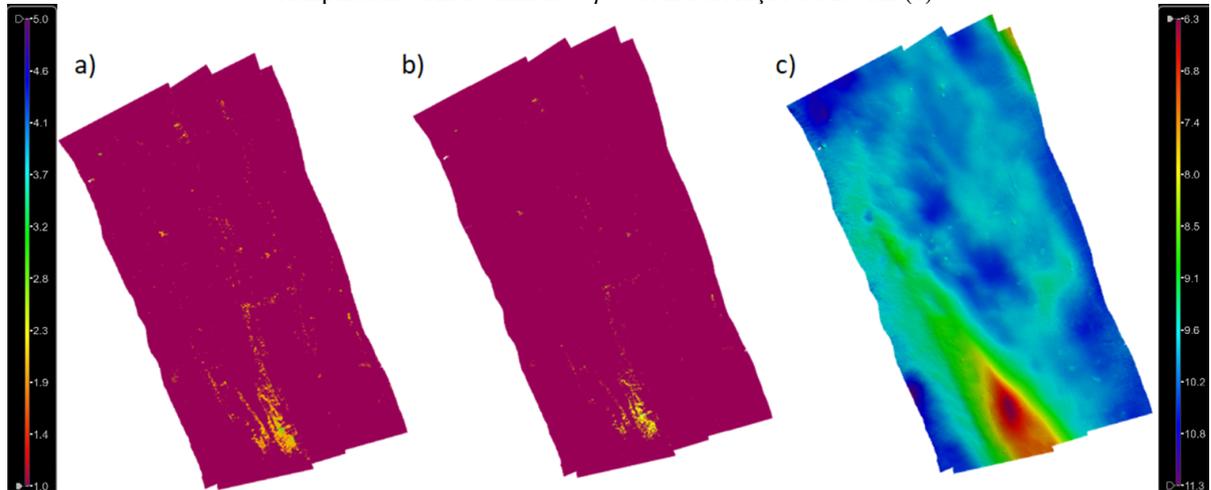


Fonte: adaptado de CARIS, 2010 apud VICENTE, 2011.

A próxima função utilizada para definição da superfície é a função intervenção, que “consiste numa tarefa de análise sequencial em que é dada a capacidade de decisão ao CUBE de, na presença de uma sondagem estatisticamente incompatível com a informação, entretanto assimilada pelo nó, criar uma hipótese alternativa” (VICENTE, 2011), ou seja, esta função cria quantas alternativas o algoritmo considerar necessárias para a resolução da profundidade

em um dado nó. Esta análise fica definida em uma das camadas da superfície chamada *hypothesis count* (contagem de hipóteses) disponível logo após a criação da superfície CUBE.

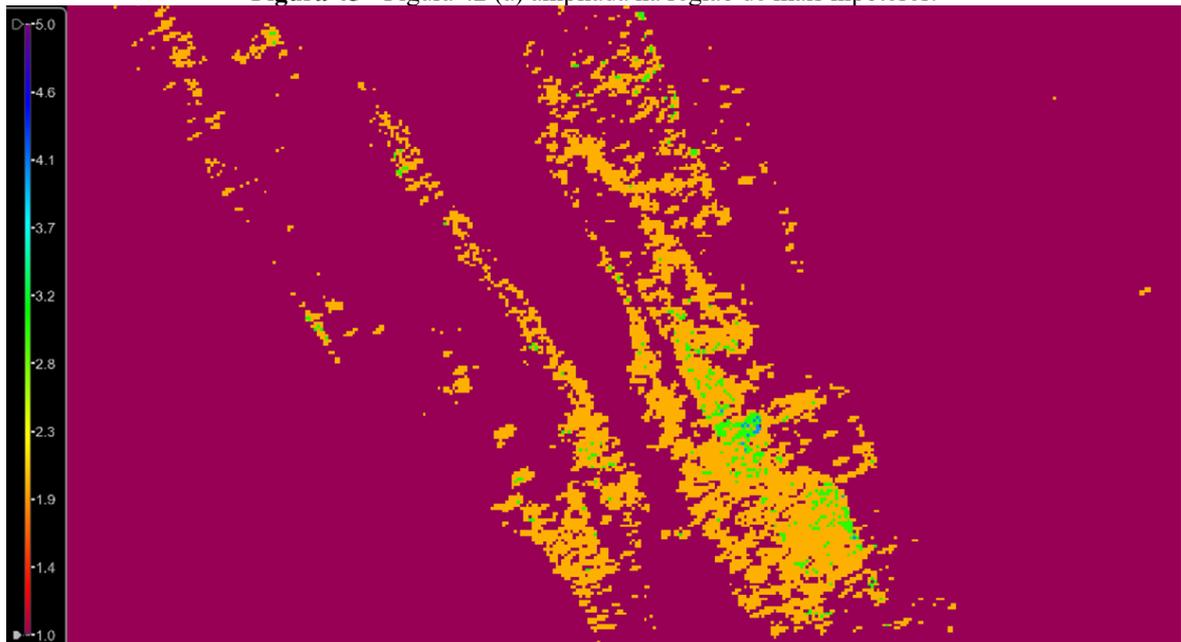
**Figura 44** - – Camadas *hypothesis count* da superfície CUBE da área 1 com resoluções de 25 cm (a) e 15 cm (b) comparadas com a camada *depth* com resolução de 25 cm (c).



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Na figura 44, na região de maior número de hipóteses, comparando-se uma com a outra, percebe-se que na de resolução de 25 cm tem-se mais hipóteses devido ao tamanho do nó considerado ser maior (25 cm), portanto mais sondagens participam da seleção do algoritmo para a profundidade medida (nó) e conseqüentemente a variação vertical na mesma região fica aumentada.

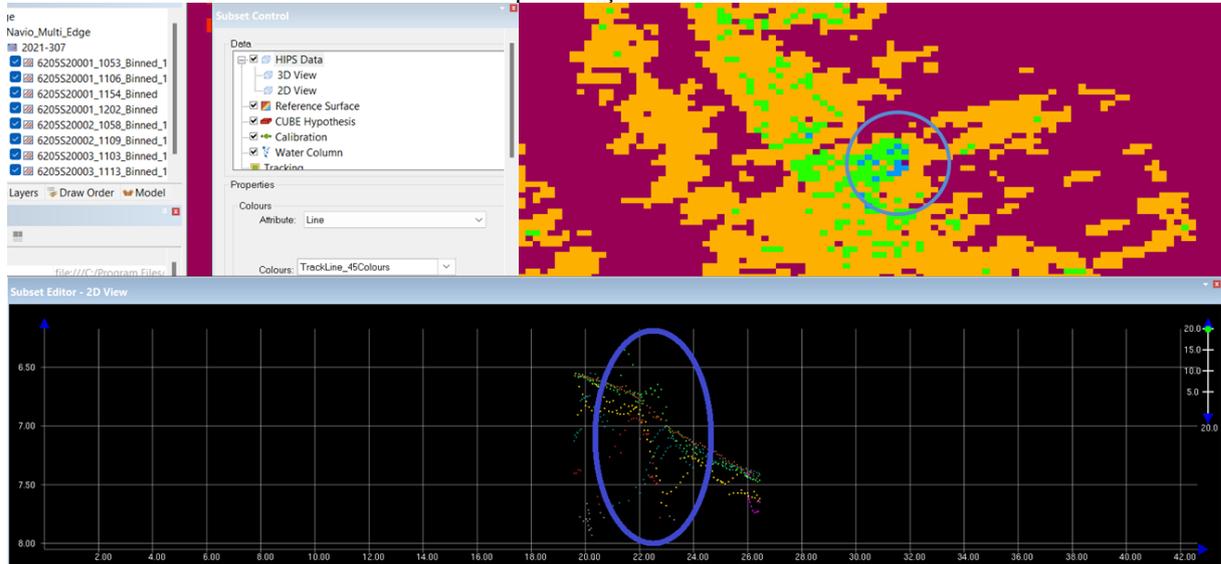
**Figura 45** - Figura 42 (a) ampliada na região de mais hipóteses.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Ainda, na figura 42, a região na cor vinho apresenta apenas uma hipótese para a profundidade, as regiões em laranja apresentam 2 (duas) hipóteses, as em verde, 3 (três) hipóteses e em poucos pontos azuis, 4 (quatro) hipóteses.

**Figura 46** – Pontos azuis, com 4 (quatro) hipóteses para a profundidade numa região da área 1 e sua representação vertical.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Acima observa-se que a incerteza vertical (TVU) foi grande nesse ponto considerado, portanto houve um número maior de hipóteses. Tal incerteza deve-se ao fato de haver uma pequena depressão nesta área e os dados não foram filtrados manualmente da forma adequada para que fossem eliminadas essas ambiguidades na profundidade.

A terceira e última função do algoritmo CUBE é a desambiguação, na qual ocorre uma classificação não supervisionada que escolhe a melhor hipótese baseada no “número de sondagens contribuintes, semelhança com os nós vizinhos e uma solução mista em que é selecionada a hipótese com maior número de sondagens” (VICENTE, 2011). Tal classificação e escolha resultam na superfície CUBE com algumas camadas definidas (CARIS, 2013):

- *Depth* (profundidade): Profundidade no nó;
- *Density* (densidade): O número de sondagens que contribuem para um nó;
- *Standard Deviation* (desvio padrão): O número de desvios padrão que o nó está a partir da média;
- *Uncertainty* (incerteza): A incerteza da profundidade atribuída a cada nó;
- *Mean* (média): A profundidade média calculada a partir de todas as sondagens contribuindo para um nó;

- *Shoal* (mais raso): O som mais raso contribuindo para um nó;
- *Deep* (mais fundo): O som mais fundo contribuindo para um nó;
- *Hypothesis Count* (contagem de hipóteses): representação visual da densidade de hipóteses em um nó;
- *Hypothesis Strength* (força da hipótese): representação visual da confiança matemática de uma hipótese escolhida; e
- *User Nominated* (denominação do usuário): as hipóteses denominadas que foram escolhidas sobre as hipóteses selecionadas pela desambiguação do CUBE.

Como exemplo, um caso específico e comumente utilizado na geração de CN's é a utilização da superfície batimétrica gerada com as menores profundidades disponíveis, a camada *shoal*, entretanto “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” (PIMENTEL, 2023) devido justamente a essa maior variação vertical. Tal fato encontrado por Pimentel foi possível ao avaliar as incertezas *a posteriori* em comparação com áreas já previamente conhecidas.

Relacionadas essas possíveis camadas de visualização, pode-se discutir algumas características/propriedades dos dados gerados pelo 6205s2.

#### 4.1.1.4 Densidade dos Dados

Uma das formas de se avaliar a densidade dos dados obtida com a sondagem é verificar a camada *density* para diferentes tamanhos de células. Na tabela 10 abaixo foi considerada uma seção transversal à uma linha de sondagem da região 2 de aproximadamente 67m x 7m (em amarelo na figura 47) e avaliado quantos pontos contribuíram para a formação dos nós relativos às suas respectivas resoluções:

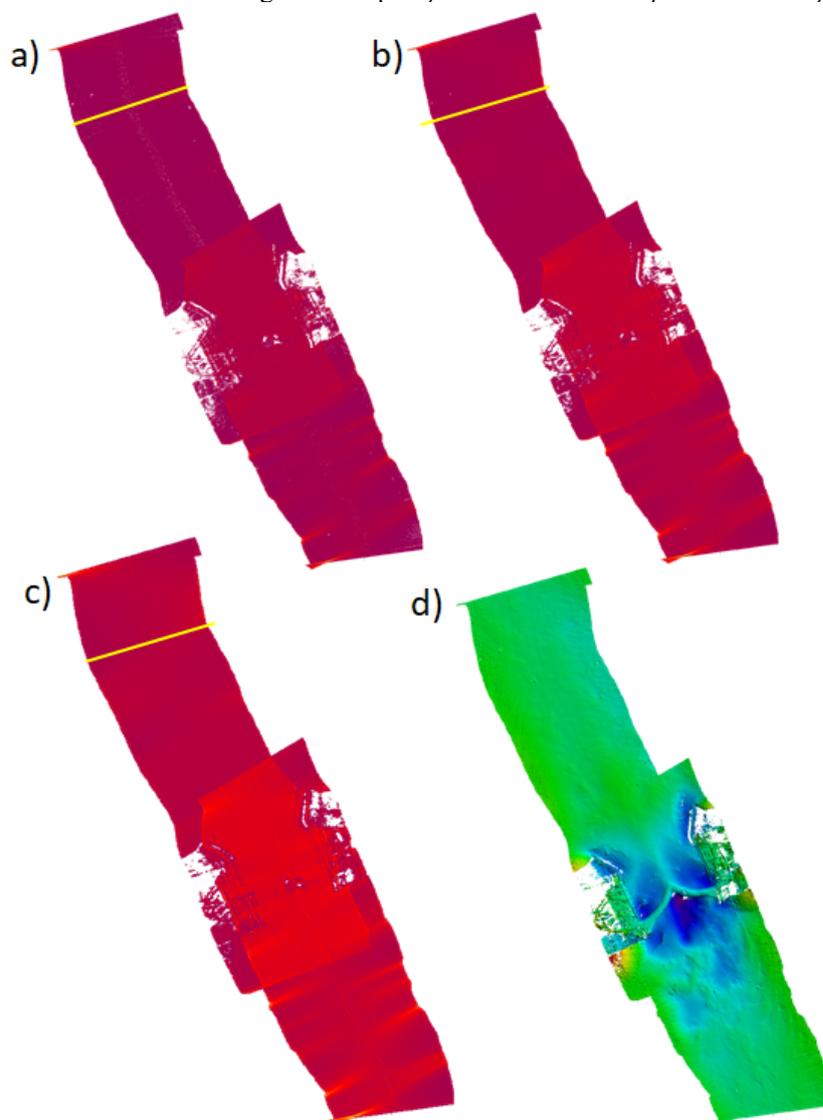
**Tabela 10** - Contribuição com o número de pontos por nó relativos à resolução da superfície.

	12,5 cm	25 cm	50 cm
Faixa transversal de 7m x 67m	1 a 6 pontos por nó	1 a 18 pontos por nó	1 a 52 pontos por nó

Fonte: elaborado pelo autor.

Com isso, pode ser observado que quanto maior o tamanho do nó, mais pontos são levados em consideração para a estimativa da profundidade e mais precisa é a informação. Aqui cabe destacar que precisão não necessariamente significa boa acurácia. Na figura 47 percebe-se melhor este fato, onde quanto mais vermelho, maior densidade de pontos, quanto mais vinho, menor densidade de pontos. E, também, quanto mais linhas de sondagem houver na mesma região, mais denso será o nó, como pode ser observado na interseção das 2 (duas) linhas em baixo da ponte da área 2.

**Figura 47** - Camadas *density* da área 2 com resoluções de 12,5 cm (a), 25 cm (b) e 50 cm (c); em amarelo seção transversal a uma única linha de sondagem e comparação com a camada *depth* com resolução de 25 cm (d).



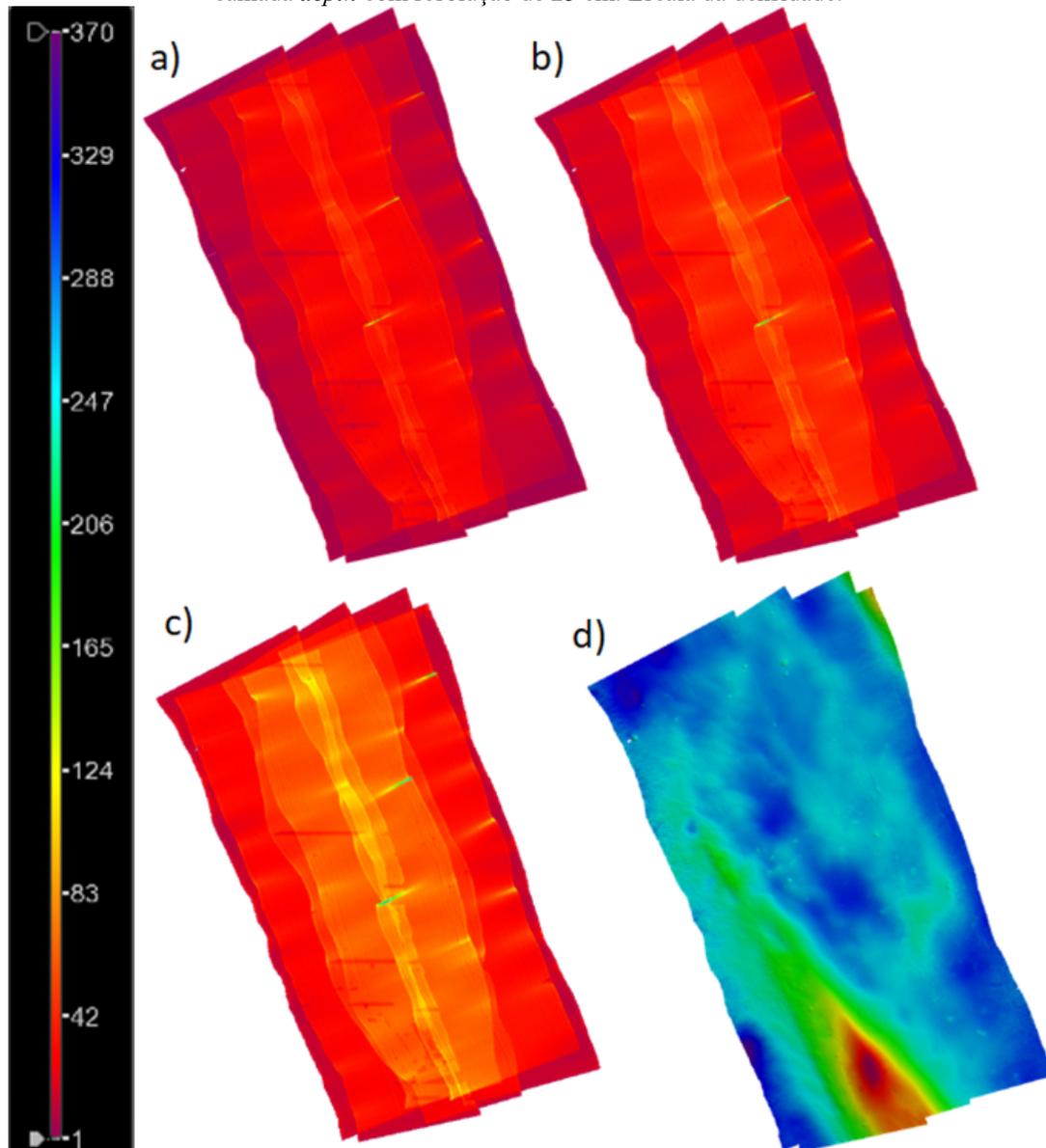
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Pela figura 47 (a), percebe-se também que a densidade dos dados na região do nadir é menor em relação às extremidades. Isso comprova a teoria de que em sonares

interferométricos os dados são melhores quanto mais próximos da região perpendicular à inclinação do feixe acústico, que geralmente está defasado em algumas dezenas de graus.

Já na área 1, como foram realizadas 6 linhas, observa-se que mais ao centro da superfície a densidade de pontos é maior, nas cores amarela e verde, devido ao fato de todas as linhas apresentarem pontos de profundidade nessa faixa central específica da área.

**Figura 48** - Camadas *density* da área 1 com resoluções de 12,5 cm (a), 25 cm (b) e 50 cm (c) comparadas com a camada *depth* com resolução de 25 cm. Escala da densidade.

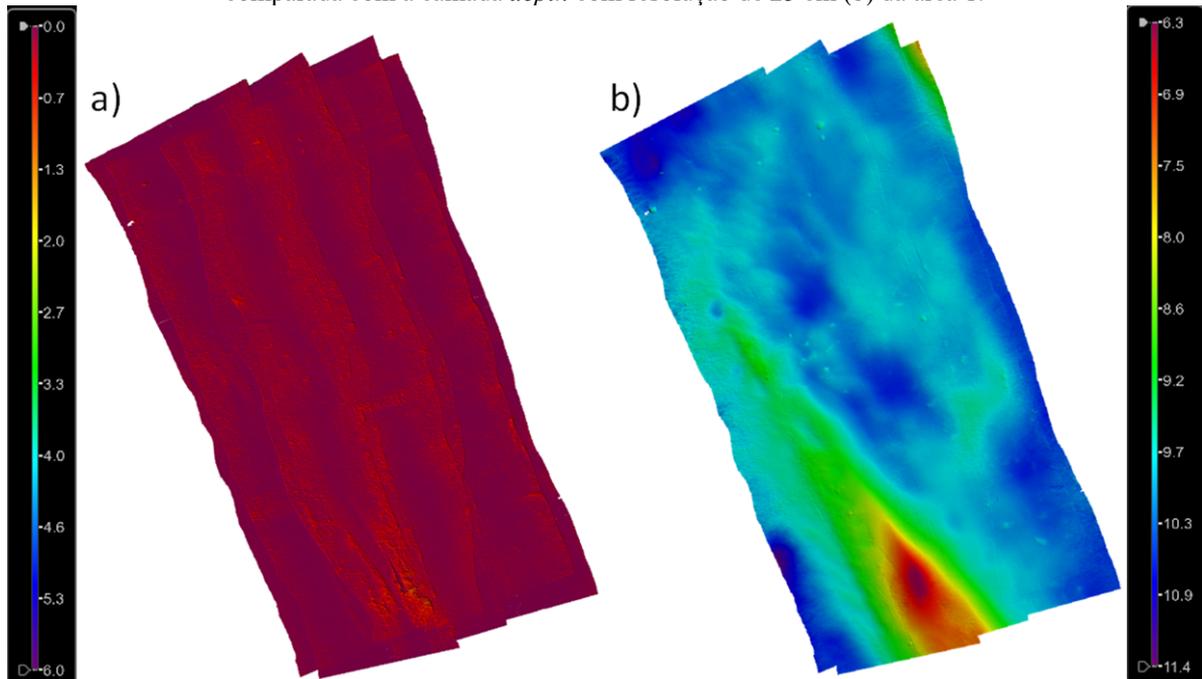


Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

#### 4.1.1.5 Variação Vertical das Profundidades

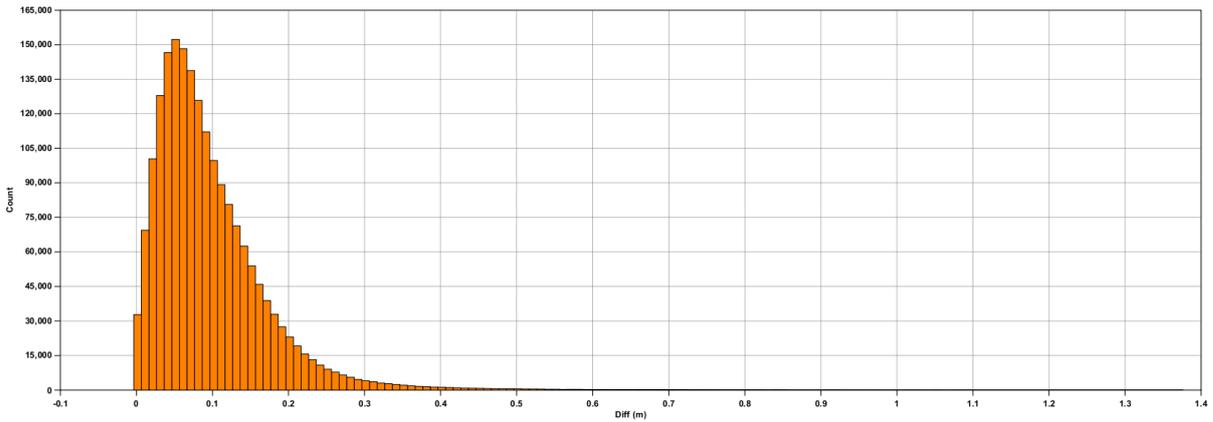
Para avaliação da variação vertical das profundidades encontradas nas regiões 1 e 2 com o 6205s2, foi realizada a diferença entre as camadas *deep* e *shoal* da superfície CUBE com resolução de 25 cm, denominada Superfície da Variação Vertical de Profundidades. Aqui cabe um adendo: foi utilizada a resolução de 25 cm, pois quanto menor esta for, sem que se perca dados, mais precisa é a análise. Retornando, estas camadas apresentam os valores considerados como mais fundo e mais raso pelo algoritmo CUBE, respectivamente. Por isso, para cada nó foi considerada esta diferença para geração das superfícies das áreas 1 (figura 49) e 2 (figura 51) com seus respectivos histogramas de diferença de profundidades nos gráficos das figuras 50 e 52.

**Figura 49** - Superfície de diferença de profundidades entre as camadas *deep* e *shoal* da superfície CUBE (a) comparada com a camada *depth* com resolução de 25 cm (b) da área 1.



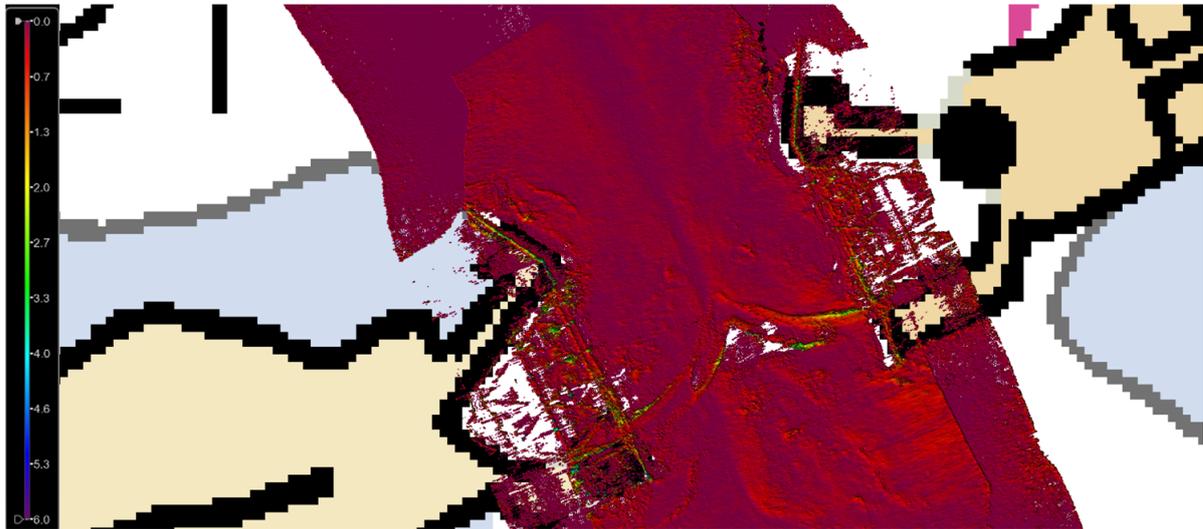
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 50** - Histograma com valores da diferença de profundidades entre as camadas *deep* e *shoal* da superfície CUBE da área 1.



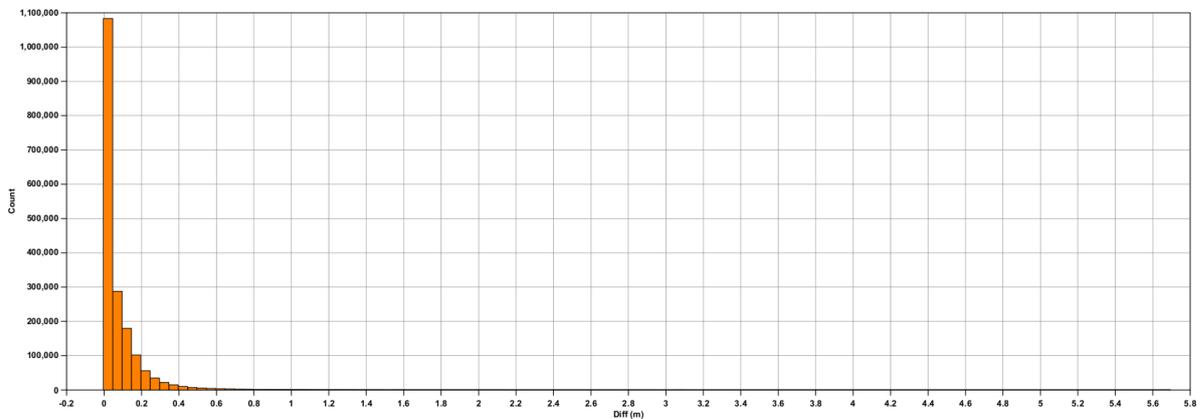
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 51** - Região crítica da diferença de profundidades entre as camadas *deep* e *shoal* da superfície CUBE da área 2.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 52** - Histograma com valores da diferença de profundidades entre as camadas *deep* e *shoal* da superfície CUBE da área 2.

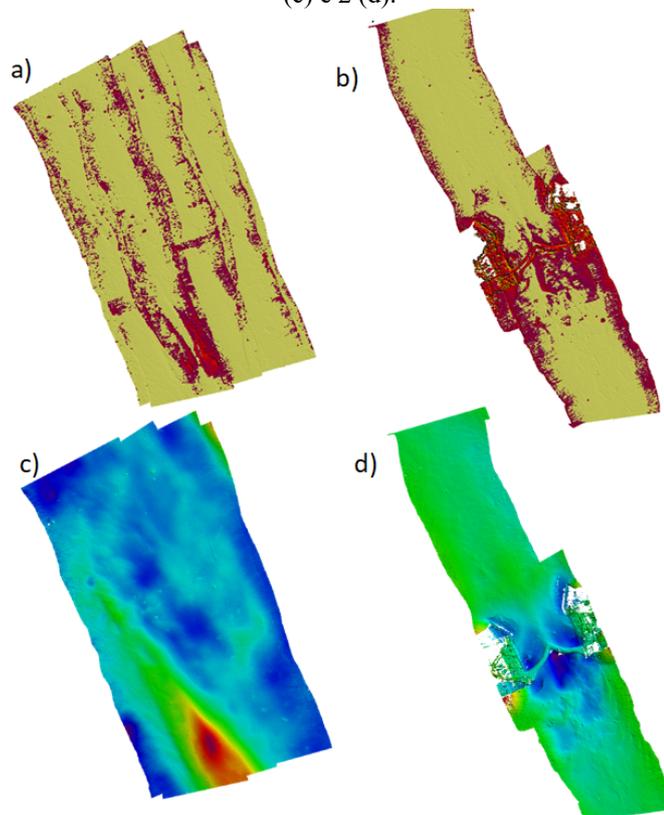


Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Após análise dos gráficos da figura 50 e 52, percebe-se que grande parte das diferenças de profundidades consideradas encontra-se na faixa de até 20 cm. Seus máximos são 1,4 m e 5,7 m, respectivamente, onde nos gráficos definem os limites dos mesmos. O máximo referente à área 1 é relativo à elevação, onde há maior ambiguidade de possibilidades, conforme já discutido; e referente à área 2 é relativo à incerteza gerada pelos pilares da ponte elevadiça (figura 51) onde o sensor não conseguiu definir com precisão o fundo e o pilar.

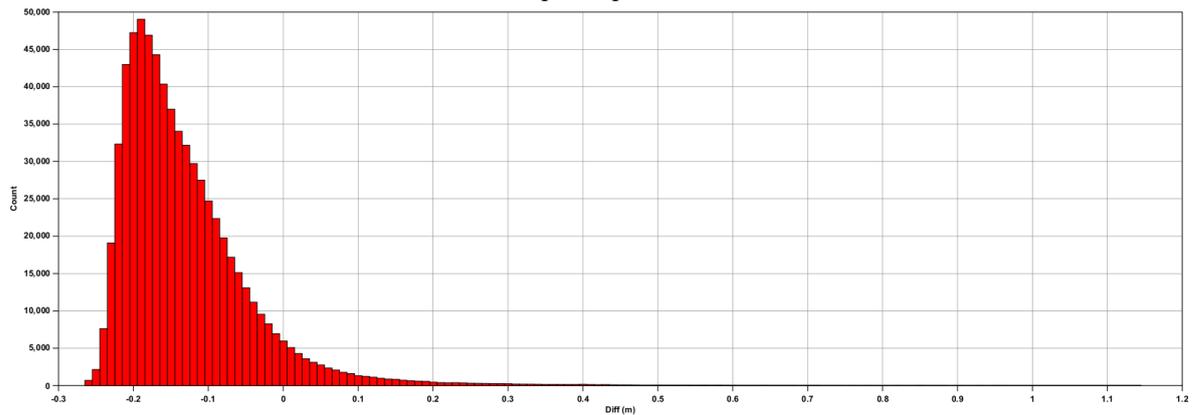
Para a verificação do enquadramento dos nós à máxima TVU aceita, utilizou-se a equação (1) da S-44 com os parâmetros ‘a’ e ‘b’ relativos à ordem especial e a camada *depth*, no próprio programa Caris Hips para gerar uma superfície com os valores de incerteza vertical máximos por nó, aceitos por essa ordem. Após foi realizada a diferença entre a Superfície da Variação Vertical de Profundidades anteriormente gerada e a superfície da incerteza vertical máxima para cada nó. Com isso, obteve-se um histograma com esta diferença para cada área (excluídos os pilares da ponte elevadiça), onde para valores menores/igual à 0 (zero), região em amarelo na figura 53, significa que a variação vertical do nó foi menor do que a máxima variação vertical permitida para aquela profundidade.

**Figura 53** - Áreas 1 (a) e 2 (b) onde as regiões em vermelho/vinho representam os nós onde a variação vertical ultrapassou o limite máximo imposto pela ordem especial da S-44 comparadas com as camadas *depth* das áreas 1 (c) e 2 (d).



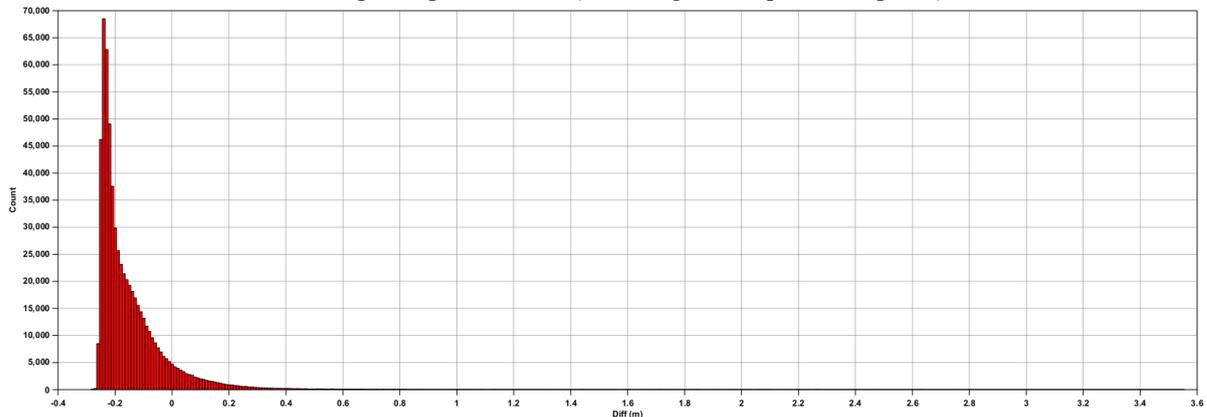
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 54** - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem especial para a área 1.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 55** - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem especial para a área 2 (sem a região dos pilares da ponte).



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

De posse desses resultados, foi feita a relação percentual da quantidade de nós com valores abaixo de 0 (zero), ou seja, dentro da tolerância de incerteza. Com isso, chegou-se nos valores aproximados da tabela 11.

**Tabela 11** - Percentual de nós dentro da tolerância máxima da incerteza vertical relativos às áreas 1 e 2 com base na ordem especial da S-44.

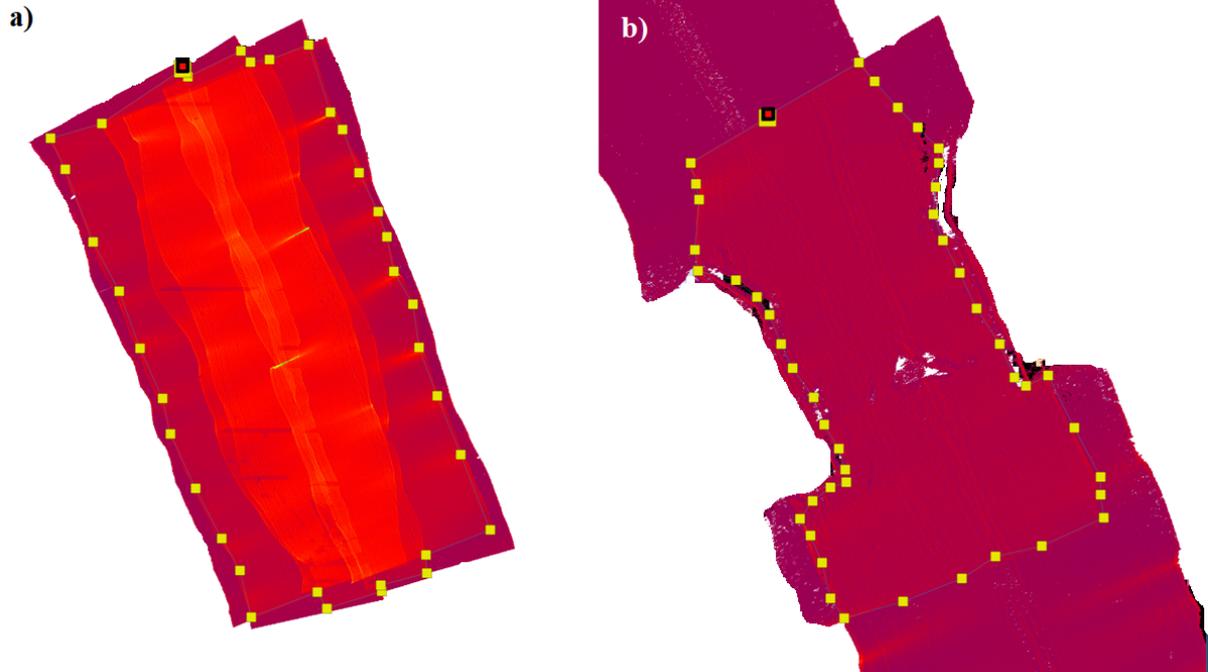
	Percentual de nós dentro da tolerância máxima
Área 1	91,81%
Área 2	91,07%

Fonte: elaborado pelo autor.

Quando se repete os cálculos acima para verificação do enquadramento para ordem exclusiva, segundo a S-44, foram separadas (com o auxílio da camada *density* para melhor seleção das regiões) as regiões das áreas 1 e 2 onde o recobrimento foi de 100% (cobertura

batimétrica de 200%), ou seja, onde se tem informação do fundo proveniente de duas ou mais linhas de sondagem concorrentes.

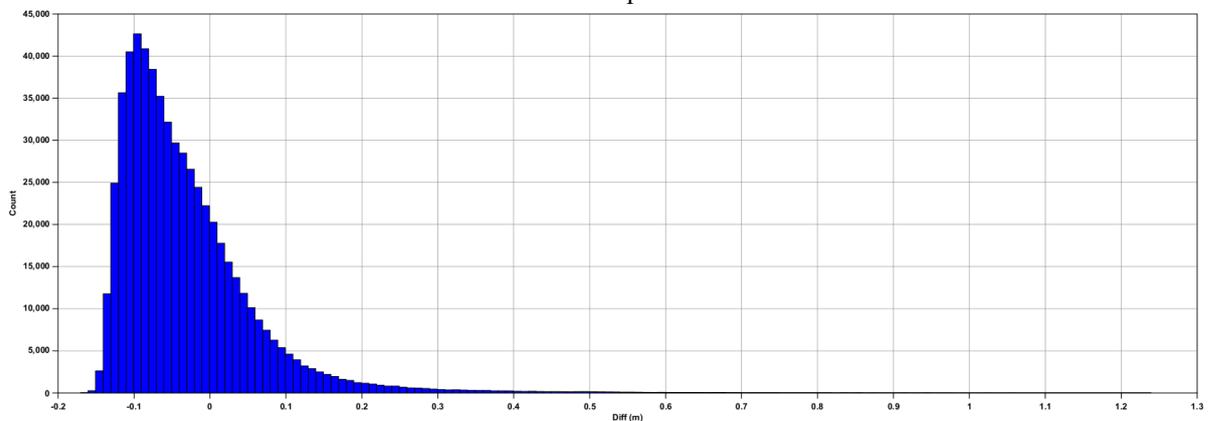
**Figura 56** - Região delimitada por pontos amarelos da área 1 (a) e região delimitada por pontos amarelos da área 2 (b), ambas onde o recobrimento foi de 100% (cobertura batimétrica de 200%).



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

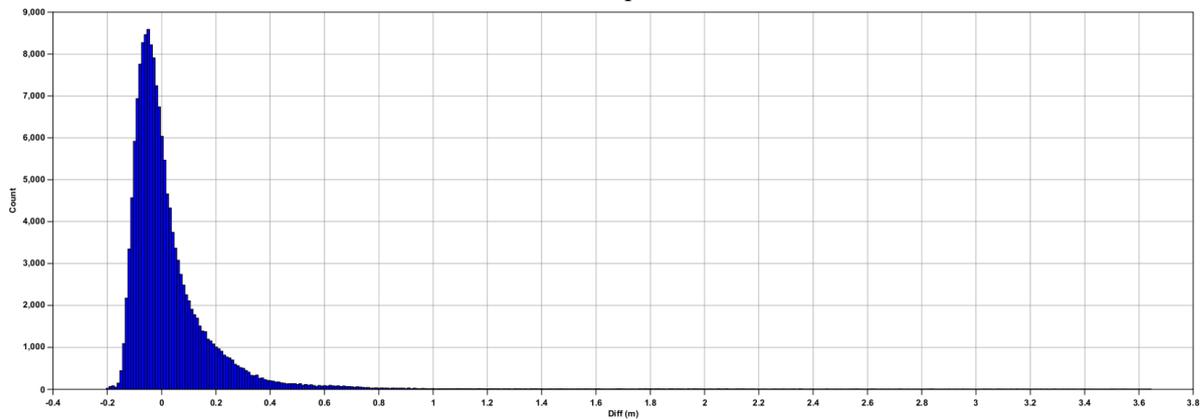
Refazendo-se as contas utilizando novamente a equação (1) e as superfícies previamente utilizadas, com outros valores de 'a' e 'b', foram encontrados os seguintes percentuais de nós dentro do limite máximo de tolerância da incerteza vertical.

**Figura 57** - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem exclusiva para a área 1.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 58** - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem exclusiva para a área 2.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Tabela 12** - Percentual de nós dentro da tolerância máxima da incerteza vertical relativos às áreas 1 e 2 com base na ordem exclusiva da S-44.

	Percentual de nós dentro do nível de confiança
Região da área 1	77,00%
Região da área 2	59,73%

Fonte: elaborado pelo autor.

Portanto foi observado que por ser a ordem exclusiva muito mais rigorosa, a diferença entre os nós foi considerável, dentro do limite máximo da tolerância vertical.

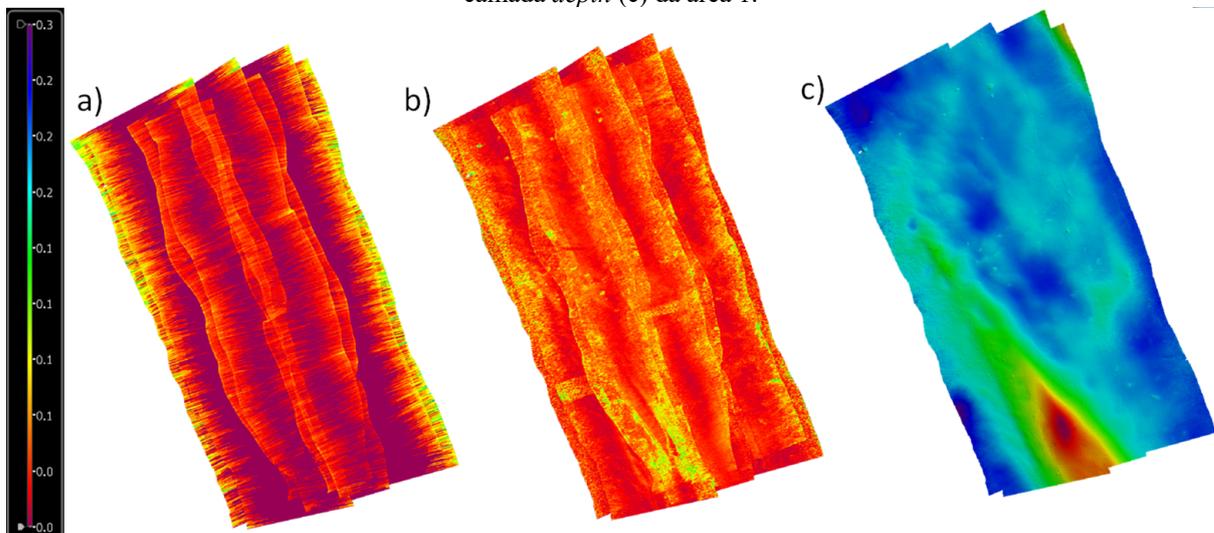
#### 4.1.1.6 Controle de Qualidade

Para se ter uma ideia da qualidade da sondagem e dos dados coletados com todos os equipamentos envolvidos no LH, é necessário que se faça um controle baseado em incertezas e seja verificado se o que foi feito atende às expectativas esperadas, de acordo com as ordens da S-44. Entretanto o “controle de qualidade não deve ser interpretado como uma questão de números ou cálculos, mas sim como uma revisão completa de todos os fatores que podem, de alguma maneira, afetar o levantamento” (OHI, 2020). Muito ainda se é discutido em relação à forma mais eficaz de realização do controle qualidade. Segundo a OHI (2020) “existem três importantes campos que devem ser levados em consideração quando se deseja atingir um determinado nível de qualidade: Material, Procedimentos e Pessoal”. Esta definição é algo muito subjetivo e tal nível é difícil de ser mensurado, pois os resultados dos cálculos das

incertezas *a priori* podem se mostrar pequenos, porém, se existir algum erro de procedimento durante a realização do LH, o algoritmo, muitas vezes, fica incapacitado de reconhecer e admite que o LH está confiável, o que nem sempre será verdadeiro. Para mitigar esses efeitos, uma das soluções é realizar linhas de verificação para comparação com os valores das profundidades das linhas regulares e então é feito um cálculo de enquadramento nas Ordens da S-44, porém, mais uma vez, “não indicam acurácia absoluta uma vez que os dados são coletados a partir da mesma plataforma de sondagem e, neste caso, há um grande número de fontes de incertezas comuns em potencial” (FERREIRA, 2018). Portanto as principais ferramentas do controle de qualidade são: (i) a utilização de procedimentos padronizados; (ii) equipamentos precisos; (iii) pessoal capacitado; e (iv) atenção em todas as etapas do LH, desde o seu planejamento.

Nesta seção foram avaliadas as incertezas *a priori* e, quando possível, foram utilizadas linhas do *patch test* como próprias linhas de verificação na área 1. Foram analisadas as camadas *uncertainty* e *standard deviation* da superfície CUBE.

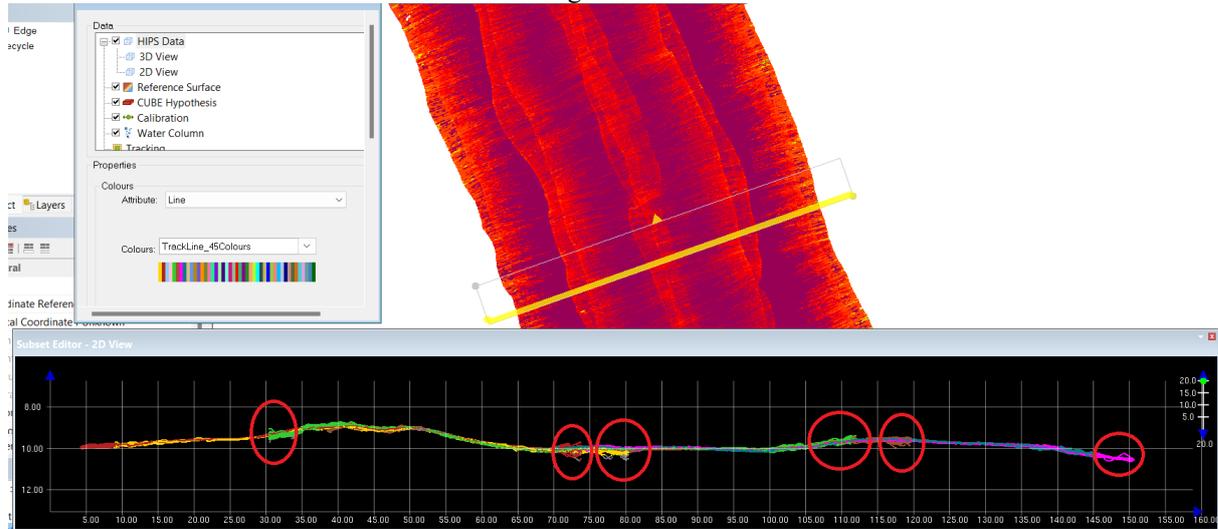
**Figura 59** - Camada *uncertainty* (a) e camada *standard deviation* (b) da superfície CUBE comparadas com a camada *depth* (c) da área 1.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Ao observar a figura 59 (a), percebe-se que a incerteza é maior nos feixes extremos das linhas de sondagem da área 1. Para exemplificar abaixo, na figura 60, tem-se o que acontece com as sondagens exatamente nestas regiões, onde a incerteza é relativamente maior.

**Figura 60** - Feixes mais externos, demarcados em vermelho, de uma seção transversal à 6 (seis) linhas de sondagem da área 1.

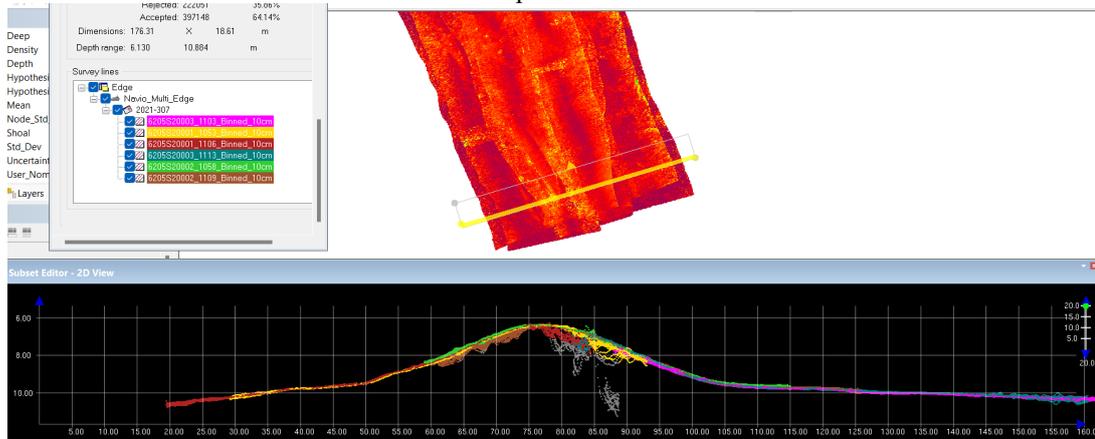


Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Acima pode ser verificado que exatamente na extremidade horizontal dos feixes, a variação vertical aumenta significativamente, com isso, a incerteza relativa a estas sondagens aumenta da mesma forma, diminuindo a precisão. Podem ser inferidas 3 possibilidades a partir desta observação: o filtro utilizado no pré-processamento dos dados 1 - filtrou os dados mais próximos ao nadir; 2 - não filtrou todos os dados das extremidades dos feixes; 3 – a sensibilidade do equipamento é afetada nos feixes mais extremos; ou simplesmente 4 – há a necessidade de filtragem manual nessas regiões. A opção 2 é a mais provável que se tenha ocorrido, visto que há um “corte” visível nos limites das linhas, provavelmente gerado pelo filtro de variância e também baseado nas outras observações como densidade dos dados e quantidade de pontos para geração dos nós. Entretanto nada impede que a opção 4 seja realizada com mais afincio para uma melhora nos resultados da superfície final.

Ainda sobre a figura 59 (b), falando-se em desvio padrão, há a mesma tendência de se concentrarem nas extremidades dos feixes, porém aqui também apresentam um aumento no seu valor na região onde há uma elevação.

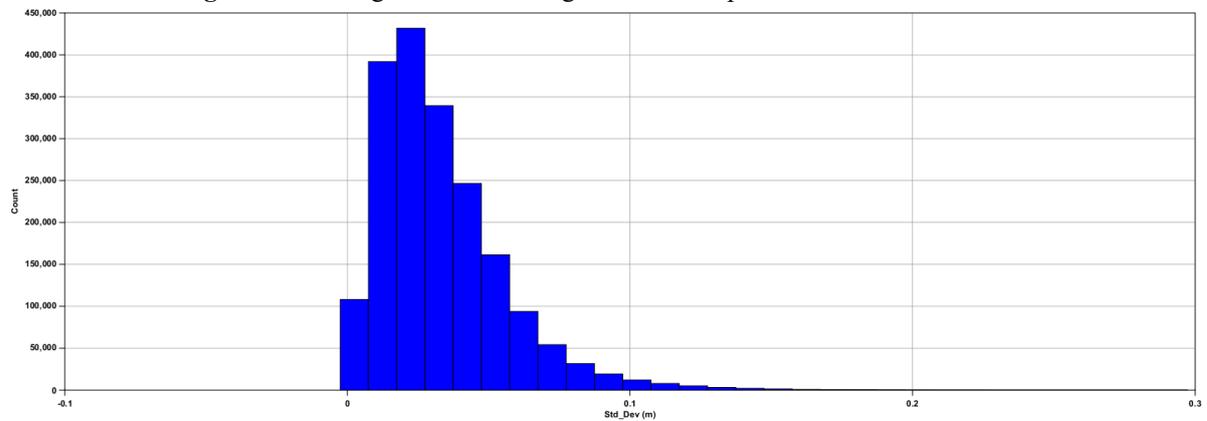
**Figura 61** - Seção transversal a 6 (seis) linhas de sondagem, relacionando a elevação com o aumento no desvio padrão.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Ainda com relação ao desvio-padrão, este mostrou-se mais acentuado que as incertezas relativas aos feixes mais extremos, devido justamente às incertezas verticais presentes na área 1, com uma variação de 0 a 0,3, concentrando-se prioritariamente na faixa entre 0 e 0,1, valores julgados pertinentes à um LH.

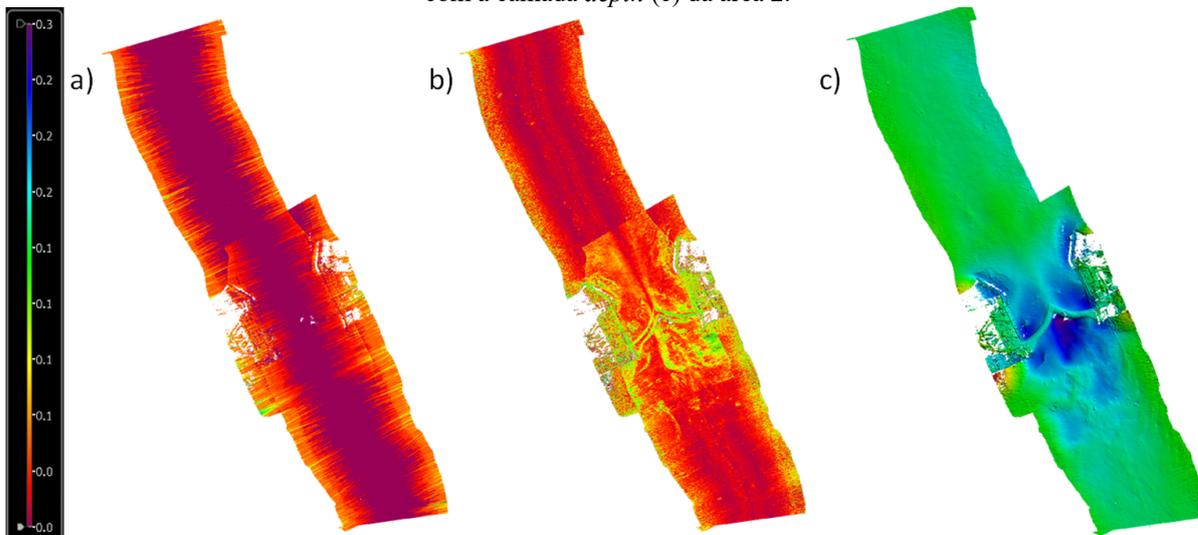
**Figura 62** - Histograma da amostragem do desvio-padrão distribuído na área 1.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Com relação à área 2, também foram analisadas as camadas *uncertainty* e *standard deviation*.

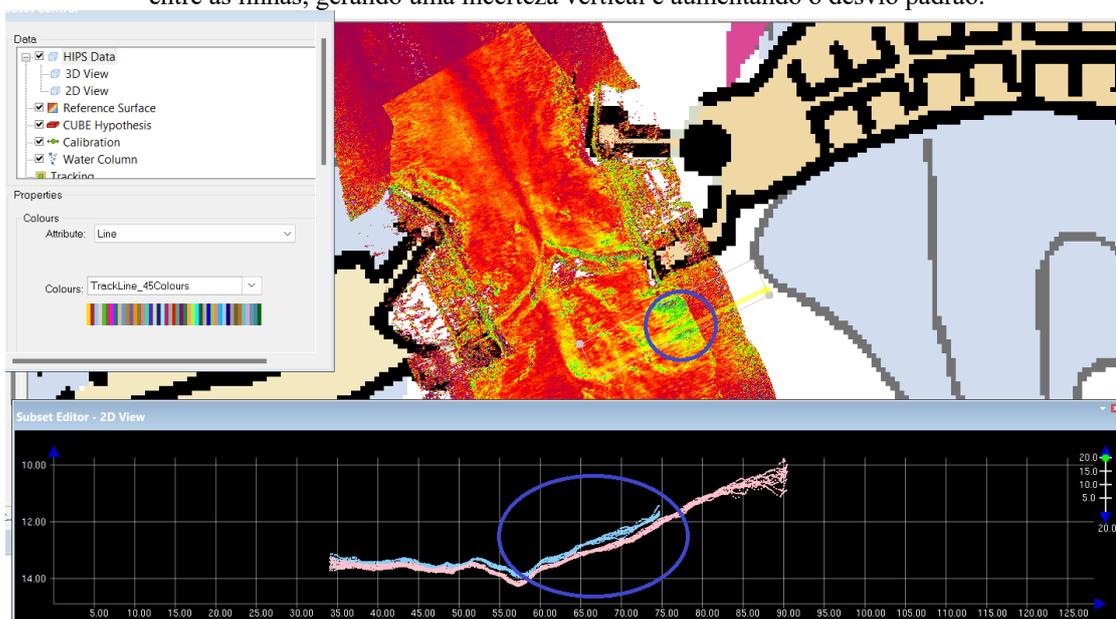
**Figura 63** - Camadas *uncertainty* (a) e camada *standard deviation* (b) da superfície CUBE comparadas com a camada *depth* (c) da área 2.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Na figura 63 acima, igualmente ocorreu com a área 2, as fontes de incerteza se concentram nos feixes mais extremos das linhas de sondagem, enquanto o desvio padrão é mais alto na região onde há maior incerteza vertical (justamente na sustentação da ponte elevada) e em alguns pontos onde houve um pequeno “descasamento” das linhas, mesmo tendo sido feita a calibração de acordo com o *patch test*. “A existência de qualquer erro grosseiro ou sistemático não corrigido na aquisição ou processamento dos dados tende a produzir um ‘descasamento’ entre linhas de sondagem adjacentes e com varreduras sobrepostas” (NORMAM-25). LH’s onde exista “descasamento entre linhas de sondagem não são aproveitados para fins de atualização de documentos náuticos no âmbito da DHN” (NORMAM-25), ou, pelo menos, significa que devem ser reavaliadas todas as suas etapas de produção. Entretanto aqui, o descasamento foi pontual, indicando que provavelmente o equipamento, por alguma falha na hora de adquirir os dados ou por se tratarem de dados espúrios, resolveu de forma equivocada determinada região.

**Figura 64** - Seção transversal a 2 (duas) linhas de sondagem na área 2 destacando-se, em azul, o descasamento entre as linhas, gerando uma incerteza vertical e aumentando o desvio padrão.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Desconsiderando o descasamento entre linhas e levando em consideração os dois principais fatores, incerteza e desvio padrão, contribuintes para a avaliação quanto à adequação às ordens da S-44, as áreas 1 e 2 foram avaliadas separadamente, por apresentarem características distintas.

Ademais, para adequação às ordens supracitadas, é interessante que sejam avaliadas as superfícies CUBE geradas com a metade da resolução de detecção de estruturas/feições propostas pela S-44, segundo Pimentel (2018).

Para tal, relembra-se novamente a diferença de rigorosidades entre a S-44 e a NORMAM-25, onde esta é mais rígida para Ordens Especial e 1A e ainda não foi atualizada contemplando a Ordem Exclusiva. Por se tratar da Ordem mais rígida existente pressupõe-se exigência similar de recobrimento 100% (cobertura batimétrica de 200%) da área. Neste trabalho, como não foram disponibilizados dados completos dos LH's realizados, as linhas de verificação utilizadas para a geração do QC report (relatório de controle de qualidade) foram as próprias linhas de *patch test* (área 1). Para uma verificação *a priori* da qualidade das áreas 1 e 2, ou seja, utilizando apenas como parâmetro as camadas *uncertainty* e *standard deviation*, utilizando a opção do programa Caris onde ele escolhe o que for maior dos 2, os seguintes valores da tabela 13 foram encontrados quando gerado o QC report apenas das superfícies (sem linhas de verificação).

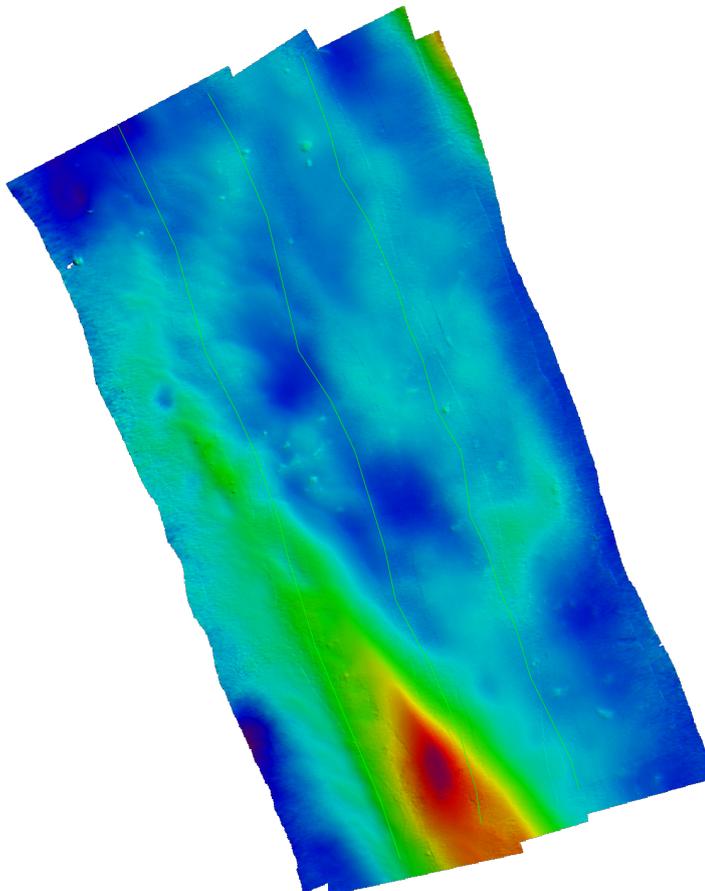
**Tabela 13** - Relação de detecção de estruturas/feições com resolução da superfície analisada, de acordo com as incertezas *a priori* das ordens previstas na S-44.

	Detecção de estruturas/feições	Resolução da superfície CUBE analisada	Área 1	Área 2
Ordem exclusiva	> 0.5 m	0.25 m	97,83%	81,81%
Ordem especial	> 1 m	0.5 m	99,97%	97,67%
Ordem 1A	> 2 m (até 40 m); 10% (áreas com profundidades > 40 m)	0.5 m	100%	99,99%
Ordem 1B	Não especificado	0.5 m	100%	99,99%
Ordem 2	Não especificado	0.5 m	100%	100%

Fonte: elaborado pelo autor.

Portanto como a área 1 foi sondada com a finalidade de *patch test*, ou seja, 6 linhas sendo 3 concomitantes entre si, o que não reflete um LH de ordem especial, para o cômputo da adequação da porcentagem de nós aceitos foram utilizados somente 3 linhas de sondagem espaçadas numa média de 25 metros entre si (figura 65), consideradas como linhas regulares. Enquanto para a ordem exclusiva relativa às áreas 1 e 2, por exigir a cobertura batimétrica de 200%, foram utilizadas as regiões da figura 56 novamente, delimitadas manualmente diretamente no Caris.

**Figura 65** - 3 (três) linhas de sondagem e superfície com resolução de 50 cm consideradas para geração do *QC report* relativo à ordem especial da área 1.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Ainda utilizando as linhas regulares da figura 65, nesta área foi possível avaliar o *QC report* utilizando linhas de verificação, onde foram consideradas estas 3 linhas regulares e 3 linhas de verificação concomitantes. Após essa avaliação foi possível chegar ao resultado da tabela 14.

**Tabela 14** – *QC report* relativo à superfície CUBE com resolução de 25 cm.

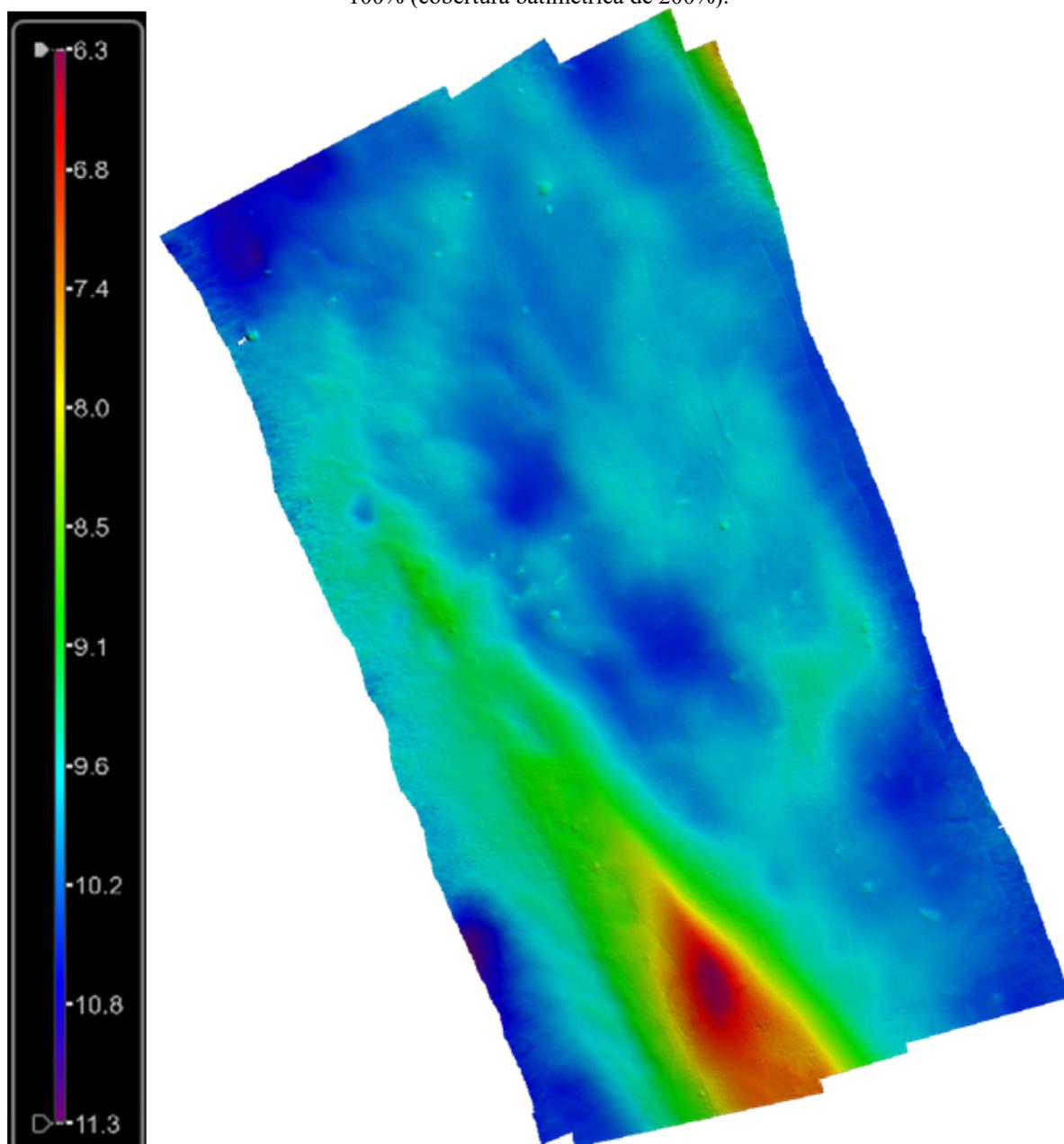
	Área 1
Ordem exclusiva	-
Ordem especial	99,45%
Ordem 1A	99,93%
Ordem 1B	99,93%
Ordem 2	100%

Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.1.1.7 Superfícies Finais e Considerações

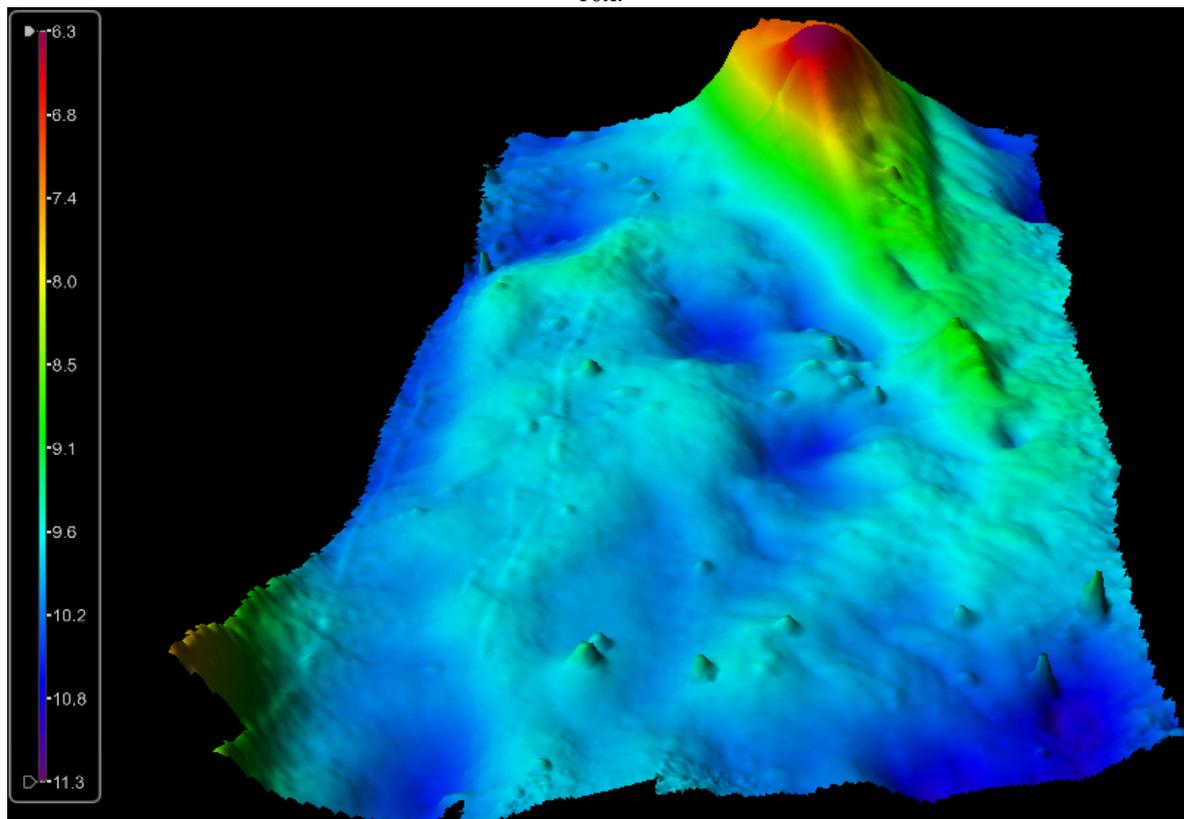
Como as áreas apresentaram potencial para classificação em ordens de aceitação diferentes segundo a S-44, foram geradas superfícies separadamente com resoluções diferentes, sendo a área 1 potencialmente aceita na ordem exclusiva e a área 2 potencialmente aceita na ordem especial, utilizando o controle de qualidade *a priori*.

**Figura 66** - Camada *depth* da superfície CUBE com resolução de 25 cm da área 1 onde o recobrimento foi de 100% (cobertura batimétrica de 200%).



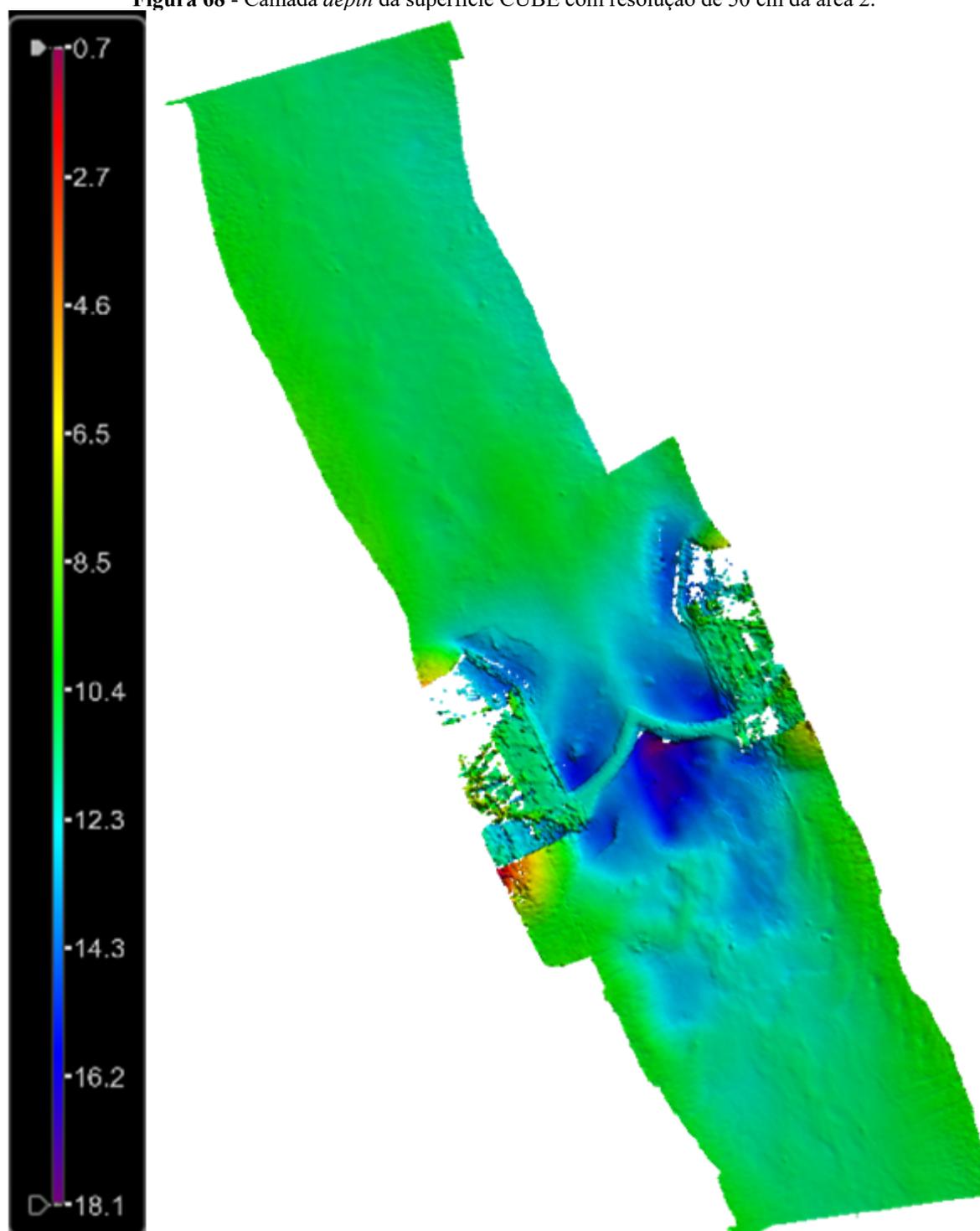
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 67** - Camada *depth* da superfície CUBE com resolução de 25 cm da área 1 em vista 3D com exagero de 10x.



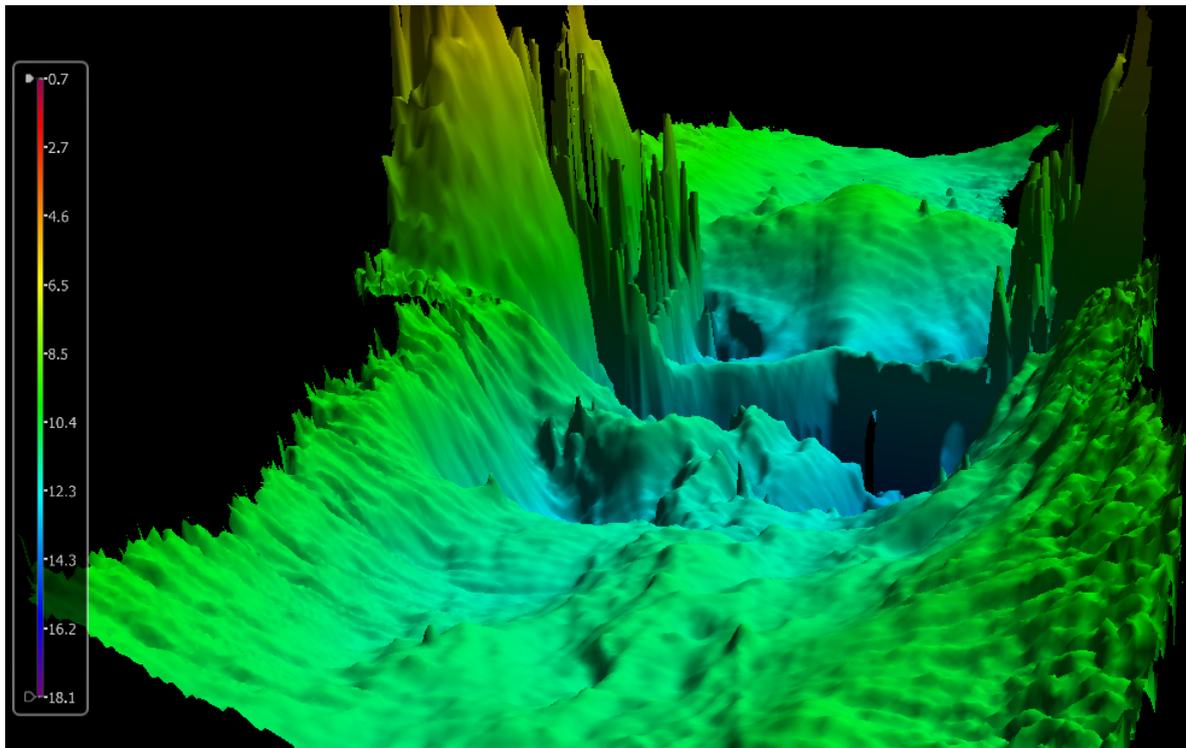
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 68** - Camada *depth* da superfície CUBE com resolução de 50 cm da área 2.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 69** - Camada *depth* da superfície CUBE com resolução de 50 cm da área 2 em vista 3D com exagero de 10x.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Após análise dos resultados, avaliando-se as premissas 1 e 2 do capítulo 1:

1 – Os dados foram adquiridos da forma como determina a NORMAM-25? Não em sua totalidade. A NORMAM-25 exige que exista uma cobertura batimétrica de 200% da área do LH e aqui somente parte dos dados disponibilizados cumpriram tal requisito. Por este motivo, nem todas as áreas sondadas poderiam gerar produtos cartográficos em conformidade com as normas em vigor no Brasil.

2 – Houve uma filtragem inicial dos dados, antes da disponibilização para geração das superfícies batimétricas deste trabalho? Sim, houve uma filtragem inicial que possibilitou a utilização dos dados diretamente no Caris Hips, entretanto tal filtragem não permitiu que fossem analisados os dados brutos gerados pelos equipamentos nem avaliar o quanto destes dados foi perdido. O fundo aqui, como não pôde ser feita uma avaliação das incertezas *a posteriori*, pode não representar o fundo real da região.

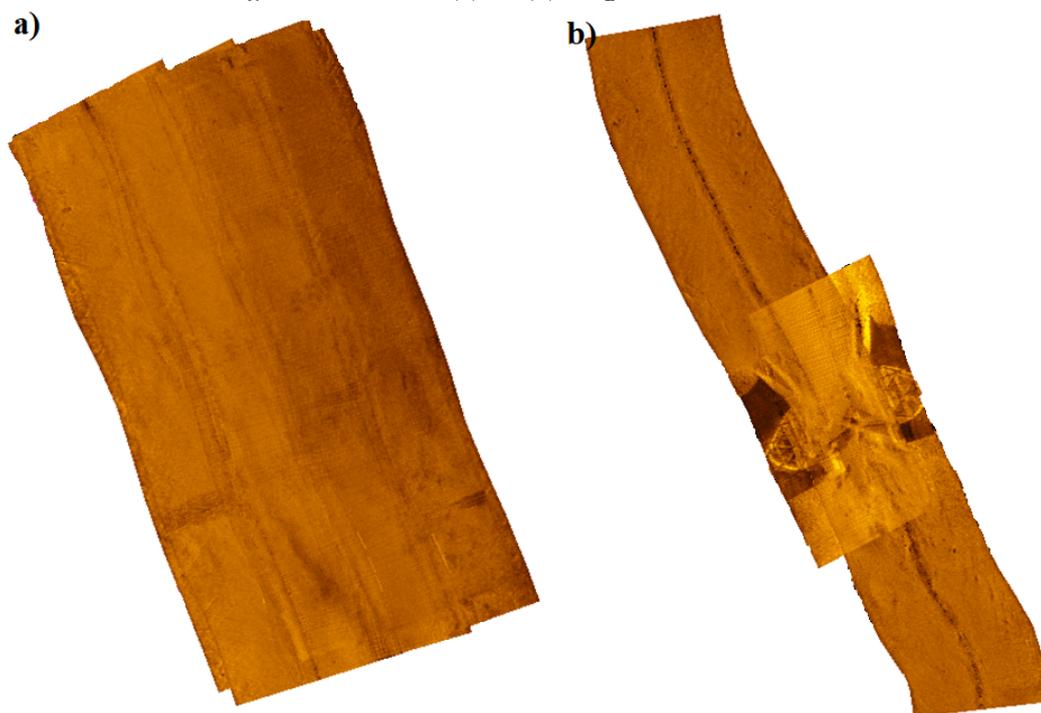
Percebeu-se que os dados do equipamento obtiveram potencial para atingir Ordem exclusiva em uma região e especial em outras; e sua densidade de dados mostrou-se um ponto

forte da tecnologia. Com isso, foi possível alcançar ótima resolução de fundo, com um nível muito bom de detalhamento. As incertezas *a priori* envolvidas não prejudicaram o resultado. Poucos pontos ficaram sem informação, como na região mais profunda no meio do canal, embaixo da ponte elevadiça.

#### 4.1.2 Imageamento

Após ter sido realizado o processamento descrito no capítulo 3, tem-se uma visão geral do imageamento das áreas 1 e 2.

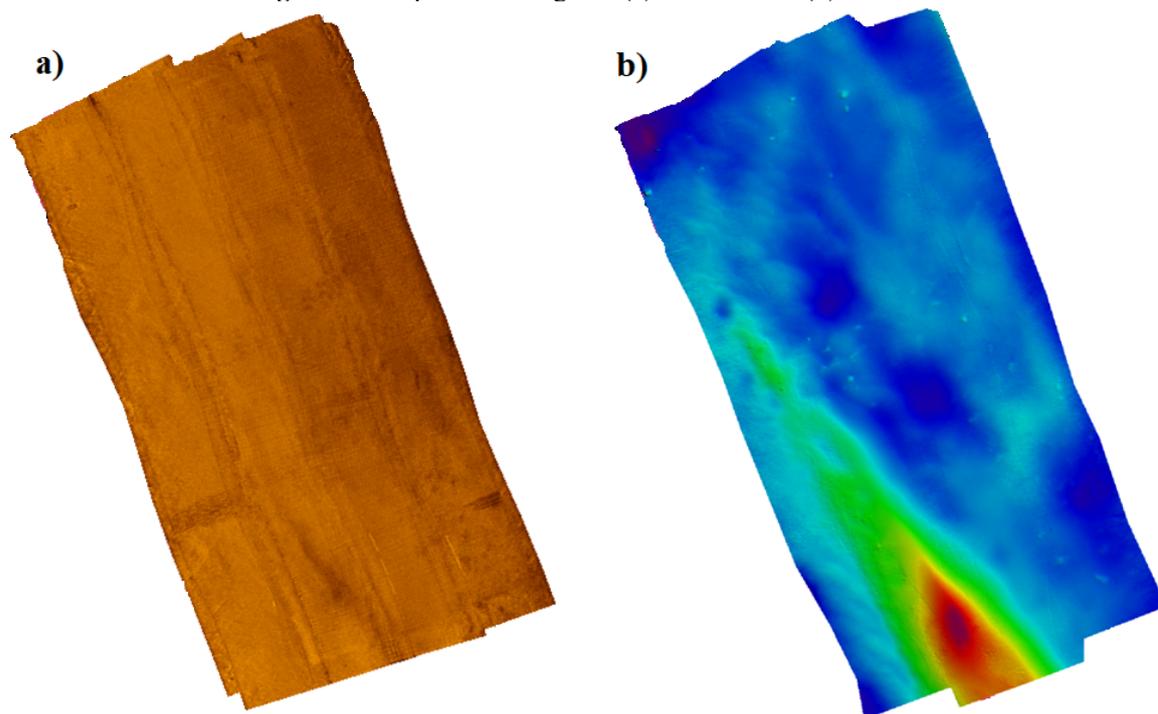
Figura 70 – Áreas 1 (a) e 2 (b) imageadas com o 6205s2.



Fonte: elaborado pelo autor no SonarWiz 7.

De posse das imagens, foi possível realizar a análise comparando a superfície batimétrica gerada anteriormente com o imageamento dessas mesmas áreas.

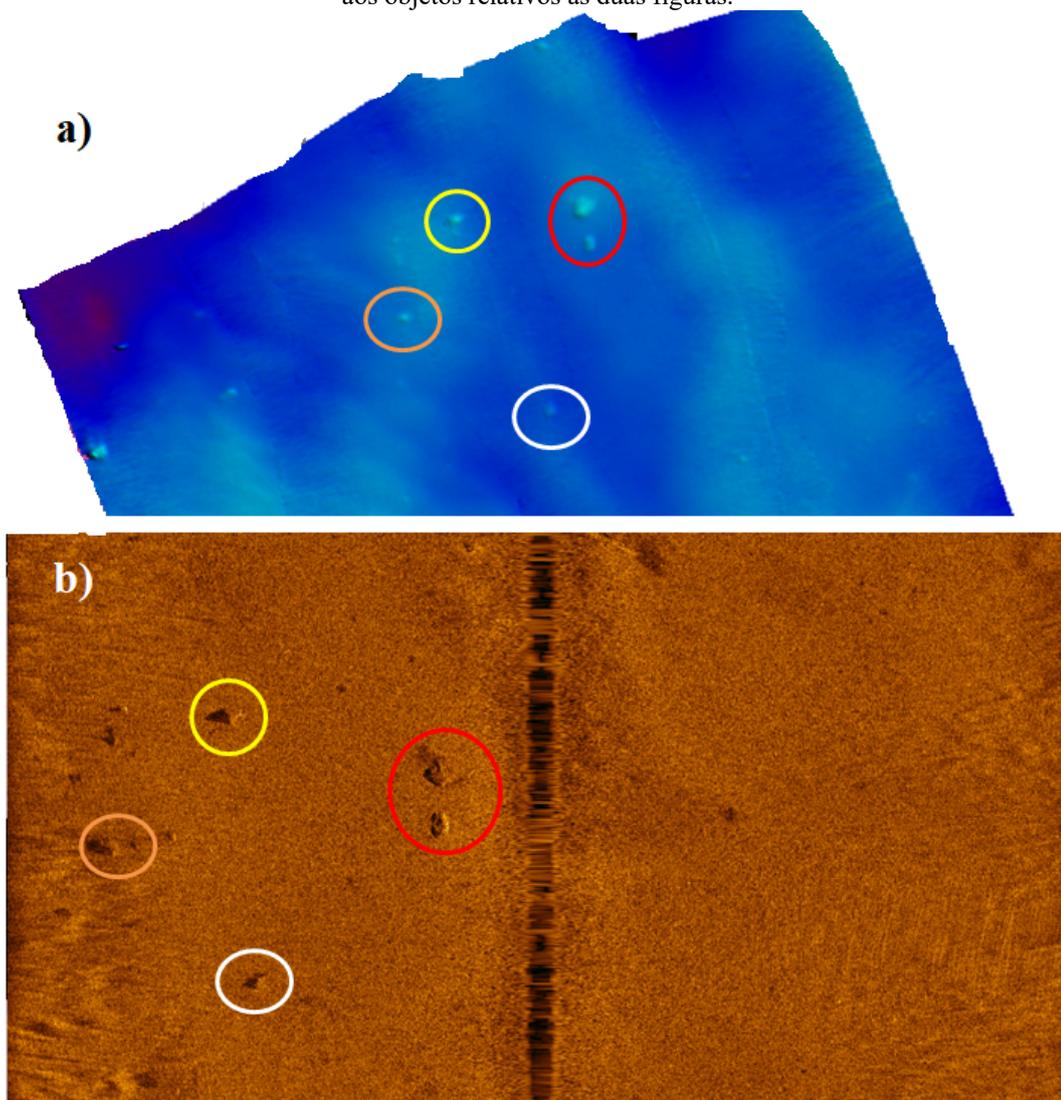
**Figura 71** - Superfícies imageada (a) e batimétrica (b) da área 1.



Fonte: elaborado pelo autor no SonarWiz 7 (a) e Caris Hips 10.4 (b).

Com isso, foi possível analisar o detalhamento do fundo e sanar quaisquer dúvidas que porventura surgiram em relação à superfície batimétrica, com esta última servindo de base para os produtos batimétricos. Vale ressaltar que as imagens não contêm as profundidades e servem apenas para identificação de alvos (objetos de interesse).

**Figura 72** - Análise da superfície batimétrica (a) utilizando o imageamento (b) com a correspondência de cores aos objetos relativos às duas figuras.

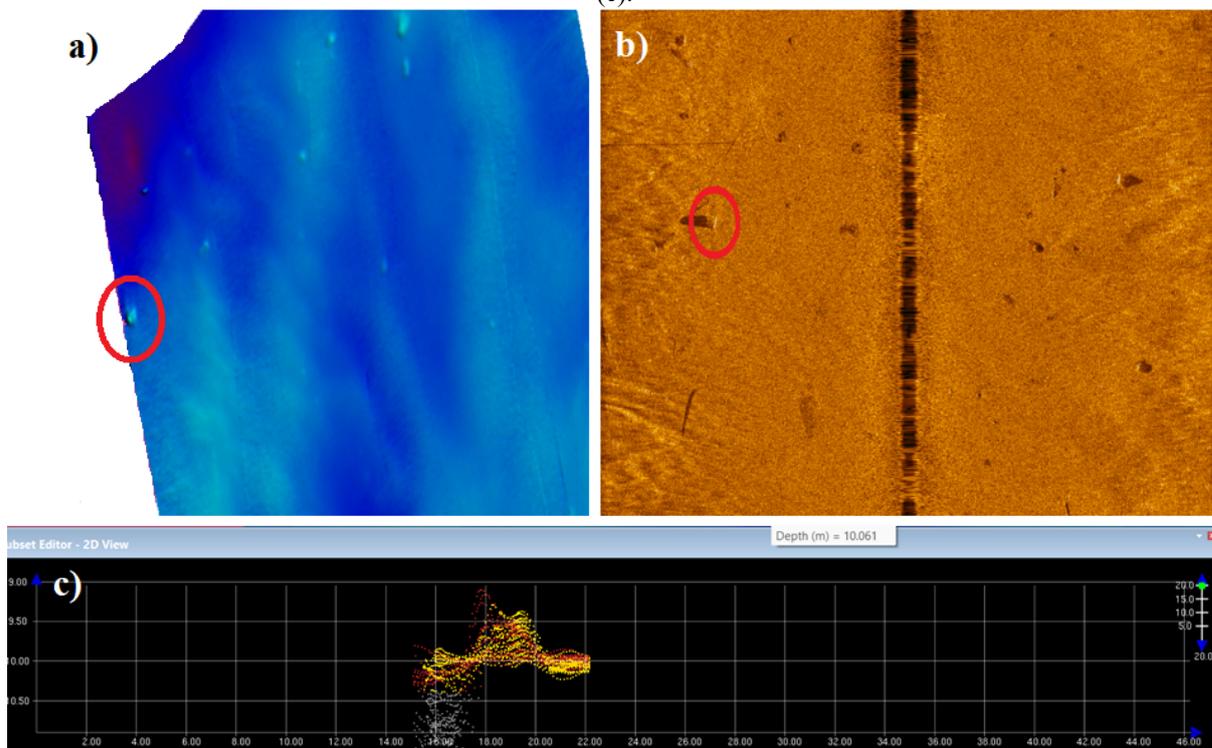


Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4 (a) e SonarWiz 7 (b).

Para a análise dos alvos foram utilizadas as coordenadas latitude e longitude em ambas as superfícies para associação das feições.

Tal comparação mostrou-se interessante justamente por conseguir identificar com detalhe as pequenas elevações resultantes da superfície batimétrica. Para exemplificar, na figura 73 abaixo enquanto a superfície batimétrica apresenta somente uma elevação, no imageamento é possível identificar esta elevação como sendo uma poita com um cabo amarrado.

**Figura 73** - Comparação entre a superfície batimétrica (a) e a imagem (b) da área 1 com a respectiva batimetria (c).

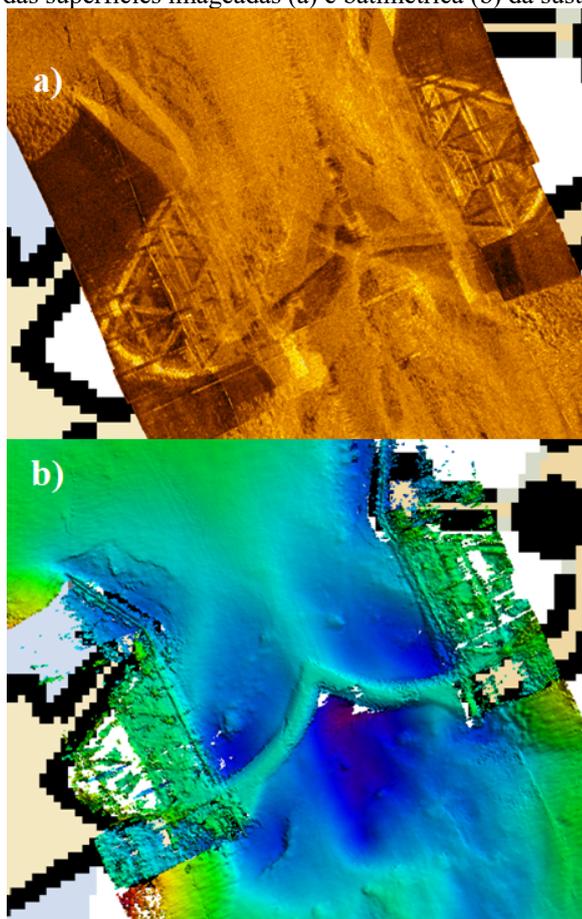


Fonte: elaborado pelo autor no SonarWiz 7 (b) e Caris Hips 10.4 (a)(c).

Esta ferramenta permite que seja identificado se alvos no fundo são de origem natural ou antrópica, possibilitando a análise de uma futura remoção, caso seja necessário.

Também foi possível identificar o detalhamento da sustentação da ponte e compará-la com a batimetria, previamente analisada.

**Figura 74** - Comparação das superfícies imageadas (a) e batimétrica (b) da sustentação da ponte na área 2.



Fonte: elaborado pelo autor no SonarWiz 7 (a) e Caris Hips 10.4 (b).

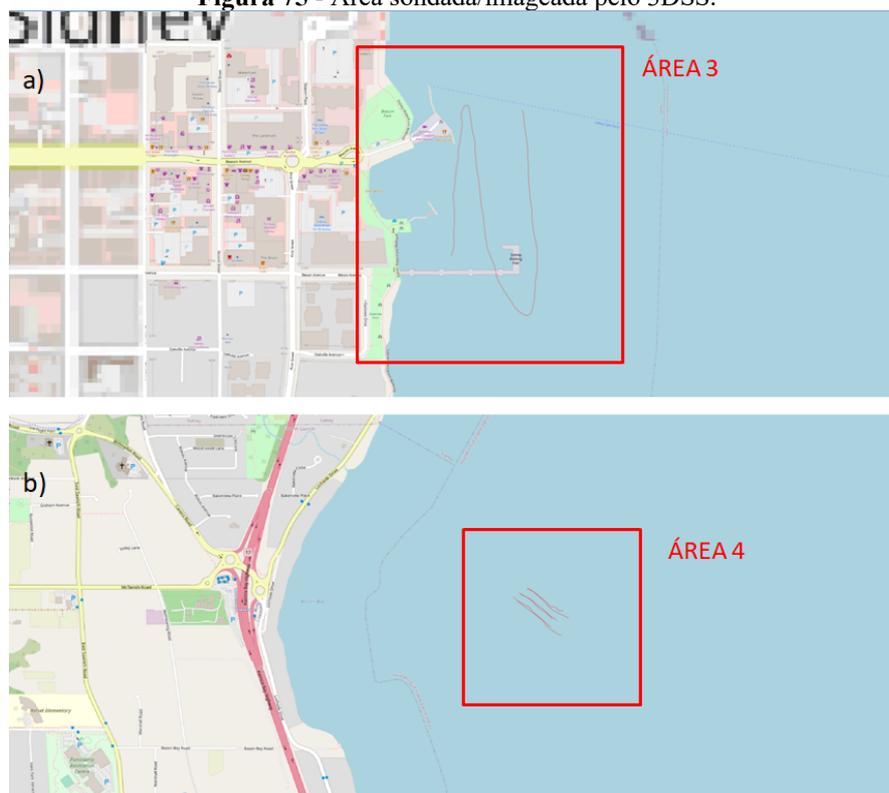
Portanto entregar batimetria e imagens, nesse caso, possibilitou uma melhor análise qualitativa do fundo sondado.

## 4.2 RESULTADOS DE BATIMETRIA E IMAGEAMENTO OBTIDOS COM O PING DSP 3DSS

### 4.2.1 Batimetria

Foram realizadas 7 (sete) linhas de sondagem em Sidney, British Columbia, Canadá, incluindo as linhas de *patch test* que também foram utilizadas para avaliação de resultados. Novamente para facilitar a comparação dos resultados, as áreas foram divididas em área 3 e área 4.

**Figura 75 - Área sondada/imageada pelo 3DSS.**



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

#### 4.2.1.1 Alcance Horizontal

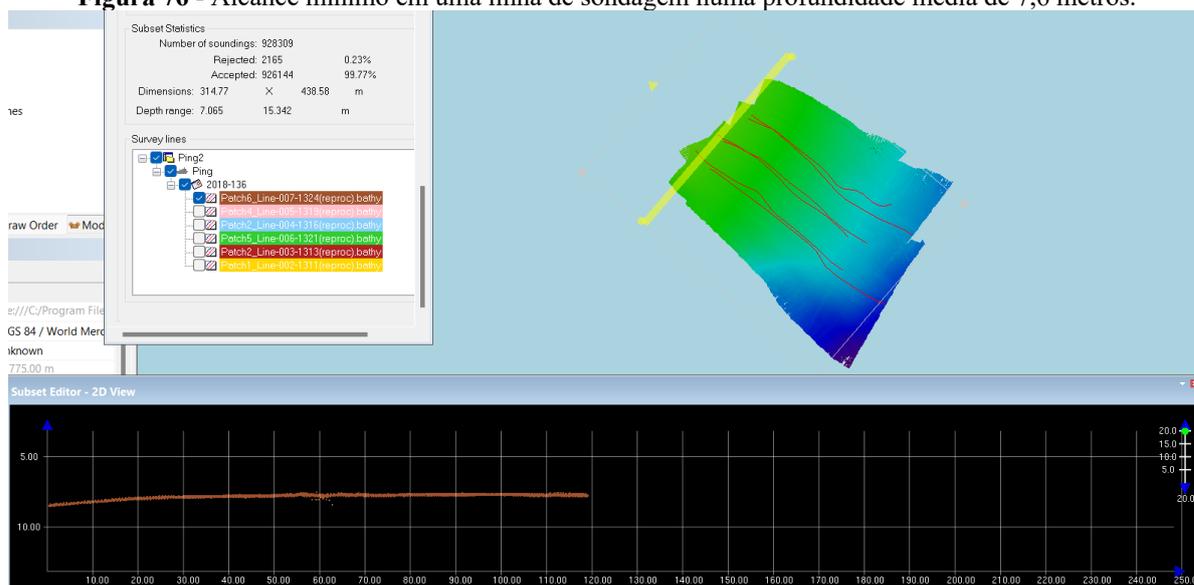
Dos dados analisados, a mínima e máxima distâncias obtidas aproximadamente, relativas aos dois lados do equipamento estão dispostas na tabela 15 e figuras 76 e 77.

**Tabela 15 - Alcance horizontal mínimo e máximo, aproximados, em uma linha de sondagem.**

	Distância	Profundidade média	Alcance em relação à profundidade
Mínima	120 metros	7,6 metros	15 vezes
Máxima	210 metros	14 metros	15,8 vezes

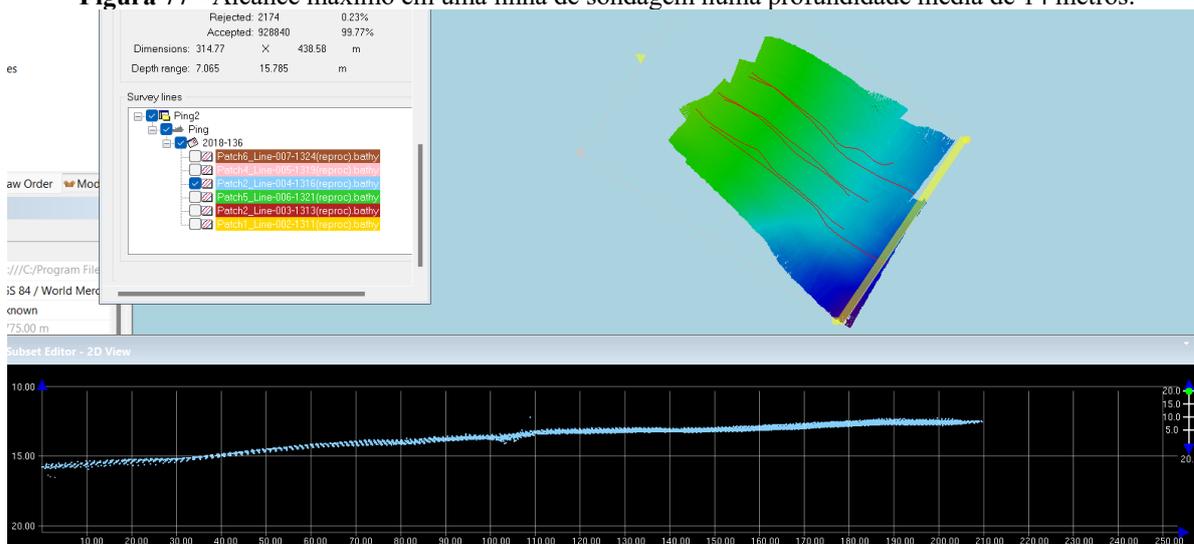
Fonte: elaborado pelo autor.

**Figura 76** - Alcance mínimo em uma linha de sondagem numa profundidade média de 7,6 metros.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 77** - Alcance máximo em uma linha de sondagem numa profundidade média de 14 metros.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Após esta análise, conclui-se que o alcance horizontal do 3DSS foi de aproximadamente 15 a 15,8 vezes a profundidade local, numa profundidade média de 14 metros; e foi aumentando conforme aumentava a profundidade, devido ao seu formato em leque até atingir os 105 metros de cada lado da embarcação.

#### 4.2.1.2 Número de Pontos de Sondagem

Conforme já discutido anteriormente no item 4.1.1.2, a tabela 16 apresenta a relação de pontos, aceitos e rejeitados, com suas respectivas porcentagens.

**Tabela 16** - Relação de pontos aceitos e rejeitados.

	Área 3	Área 4
Total de pontos	2.124.534	932.578
Aceitos	2.078.564 (97,84%)	930.404 (99,77%)
Rejeitados	45.970 (2,16%)	2.165 (0,23%)

Fonte: elaborado pelo autor.

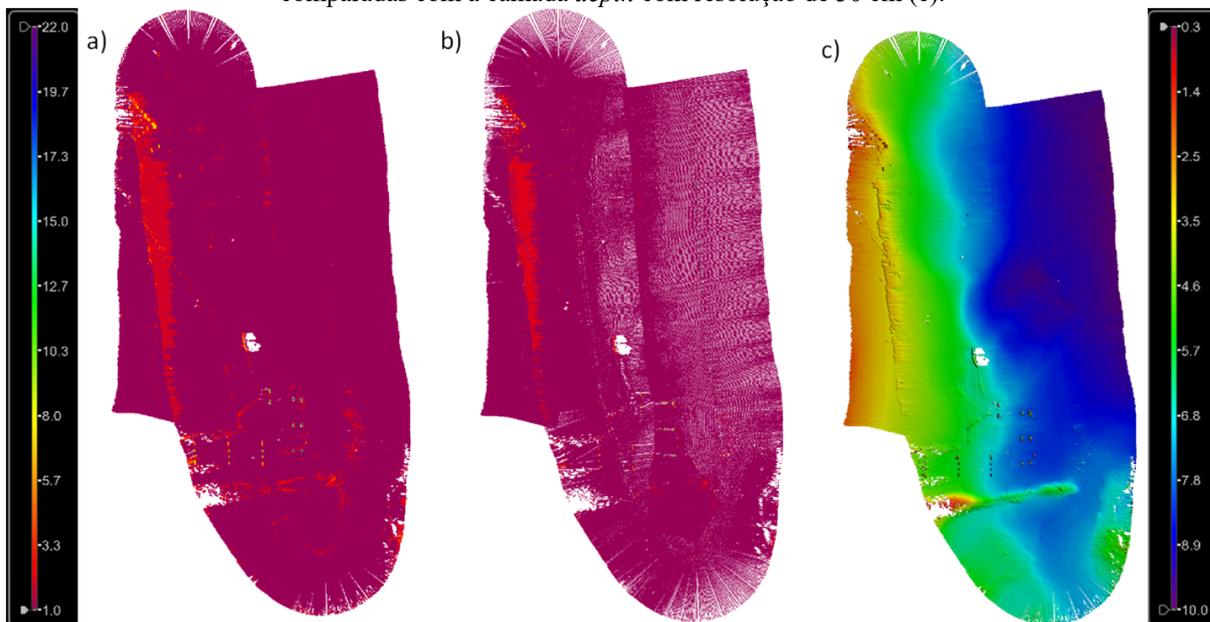
Aqui percebe-se que o número de pontos rejeitados foi muito baixo, o que significa que a maioria dos pontos adquiridos pelo equipamento foram efetivamente utilizados para a estimativa das profundidades.

#### 4.2.1.3 Quantidade de Hipóteses

Foi realizada a comparação de hipóteses geradas pelo algoritmo CUBE nas superfícies com resoluções de 50 cm e 25 cm das áreas 3 e 4.

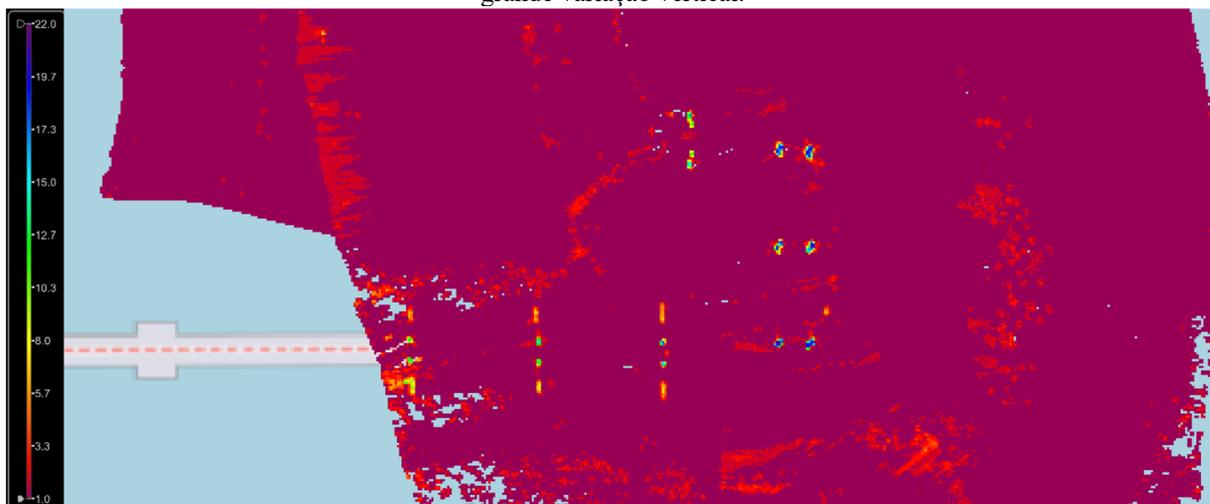
Na área 3, percebeu-se que aumentando a resolução de 50 cm para 25 cm não foi percebida tanta diferença na contagem das hipóteses, com variações de 1 (uma) a 2 (duas) hipóteses na maior parte da área, principalmente devido ao descasamento das linhas sobrepostas por conta da utilização da maré prevista; e também ficou evidente que a densidade dos dados sofreu uma queda significativa com a mudança de resolução, o que será discutido mais a frente. Outro ponto relevante observado foi a, já esperada, quantidade alta de hipóteses nos pilares dos cais, devido à grande variação vertical de profundidades nesses pontos específicos, com o algoritmo chegando a considerar até 22 hipóteses para uma destas regiões conforme mostrado na figura 79, nos pontos em azul.

**Figura 78** - Camadas *hypothesis count* da superfície CUBE da área 3 com resoluções de 50 cm (a) e 25 cm (b) comparadas com a camada *depth* com resolução de 50 cm (c).



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

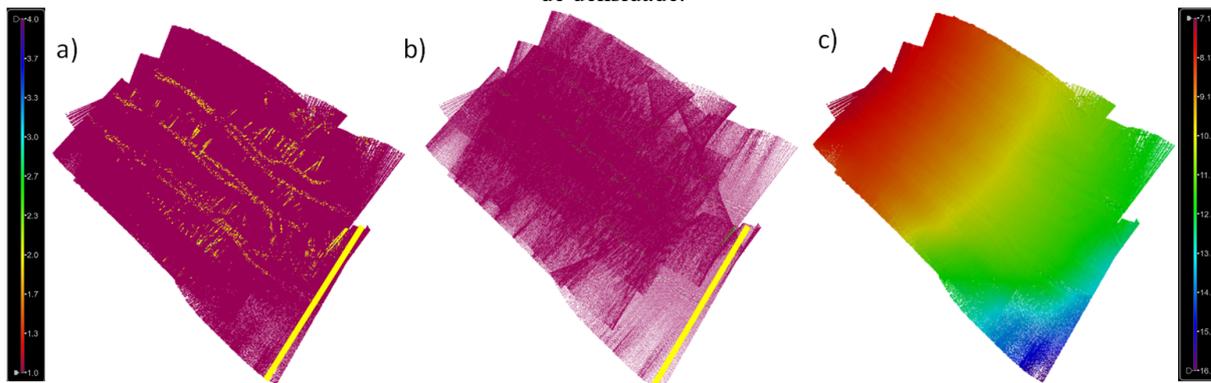
**Figura 79** - Região aproximada do cais da área 3; em azul, os pontos com maior números de hipóteses devido à grande variação vertical.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Já na área 4, como apresenta uma superfície prioritariamente plana, não houve número de hipóteses maior que 2 (duas); e mesmo assim, poucas foram as regiões onde foram consideradas 2 (duas). O mesmo fator densidade influenciou na amostragem dos dados, igualmente comparado com a área 3.

**Figura 80** - Camadas *hypothesis count* da superfície CUBE da área 4 com resoluções de 50 cm (a) e 25 cm (b) comparadas com a camada *depth* com resolução de 50 cm (c).; faixa amarela utilizada para avaliação dos dados de densidade.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

#### 4.2.1.4 Densidade dos Dados

Conforme observado anteriormente, a densidade dos dados amostrados com as diferentes resoluções influenciou na forma como os dados puderam ser observados. Com o intuito de quantificar essa diferença, na tabela 17 abaixo foi considerada uma seção transversal a uma linha de sondagem da região de aproximadamente 140m x 8m (em amarelo na figura 80) e avaliado quantos pontos contribuíram para a formação dos nós relativos às suas respectivas resoluções:

**Tabela 17** - Contribuição com o número de pontos por nó relativos à resolução da superfície.

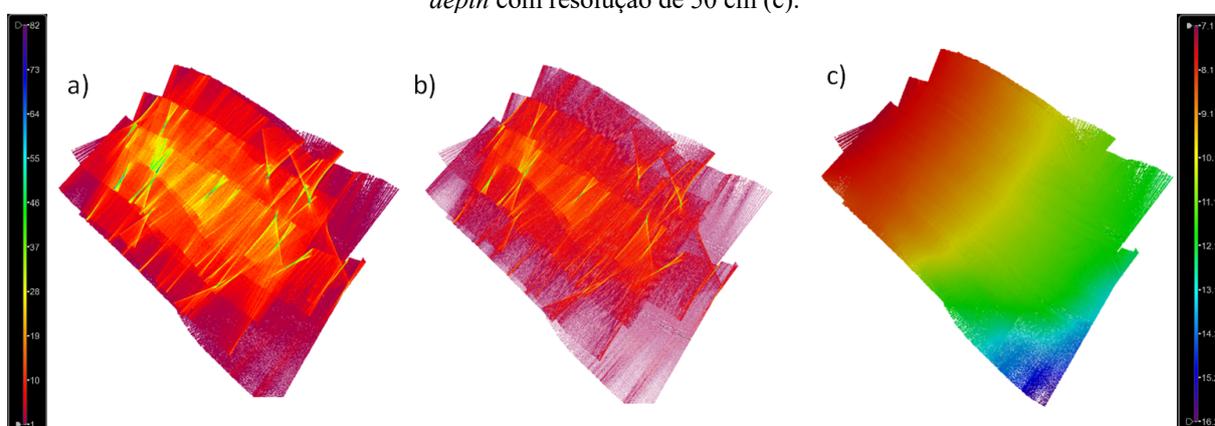
	25 cm	50 cm
Faixa transversal de 8m x 140m	1 a 7 pontos por nó	1 a 6 pontos por nó

Fonte: elaborado pelo autor.

Com isso, pode ser observado que nesse caso, o aumento da resolução da superfície não aumentou o número de pontos contribuintes para o nó, provavelmente devido à baixa densidade geral de dados na área. Na figura 81 pode ser melhor observado este fato, onde percebe-se um aumento da densidade na região central onde as 6 (seis) linhas de sondagem tornam-se concorrentes, com isso aumentando a densidade da região. Observa-se, também, que na resolução de 25 cm, nem a concorrência das linhas faz com que a densidade dos dados fique melhorada a ponto de se comparar com a resolução de 50 cm. Isso, na prática, representa pequenas regiões onde a profundidade fica desconhecida quando amostradas com

uma resolução de 25 cm, mesmo tendo-se um recobrimento de 100% (cobertura batimétrica de 200%). Tal fato provavelmente ocorreu em função do espaçamento horizontal do sinal recebido, na ordem de 25 cm ou maior, fazendo com que ficassem espaços “vazios” nestas células de resolução; ou pelo fato dos dados terem sido tão filtrados a ponto de se perder informações relevantes para a construção da superfície batimétrica; ou por alguma configuração na coleta dos dados onde se aumentou a abertura angular do feixe para que se ganhasse maior alcance horizontal.

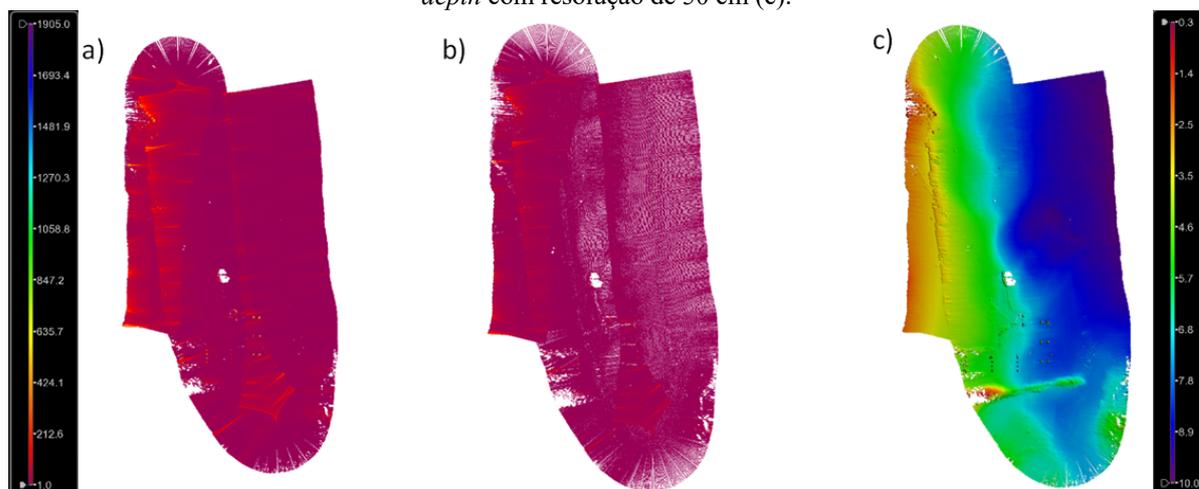
**Figura 81** - Camadas *density* da área 4 com resoluções de 50 cm (a) e 25 cm (b) comparadas com a camada *depth* com resolução de 50 cm (c).



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Já na área 3, como foi realizada somente uma linha de sondagem, observa-se que as regiões com maior densidade de dados foram justamente aquelas onde, devido às curvas, a embarcação passou mais de uma vez, aumentando assim a amostragem de dados naquele local; e também nos pontos relacionados aos pilares do píer. Em vinho, região com menor densidade de pontos, aumentando a quantidade destes conforme fica mais vermelho, indo até pontos em verde/azul justamente nos pilares do píer.

**Figura 82** - Camadas *density* da área 3 com resoluções de 50 cm (a) e 25 cm (b) comparadas com a camada *depth* com resolução de 50 cm (c).



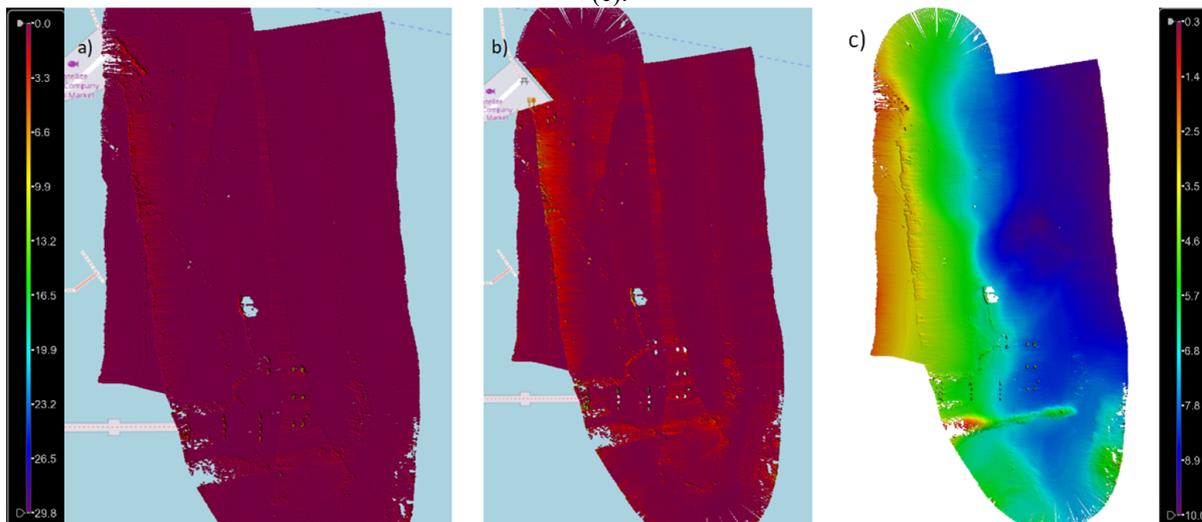
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Pela densidade ter ficado relativamente espaçada na resolução de 25 cm, as discussões foram baseadas na resolução de 50 cm, que atendem aos requisitos analíticos para ordem especial da S-44.

#### 4.2.1.5 Variação Vertical das Profundidades

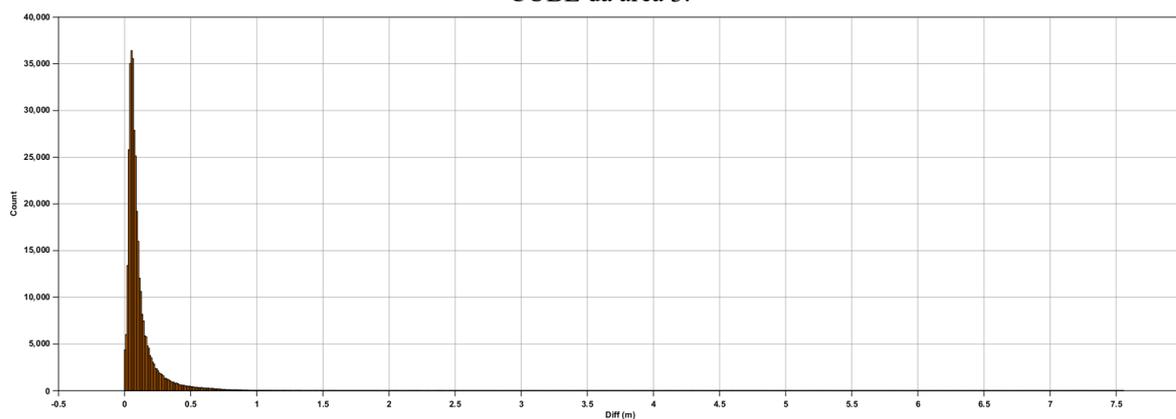
Da mesma forma como realizado anteriormente no item 4.1.1.5, para avaliação da variação vertical das profundidades encontradas nas regiões 3 e 4 com o 3DSS, foi realizada a diferença entre as camadas *deep* e *shoal* da superfície CUBE com resolução de 50 cm, denominada Superfície da Variação Vertical de Profundidades. Para cada nó foi considerada esta diferença para geração das superfícies das áreas 3 (figura 83) e 4 (figura 85) com seus respectivos histogramas de diferença de profundidades nos gráficos das figuras 84 e 86. Cabe ressaltar que para a análise quantitativa, os pilares do píer e a sustentação de um dos cais da região não foram levados em consideração para que somente áreas navegáveis representassem o correto percentual com suas incertezas, figura 83 (b).

**Figura 83** - Superfície de diferença de profundidades entre as camadas *deep* e *shoal* da superfície CUBE da área 3 (a) e a mesma superfície sem os pilares e cais (b) comparadas com a camada *depth* com resolução de 50 cm (c).



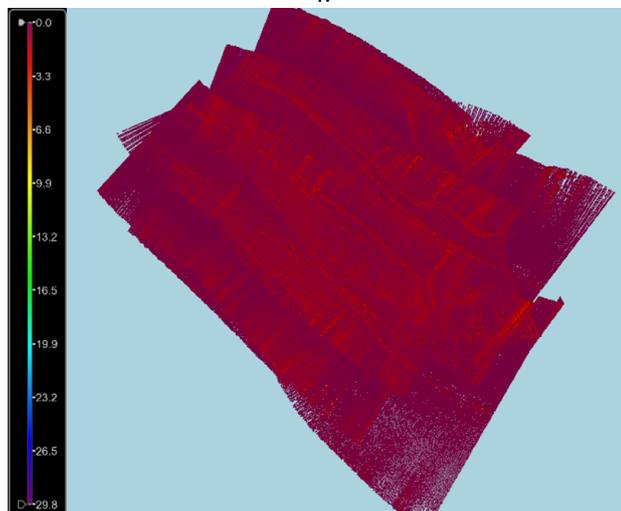
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 84** - Histograma com valores da diferença de profundidades entre as camadas *deep* e *shoal* da superfície CUBE da área 3.



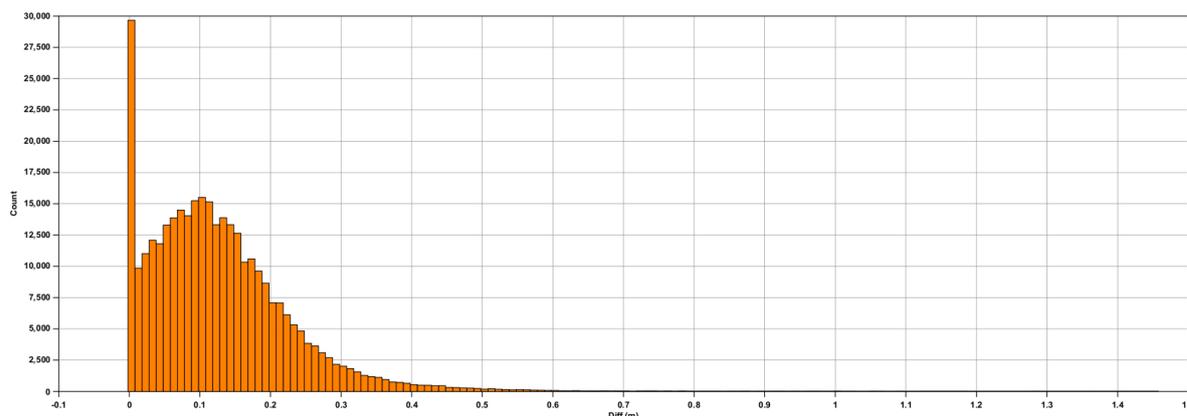
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 85** - Superfície da diferença de profundidades entre as camadas *deep* e *shoal* da superfície CUBE da área 4.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 86** - Histograma com valores da diferença de profundidades entre as camadas *deep* e *shoal* da superfície CUBE da área 4.

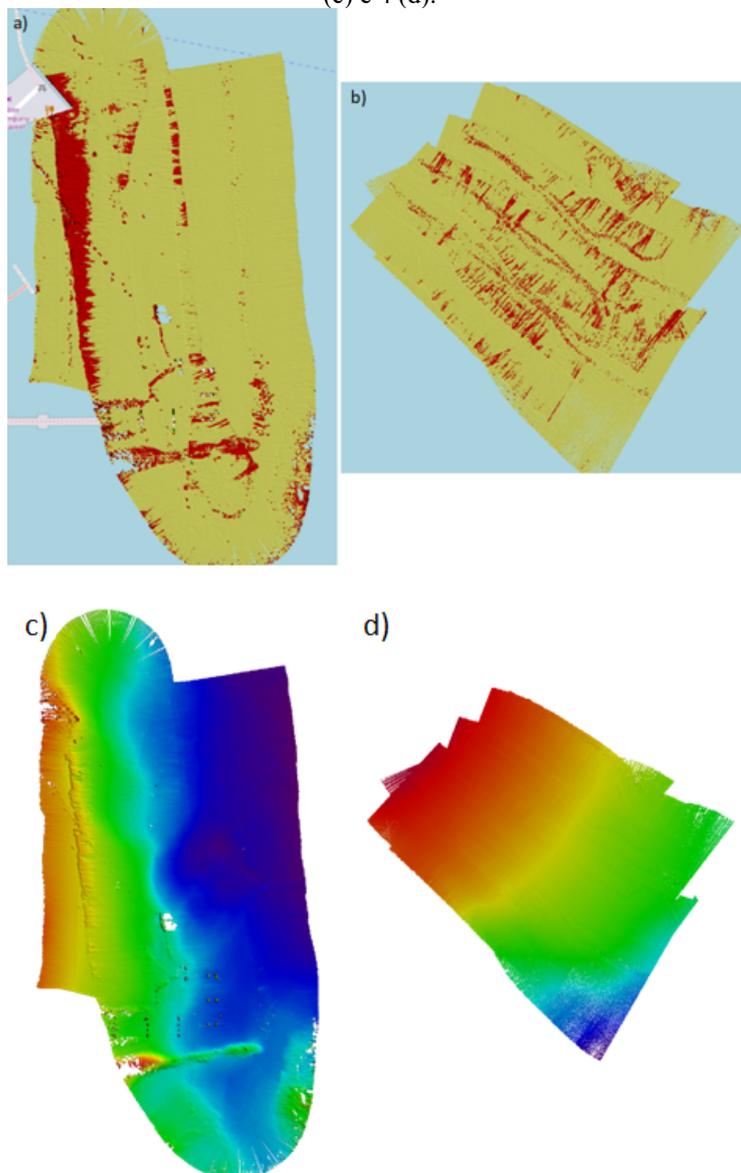


Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Após análise dos gráficos das figuras 84 e 86, percebe-se que a concentração das diferenças de profundidades consideradas encontra-se na faixa de até 25 cm. Seus máximos são 7,6 m e 1,5 m, respectivamente, onde nos gráficos definem os limites dos mesmos. O máximo referente à área 3, provavelmente, foi alguma incerteza gerada pelos limiares dos pilares ou sustentação do cais; enquanto referente à área 4, provavelmente, alguma sobreposição de linha de sondagem.

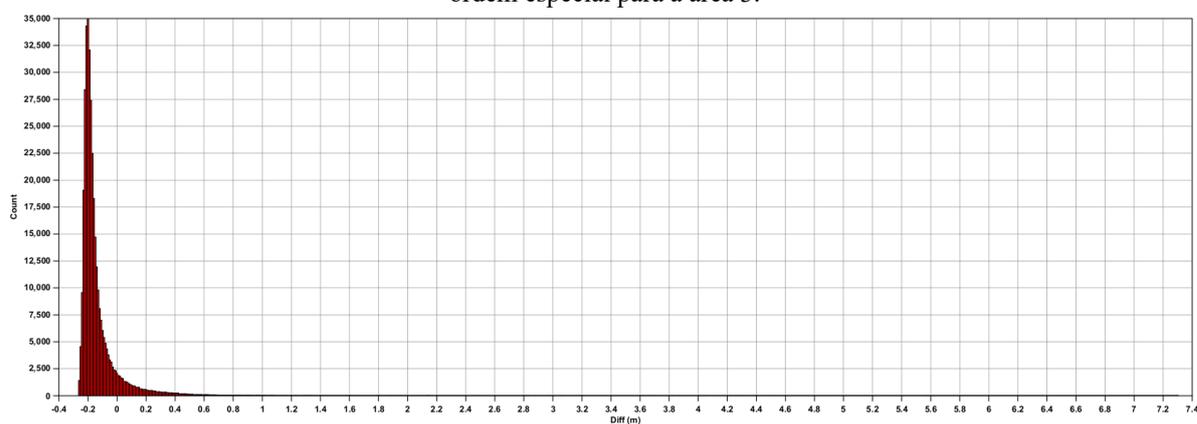
Para a verificação do enquadramento dos nós à TVU máxima, utilizou-se novamente a equação (1) da S-44 com os parâmetros ‘a’ e ‘b’ relativos à ordem especial e a camada *depth*, no próprio programa Caris Hips para gerar uma superfície com os valores de incerteza vertical máximos por nó, aceitos por essa ordem. Após foi realizada a diferença entre a Superfície da Variação Vertical de Profundidades gerada e a superfície da incerteza vertical máxima para cada nó. Com isso, obteve-se um histograma com esta diferença para cada área, onde para valores menores/igual à 0 (zero), em amarelo na figura 87, significa que a variação vertical do nó foi menor do que a máxima variação vertical permitida para aquela profundidade.

**Figura 87** - Áreas 3 (a) e 4 (b) onde as regiões em vermelho/vinho representam os nós onde a variação vertical ultrapassou o limite máximo imposto pela ordem especial da S-44 comparadas com as camadas *depth* das áreas 3 (c) e 4 (d).



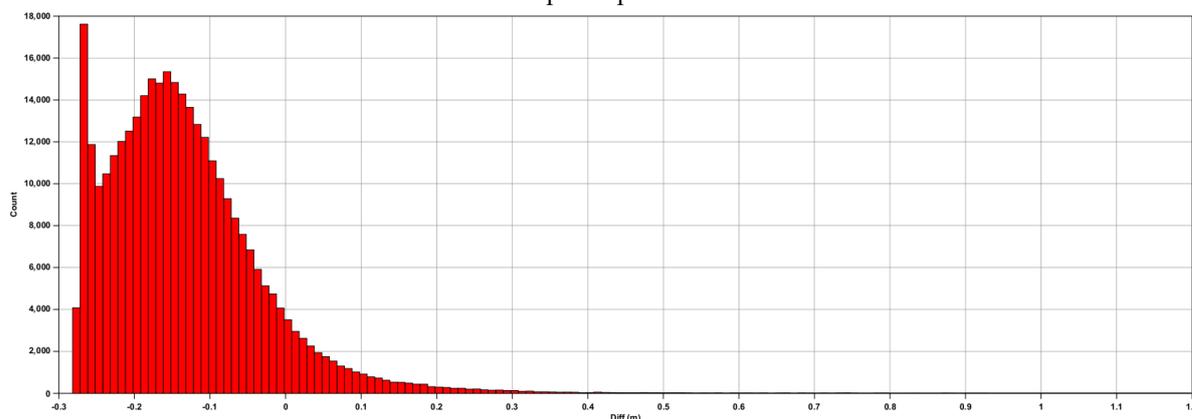
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 88** - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem especial para a área 3.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 89** - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem especial para a área 4.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

De posse dos resultados, foi feita a relação percentual da quantidade de nós com valores abaixo de 0 (zero), ou seja, dentro da tolerância de incerteza (região amarela da figura 87). Com isso, chegou-se nos valores aproximados da tabela 18.

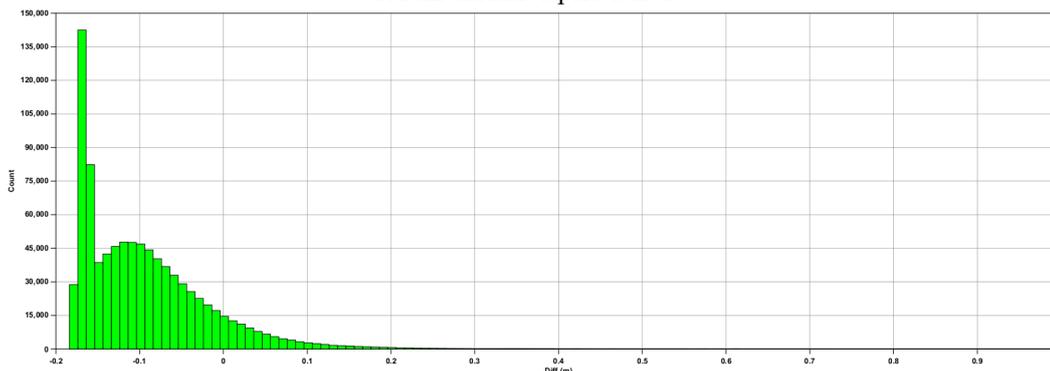
**Tabela 18** - Percentual de nós dentro da tolerância máxima da incerteza vertical relativos às áreas 3 e 4 com base na ordem especial da S-44.

	Percentual de nós dentro da tolerância máxima
Área 3	90,49%
Área 4	91,26%

Fonte: elaborado pelo autor.

Para verificação da área 4, foi realizado o mesmo procedimento, entretanto somente na região onde o recobrimento do fundo foi de 100% (cobertura batimétrica de 200%) com a concorrência de linhas de sondagem e com base na superfície CUBE com resolução de 25 cm. Na figura seguinte tem-se o histograma das profundidades encontradas:

**Figura 90** - Histograma com os valores da diferença entre a variação vertical e seus máximos permitidos pela ordem exclusiva para a área 4.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

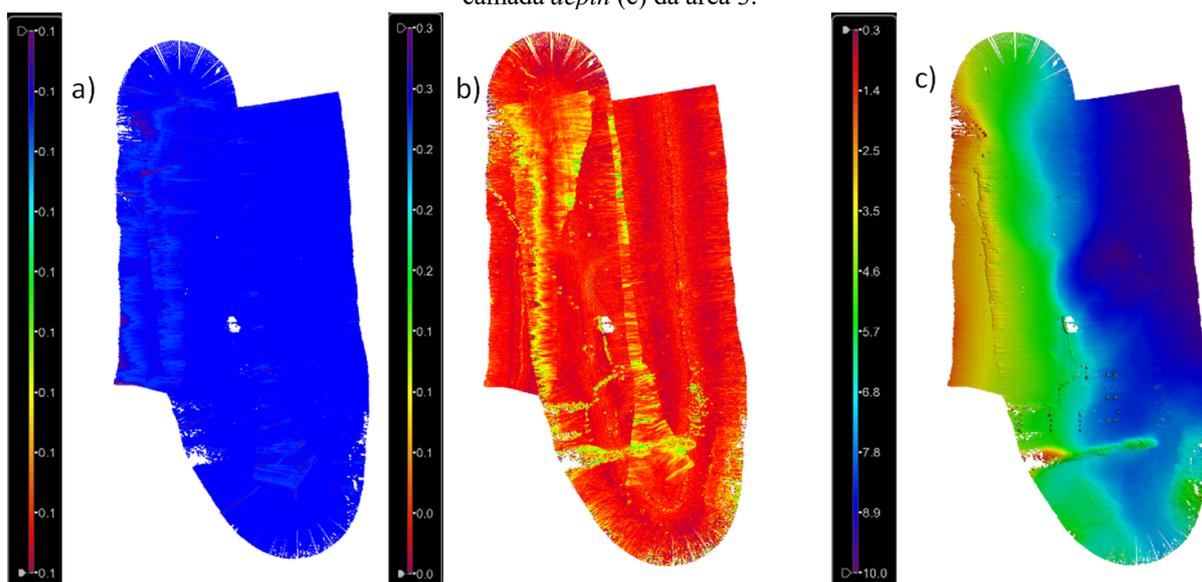
Após os cálculos, foi encontrado o valor de 88,68% das profundidades abaixo da máxima incerteza vertical permitida levando em consideração a ordem exclusiva da S-44.

Devido ao não atendimento da condição de recobrimento de 100% do fundo na área 3, não foi realizada a análise da variação vertical com os valores de ‘a’ e ‘b’ referentes à ordem exclusiva.

#### 4.2.1.6 Controle de Qualidade

A qualidade da sondagem e dos dados coletados com todos os equipamentos envolvidos foi verificada através das incertezas e desvios-padrão.

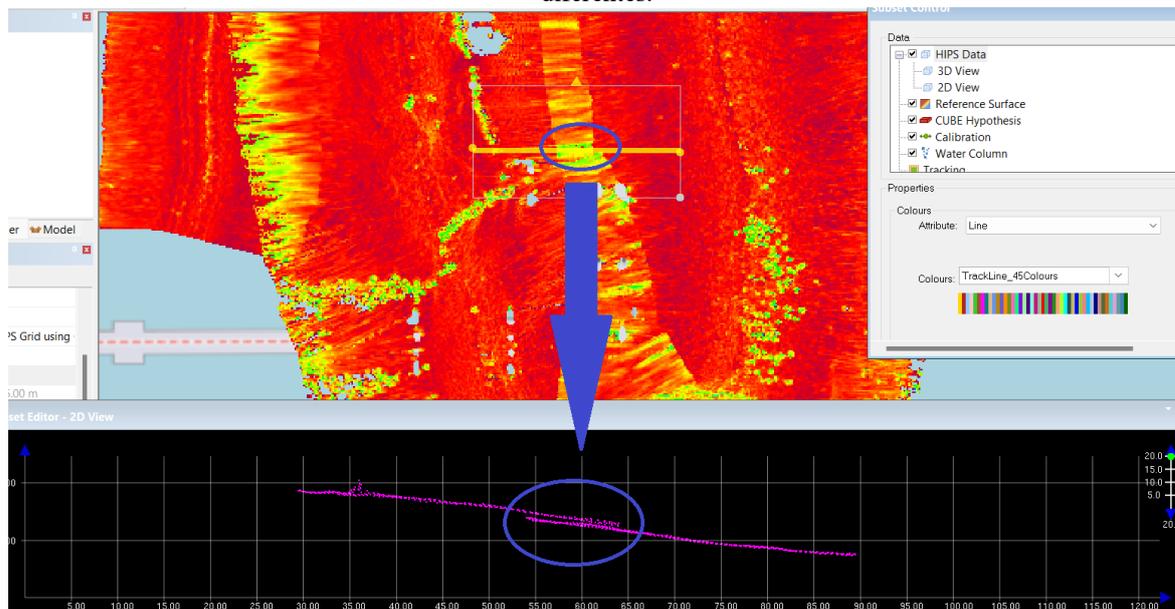
**Figura 91** - Camada *uncertainty* (a) e camada *standard deviation* (b) da superfície CUBE comparadas com a camada *depth* (c) da área 3.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

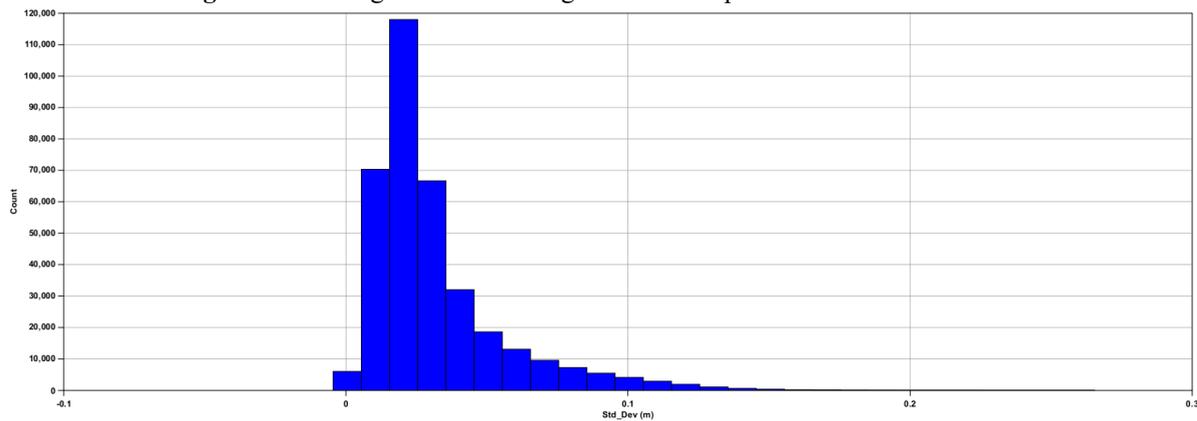
Na figura 91 (a) a variação da incerteza foi tão pequena (ordem de milímetros) que a região não apresenta tanta diferença nas cores, entretanto pode-se perceber que as curvas contribuíram para o aumento, ainda que pouco significativo, da incerteza total. Já na figura 91 (b), foi observado que a variação dos desvios-padrão se deveu principalmente pela elevação que há a norte do píer e nos feixes mais externos das linhas, no “casamento” do percurso de ida com o de volta, provavelmente pela utilização da maré prevista. Na figura 93 abaixo está disposta a distribuição deste desvio-padrão, onde fica evidente sua pouca variação.

**Figura 92** - Exemplo do descasamento na mesma linha de sondagem (área 3), porém em dois sentidos diferentes.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

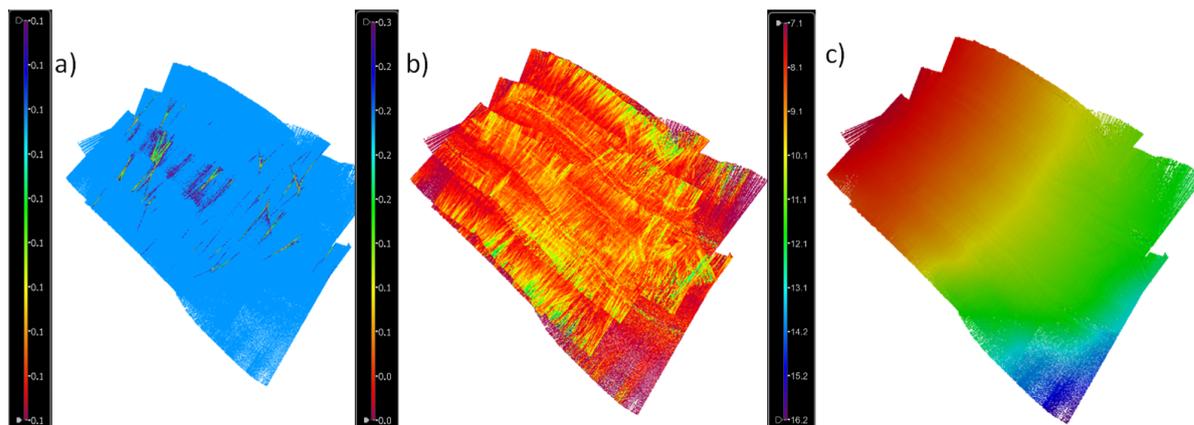
**Figura 93** - Histograma da amostragem do desvio padrão distribuído na área 3.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Com relação à área 4, também foram analisadas as camadas *uncertainty* e *standard deviation*.

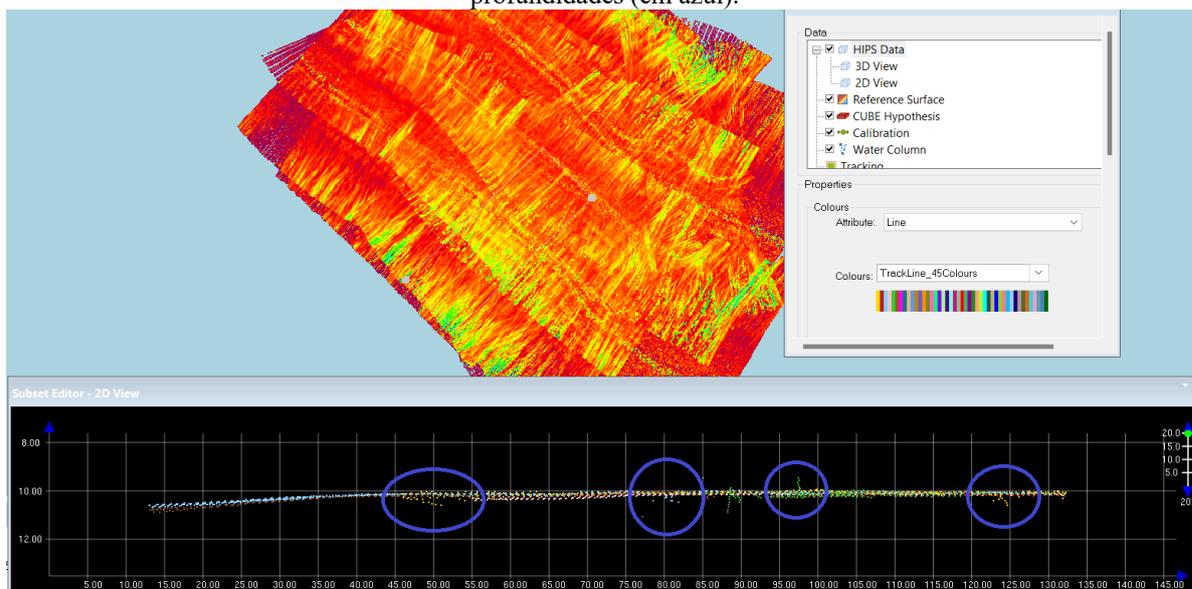
**Figura 94** - Camada *uncertainty* (a) e camada *standard deviation* (b) da superfície CUBE comparadas com a camada *depth* (c) da área 4.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Na área 4, da mesma forma como na área 3, a incerteza foi da ordem de milímetros e não se percebeu diferença com a variação da profundidade, somente um pouco com a sobreposição das linhas. Já o desvio padrão apresentou variações, que a primeira vista, parecem ser muito grandes, entretanto o que aconteceu foi que dados espúrios não filtrados de alguns feixes contribuíram para o aumento dessa incerteza, a exemplo da figura 95. Tais dados podem ser filtrados manualmente e contribuiriam para a diminuição desse desvio padrão.

**Figura 95** - Exemplos de regiões da área 4 que contribuíram para o aumento no desvio-padrão das profundidades (em azul).



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Estes dois fatores, incerteza e desvio padrão, são os que são levados em consideração para a avaliação quanto à adequação às ordens da S-44 em relação à geração do *QC report*. As áreas 3 e 4 foram avaliadas separadamente.

Foi avaliada a superfície CUBE com resolução de 50 cm para a geração da tabela abaixo.

**Tabela 19** - Relação de detecção de estruturas/feições com resolução da superfície analisada, de acordo com as incertezas *a priori* das ordens previstas na S-44.

	Deteção de estruturas/feições	Área 3	Área 4
Ordem exclusiva	> 0.5 m	-	91,95% (sup. res. 25cm)
Ordem especial	> 1 m	99,42%	98,96%
Ordem 1A	> 2 m (até 40 m); 10% (áreas com profundidades > 40 m)	100%	100%
Ordem 1B	Não especificado	100%	100%
Ordem 2	Não especificado	100%	100%

Fonte: elaborado pelo autor.

Na área 4, como tiveram 6 (seis) linhas de navegação praticamente concorrentes, 3 foram consideradas linhas regulares e 3 consideradas linhas de verificação para enquadramento da área nas Ordens da S-44. Após análise realizada pelo algoritmo do Caris Hips, atingiu-se o seguinte resultado da tabela 20.

**Tabela 20** - *QC report* relativo à superfície CUBE com resolução de 50 cm.

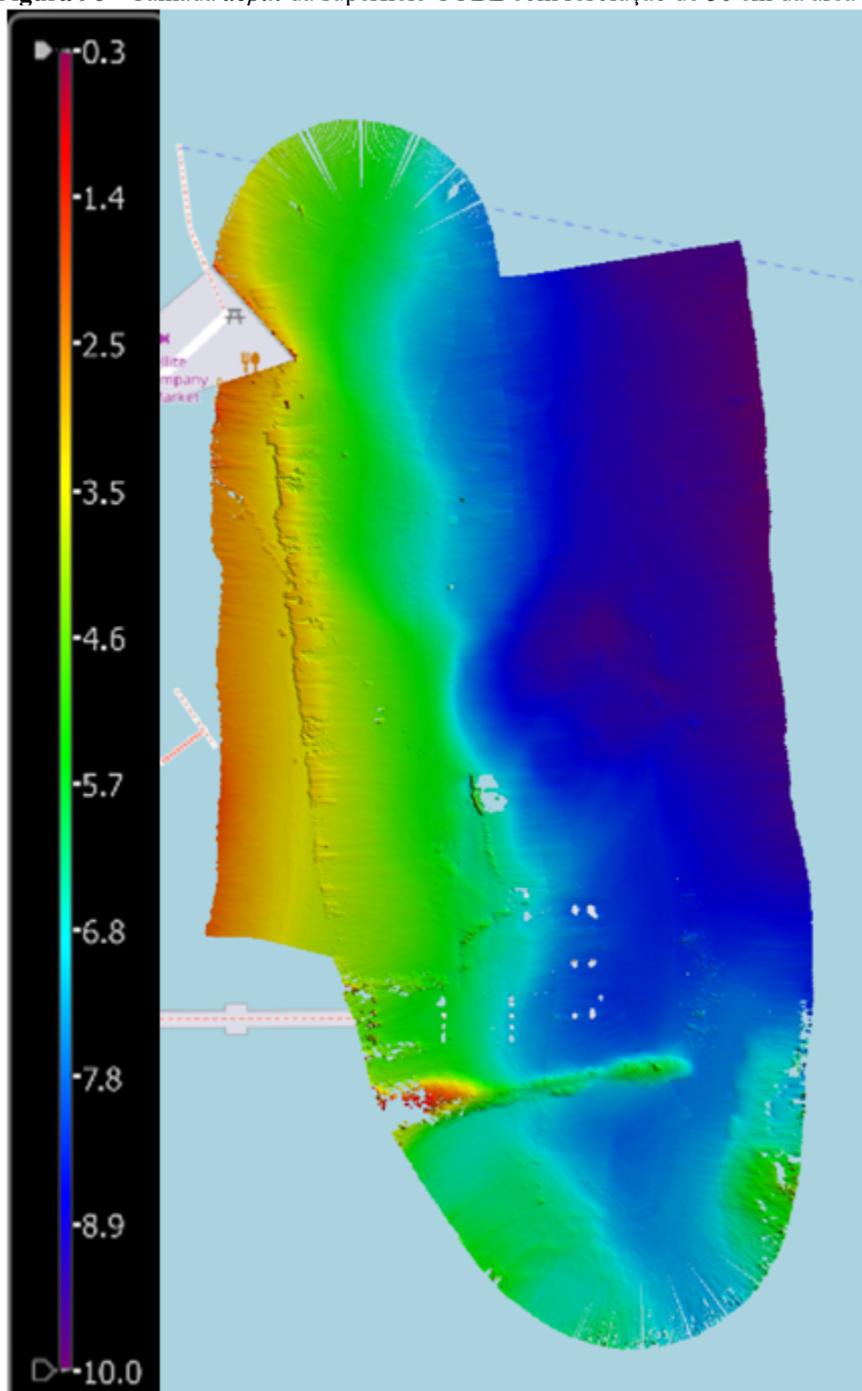
	Área 4
Ordem exclusiva	-
Ordem especial	99,02%
Ordem 1A	99,94%
Ordem 1B	99,94%
Ordem 2	100%

Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.2.1.7 Superfícies Finais e Considerações

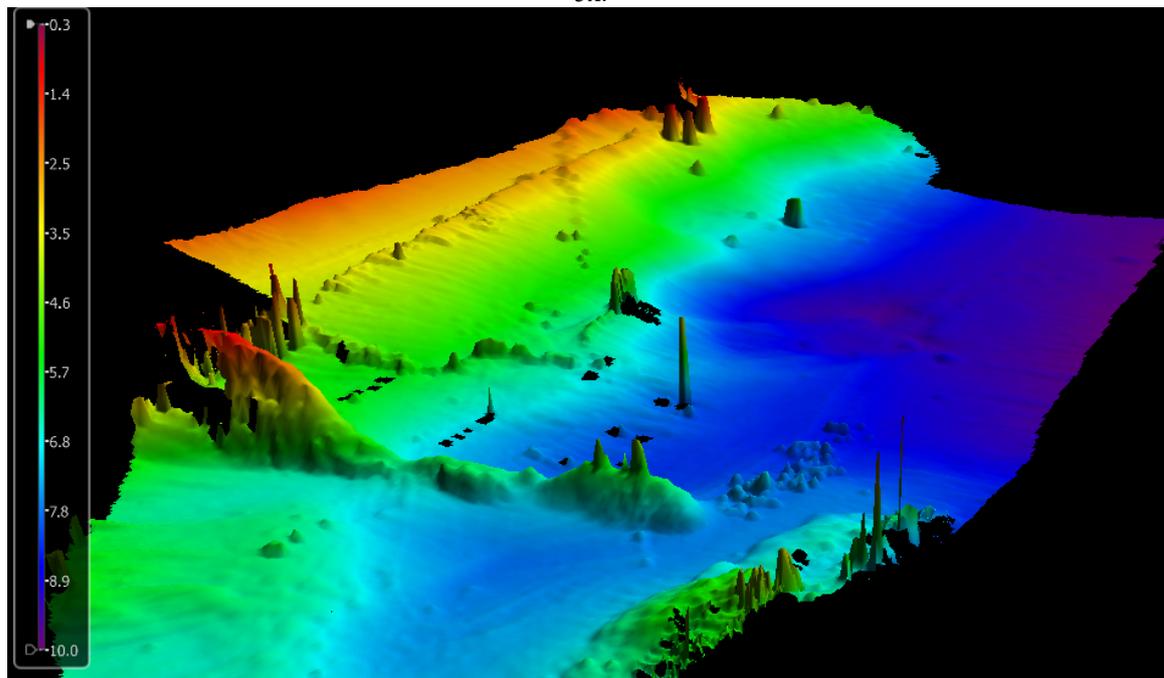
Após as discussões, o LH atingiu potencial para ficar dentro da ordem especial da S-44 e resultaram nas seguintes superfícies, com resolução de 50 cm.

**Figura 96** - Camada *depth* da superfície CUBE com resolução de 50 cm da área 3.



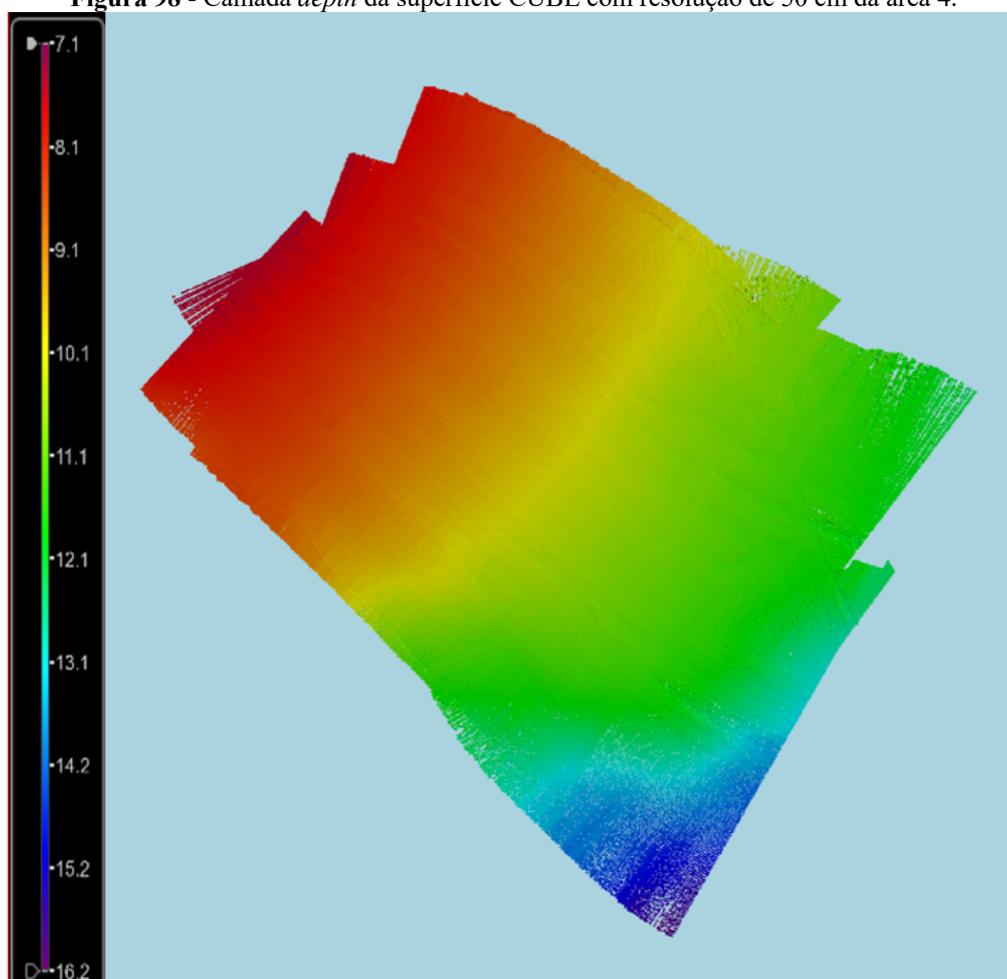
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 97** - Camada *depth* da superfície CUBE com resolução de 50 cm da área 3 em vista 3D com exagero de 5x.



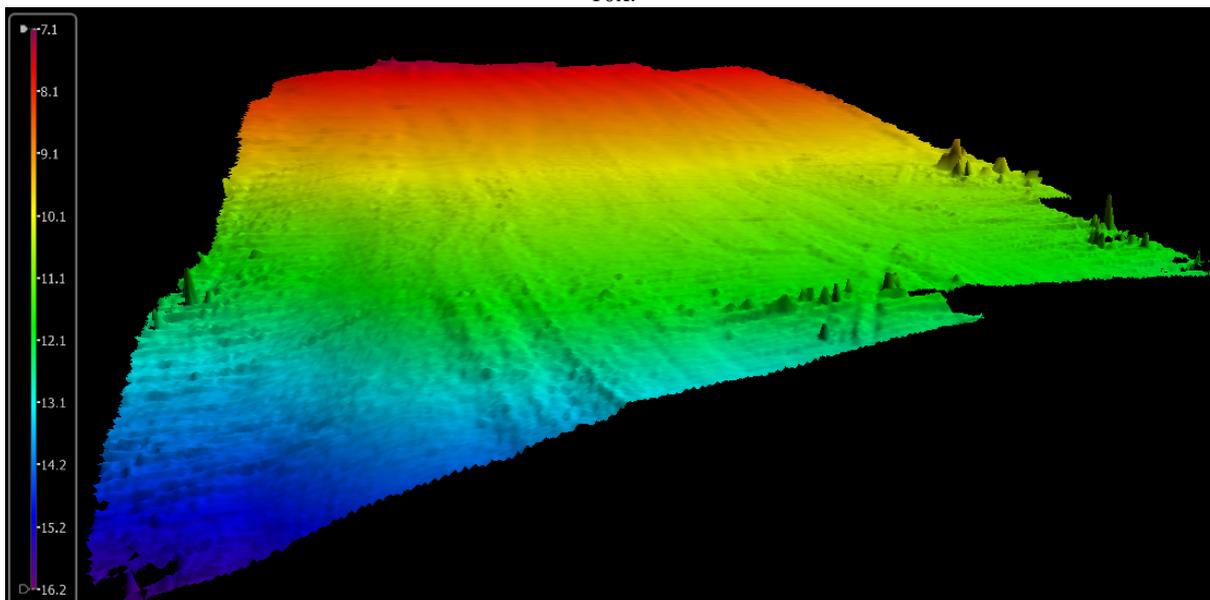
Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 98** - Camada *depth* da superfície CUBE com resolução de 50 cm da área 4.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

**Figura 99** – Camada *depth* da superfície CUBE com resolução de 50 cm da área 4 em vista 3D com exagero de 10x.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4.

Novamente deve-se avaliar as premissas 1 e 2 do capítulo 1:

1 – Os dados foram adquiridos da forma como determina a NORMAM-25? Não em sua totalidade. A área 4 (*patch test*) foi sondada de forma satisfatória e correta, entretanto a área 3 foi sondada fazendo-se curvas e não dividindo-se as linhas em etapas, por este motivo, não poderia ser considerada como um trabalho com finalidade cartográfica.

2 – Houve uma filtragem inicial dos dados, antes da disponibilização para geração das superfícies batimétricas deste trabalho? Sim, houve um processamento inicial que possibilitou a utilização dos dados diretamente no Caris Hips, entretanto não ficou claro se a densidade dos dados foi afetada por esta filtragem, se foi alguma configuração na coleta dos dados ou apenas limitação do equipamento.

Após análise detalhada, foi verificada a existência de regiões onde não puderam ser mensuradas suas profundidades, seja pela baixa densidade dos dados ou simplesmente pela incapacidade de resolução dos sinais provenientes do fundo. Esta última fica evidente numa pequena região central da figura 98 onde não conseguiram ser resolvidos quaisquer tipos de sinais pelo transdutor, deixando assim um espaço sem informação, que provavelmente ocorreu devido ao *layover*. Fatos semelhantes foram observados, principalmente, em regiões próximas a objetos artificiais. Entretanto a informação que constaria na CN seria a do topo do objeto identificado, ou seja, aquele que representa perigo à navegação, portanto tal fator não o

torna limitador para o uso da tecnologia com a finalidade de segurança da navegação. Ademais percebeu-se que o alcance horizontal do equipamento, bem como as incertezas totais envolvidas, foram pontos muito relevantes para a consideração da utilização do equipamento. Outro ponto positivo foi a quase não rejeição de pontos em comparação com o total sondado, o que culmina em duas possibilidades: ou nível de precisão da tecnologia é muito bom ou houve uma filtragem exagerada dos dados disponibilizados para análise.

#### 4.2.2 Imageamento

Realizados os procedimentos descritos no capítulo 3 para processamento da imagem, obteve-se o seguinte produto (figura 100) relativo à área 3.

**Figura 100** - Imageamento da área 3.

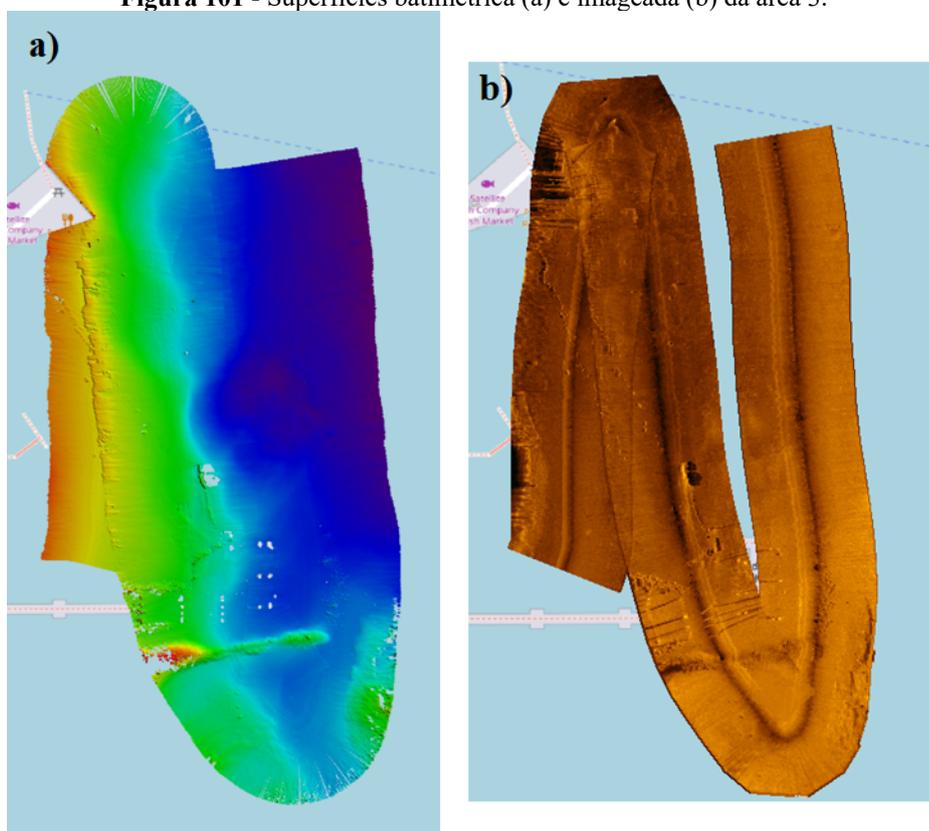


Fonte: elaborado pelo autor no SonarWiz 7.

Aqui cabe um adendo, como a área 4 foi uma área de *patch test*, não foram disponibilizados os dados de imageamento dessa região. Portanto somente será considerada a análise da área 3.

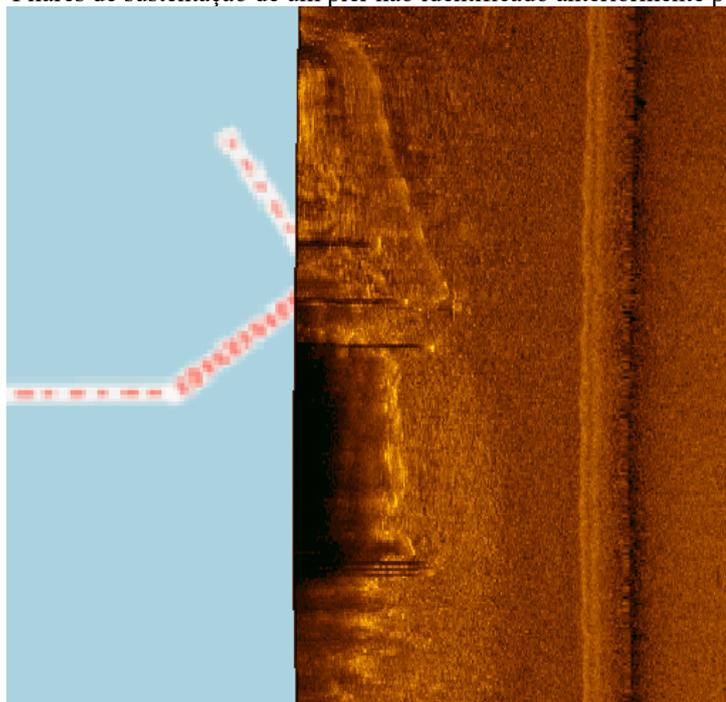
Comparando-se a superfície batimétrica com a área imageada, pode-se observar que para avaliação da batimetria, toda a área (com exceção de alguns pontos) navegada pela embarcação conseguiu ser quantificada em termos de geração de informação de profundidades, enquanto o imageamento não conseguiu gerar uma superfície que cobrisse toda a região. Entretanto, nas áreas mais rasas, o imageamento atingiu alcance horizontal um pouco maior, possibilitando a visualização dos pilares de um píer (figura 102); dados estes que não se encontram amostrados na superfície batimétrica.

**Figura 101** - Superfícies batimétrica (a) e imageada (b) da área 3.



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4 (a) e SonarWiz 7 (b).

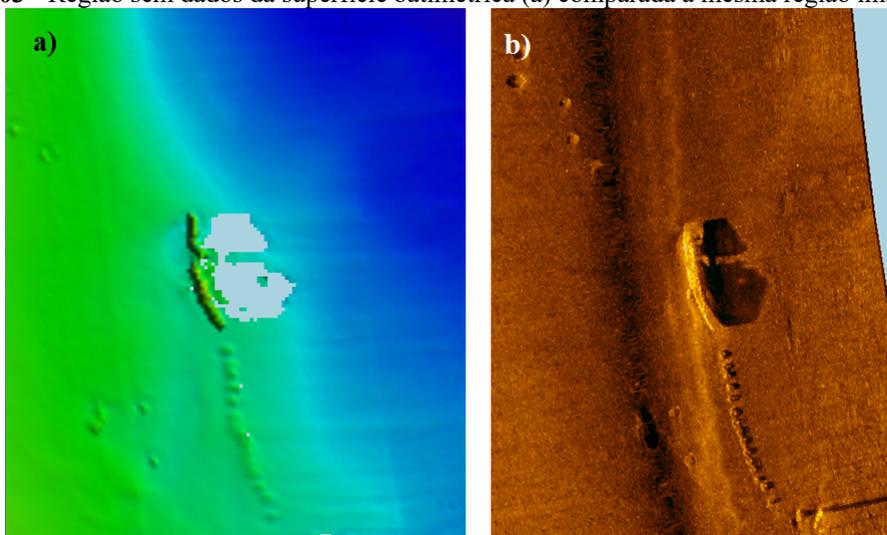
**Figura 102** - Pilares de sustentação de um píer não identificado anteriormente pela sondagem.



Fonte: elaborado pelo autor no SonarWiz 7.

O imageamento, sendo observado concomitantemente à batimetria, possibilitou que fosse constatado o motivo pelo qual o equipamento não obteve retornos do fundo numa região específica onde a superfície batimétrica ficou sem informação de profundidades, gerando um feriado (região sem informação de profundidade) por conta do *layover* ou por esses dados terem sido filtrados. Foi identificada uma estrutura, aparentando ser uma pequena embarcação naufragada, que impossibilitou o retorno dos feixes (ou a resolução) da sombra deste objeto.

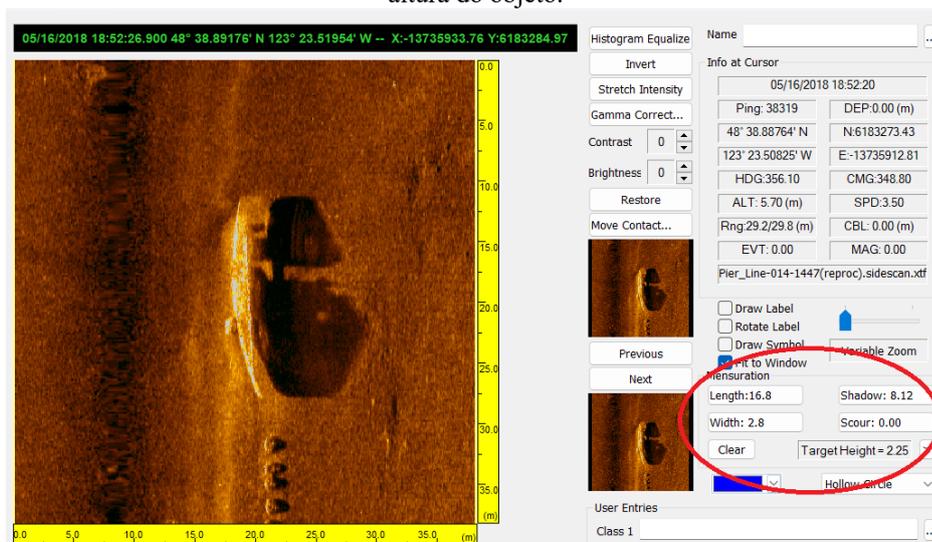
**Figura 103** - Região sem dados da superfície batimétrica (a) comparada à mesma região imageada (b).



Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4 (a) e SonarWiz 7 (b).

Uma das ferramentas do imageamento é a possibilidade do cálculo da altura dos objetos/alvos pelo tamanho de suas sombras. Utilizando-se deste artifício, como ilustrado na figura 104, ao inserir manualmente o comprimento, largura e tamanho da sombra gerada, relativa ao objeto em questão, o programa estimou o tamanho do objeto como sendo de 2,25 metros.

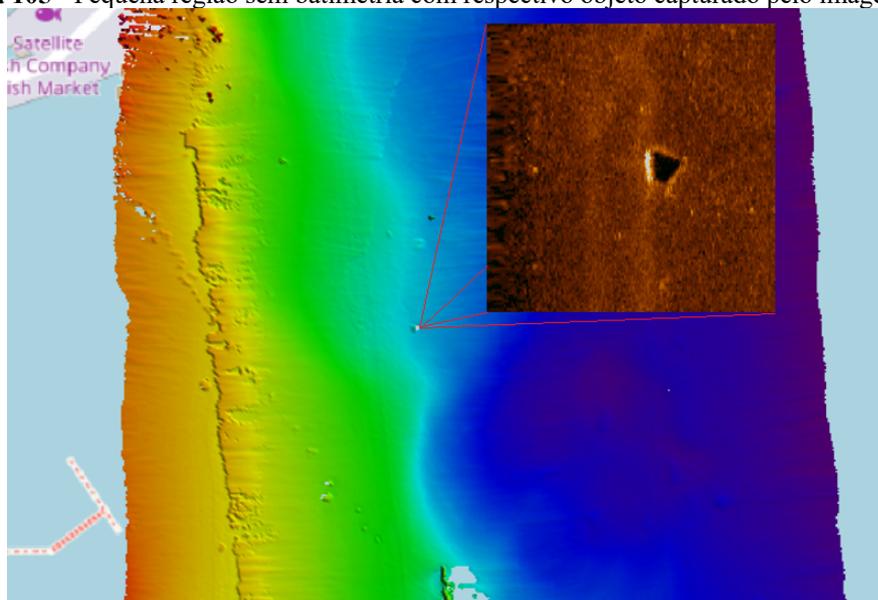
**Figura 104** - Objeto analisado; destacado em vermelho, tamanhos medidos manualmente para estimativa da altura do objeto.



Fonte: elaborado pelo autor no SonarWiz 7.

Esta é uma ótima ferramenta para identificação e análise de objetos submersos, como pode ser observado. Outro, dentre alguns pequenos pontos que ficaram sem batimetria, foi igualmente analisado e constatou-se que o objeto em questão possuía 80 cm.

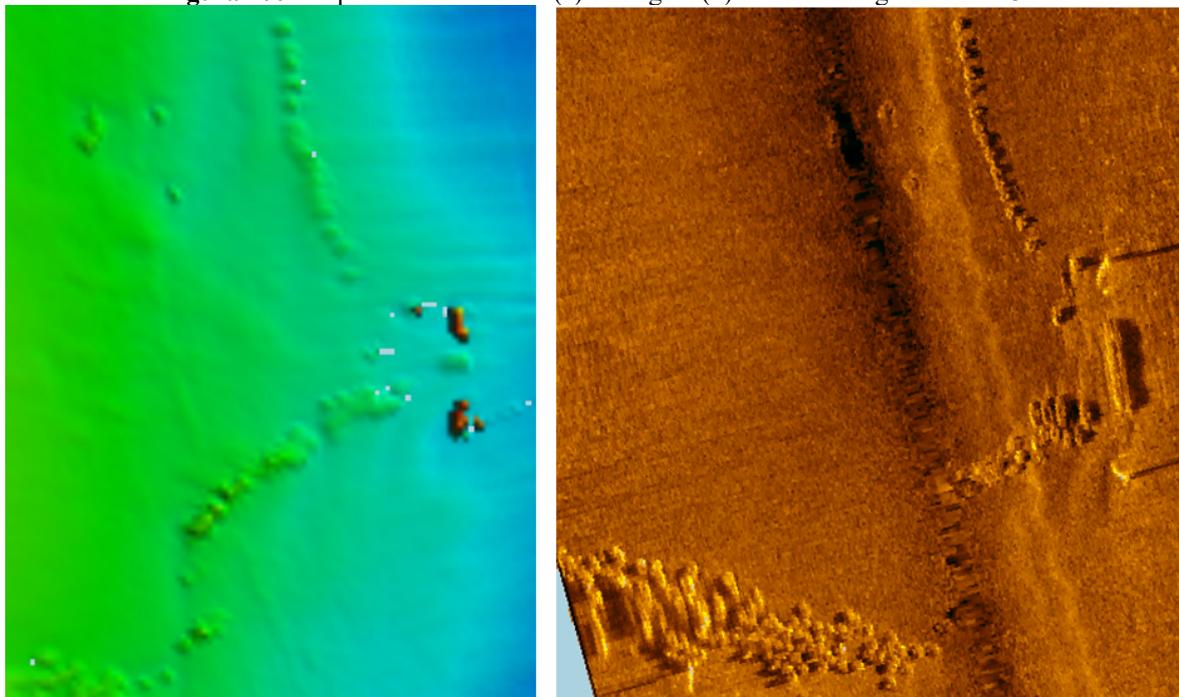
**Figura 105** - Pequena região sem batimetria com respectivo objeto capturado pelo imageamento.



Fonte: elaborado pelo autor.

Após a análise de alguns pontos sem batimetria, foi analisado o detalhamento em relação à superfície batimétrica gerada com resolução de 50 cm.

**Figura 106** - Superfície batimétrica (a) e imagem (b) da mesma região da área 3.

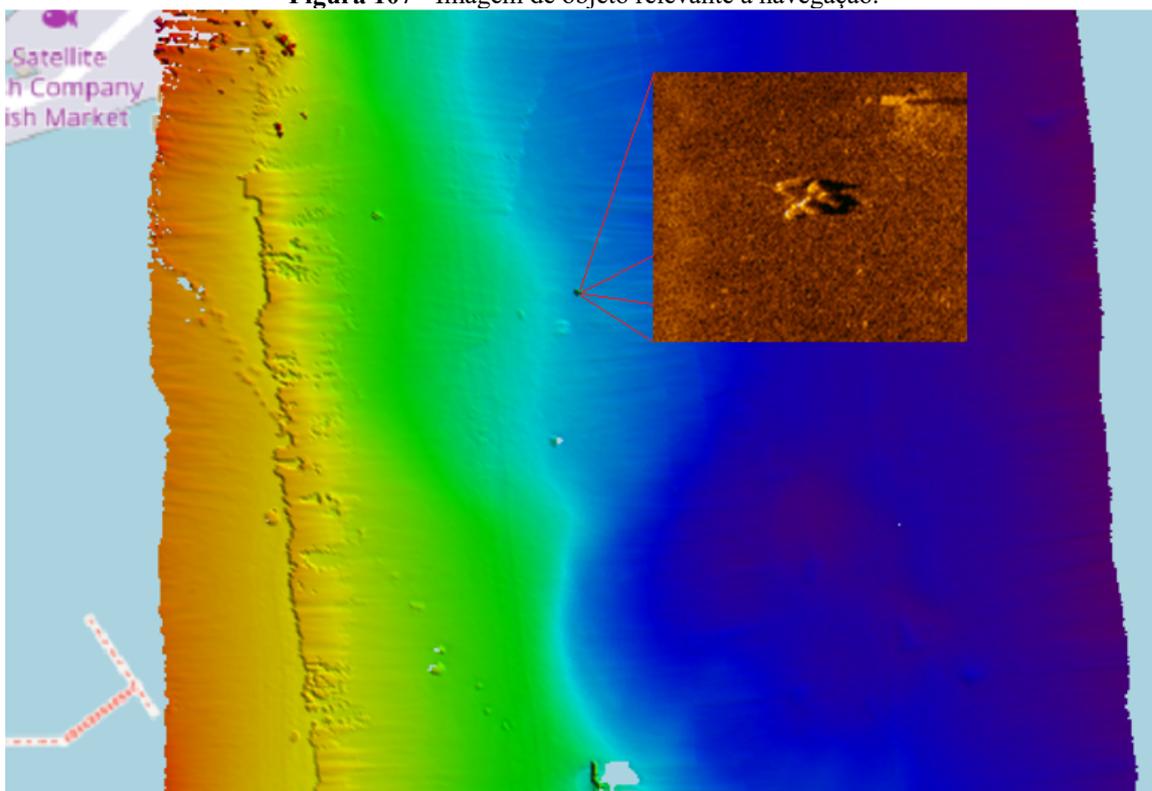


Fonte: elaborado pelo autor no Caris Hips 10.4 (a) e SonarWiz 7 (b).

Aqui, percebe-se que o detalhamento da imagem é maior do que da superfície batimétrica, devido ter sido utilizada a resolução de 50 cm nesta última por motivos já explicados anteriormente. Vale ressaltar que se percebe, também, a falta de informações relativas ao nadir, figura 106 (b), comum em qualquer tecnologia de imageamento, com isso, gerando uma descontinuidade na região de pedras observada.

Outro ponto relevante a ser discutido foi a identificação de um ponto de profundidade aproximada de 5,5m numa região onde a profundidade era de aproximadamente 7,3m. Ao analisar a imagem deste ponto encontrou-se um objeto que parece ser artificial.

**Figura 107** - Imagem de objeto relevante à navegação.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tal análise torna-se relevante quando uma área navegável precisa ter determinada profundidade para que permita a passagem de navios com calados maiores, pois sendo algo artificial, a retirada do mesmo torna-se mais fácil.

Portanto ficou claro que as informações advindas do imageamento foram uma boa ferramenta adicional ao LH. Esta ferramenta conseguiu tirar dúvidas quanto a alvos, impossíveis de serem identificados somente com a batimetria.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisados 2 equipamentos, o EdgeTech 6205s2 e o Ping DSP 3DSS, que utilizam prioritariamente a interferometria como técnica de resolução dos feixes. Esta tem ganhado cada vez mais espaço dentre os profissionais da área e, com isso, a necessidade de avaliação de tal tecnologia faz-se necessária, principalmente para os países que: ou ainda não utilizam a tecnologia para LH's; ou não modificaram suas normas para incluí-la como uma das técnicas padrão. O Brasil, hoje, sequer menciona a existência desses equipamentos.

Após a obtenção dos dados por terceiros, estes foram pré-processados para que uma correta análise pudesse ser feita. Foi utilizado o Caris Hips 10.4 para a análise/avaliação dos dados batimétricos e o SonarWiz 7 para a visualização dos dados de imageamento. Após análise dos resultados obtidos com os sonares, chegou-se às seguintes conclusões no que diz respeito à batimetria:

- A forma como os dados brutos foram filtrados, logo após a aquisição, por quem coletou os dados, influenciou a análise, pois podem ter sido filtrados dados relevantes à uma análise mais acurada da tecnologia, em ambos os equipamentos;
- Somente o fato de a empresa dizer que o sonar utiliza tecnologia de interferometria, em si, não quantifica sua eficiência, pois, esta tecnologia já vem sendo utilizada por MBES (feixes mais extremos) e, o que os diferencia de fato, é o peso atribuído aos sinais gerados por detecção de amplitude e por diferença de fase, sendo este último maior nos sonares estudados;
- O fato de as MU's terem sido dispostas tão próximas quanto possível dos sonares melhorou a qualidade dos dados, diminuindo a incerteza total envolvida, no aspecto da correção do direcionamento dos feixes segundo os movimentos da embarcação (*roll, pitch, yaw*);
- A incerteza vertical não se mostrou fator limitador à utilização da tecnologia com finalidade cartográfica, e ficou dentro do padrão das Ordens da S-44, em grande parte das áreas estudadas;
- A BASE *surface* denominada *swath angle* não se mostrou uma ferramenta eficaz para amostrar produtos batimétricos provenientes de sonares interferométricos, pois como

essa atribui pesos maiores às sondagens próximas ao nadir, difere do que é priorizado na tecnologia estudada.

- Algumas regiões ficaram sem dados de batimetria, seja por estarem na sombra de algum objeto com elevação considerável (3DSS) ou em repentina variação de profundidade (6205s2), provavelmente pelo efeito de *layover*;
- A intenção do trabalho não foi comparar os equipamentos entre si, porém aqui cabe uma observação pertinente aos resultados encontrados: enquanto o 6205s2 mostrou um alcance horizontal reduzido e melhor densidade dos dados, o 3DSS mostrou um maior alcance horizontal, porém com menor densidade de dados. Este quesito está diretamente ligado à abertura angular do feixe. Ambos não foram fatores limitadores para a utilização da tecnologia;
- No 6205s2 houve um aumento no desvio-padrão nas extremidades dos feixes e menor densidade dos dados, conforme diminuição da célula de resolução, no nadir.
- No 3DSS não foi possível utilizar resolução menor/igual a 25 cm devido à baixa densidade dos dados.

Embora tenham sido destacados alguns pontos negativos, nenhum desses foi fator limitador para a utilização da tecnologia, ou seja, em ambos os equipamentos, as áreas sondadas atingiram, ao mínimo, nível de confiança dentro do esperado para a Ordem especial da S-44, considerada rigorosa. Entretanto não foi possível realizar, em ambos os casos, a comparação das áreas sondadas pelos equipamentos estudados com produtos previamente obtidos por outros equipamentos, portanto não é possível afirmar que as superfícies geradas representam, de fato, o fundo, somente têm potencial para tal.

Ademais quanto às imagens geradas e pós-processadas no SonarWiz 7, de ambos os equipamentos, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- As imagens geradas permitiram identificar objetos não reconhecidos somente pela batimetria, como uma poita (com cabo) e uma possível embarcação miúda naufragada;
- O alcance horizontal do imageamento teve alcance diferente da batimetria, variando com a profundidade, podendo ser observado que a área imageada em fundo mais raso conseguiu obter um alcance horizontal maior quando comparada à uma área mais profunda, havendo, por vezes, “perda” de informação (área 3) quando comparado à superfície batimétrica;

- Possibilitou identificação da natureza do fundo (área 3) em regiões de afloramentos rochosos, bem como a estrutura da ponte (área 2) não totalmente identificada na superfície batimétrica;

Entretanto, a maior vantagem em se obter o imageamento do fundo ao mesmo tempo em que é realizada a batimetria é a possibilidade de comparação de diferentes produtos gerados concomitantemente. Podem ser identificados objetos que somente com a batimetria seria impossível, como poitas, e estes podem servir para a adição de mais informações aos produtos náuticos gerados por este tipo de equipamento. Ademais, tais informações ficam arquivadas em bancos de dados próprios para tal.

Outro fator relevante é que o sonar interferométrico é capaz de gerar dois produtos diferentes, porém complementares. Portanto a entrega destes, batimetria e imageamento, por um único equipamento mostrou-se eficaz para a prática hidrográfica, bem como a tecnologia conseguiu alcançar potencial para atingir padrões considerados rigorosos para a hidrografia.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como foi ressaltado anteriormente, os dados recebidos foram previamente filtrados e, por isso, influenciaram a análise geral da tecnologia. Por este motivo é interessante que para trabalhos futuros sejam estudados os *softwares* proprietários dessas empresas, ou de outras, que fazem esse tipo de filtro: 1 – Como os dados são filtrados; 2 – Qual o nível de corte/aceitação de dados; 3 – Até que ponto é possível trabalhar com os dados brutos sem a filtragem por tais *softwares*; e principalmente 4 – Testar os mesmos equipamentos em áreas de controle com características distintas, onde as profundidades já foram precisamente cartografadas para que se possa realizar a medição das incertezas *a posteriori*. Dessa forma os dados, além de poderem ser analisados na sua forma bruta, poder-se-á também analisar a relação dos pontos obtidos *versus* rejeitados desde o início da atividade, bem como realizar a comparação com dados pré-existentes a fim de ratificar a acurácia da tecnologia de tais fabricantes.

## REFERÊNCIAS

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

CARIS. **Caris Hips and Sips 8.1**: User Guide. USA: ago. 2013, 542 p. Disponível em: <https://pdfslide.net/documents/caris-hips-and-sips-user-guide-v81.html>. Acesso em: 31 jan. 2023.

CHANG, Y. C; HSU, S. K. TSAI, C. H. Sidescan Sonar Image Processing: Correcting Brightness Variation and Patching Gaps. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 18, n. 6, p. 785-789, dez. 2010. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/265425113\\_Sidescan\\_sonar\\_image\\_processing\\_Correcting\\_brightness\\_variation\\_and\\_patching\\_gaps](https://www.researchgate.net/publication/265425113_Sidescan_sonar_image_processing_Correcting_brightness_variation_and_patching_gaps). Acesso em: 18 jan. 2023.

CHESAPEAKE TECHNOLOGY. **SonarWiz 7.10**: User Guide. 2019. Disponível em: [https://chesapeaketech.com/wp-content/uploads/docs/SonarWiz7\\_UG/HTML/automatic\\_time\\_varying\\_gain\\_tvg\\_.htm](https://chesapeaketech.com/wp-content/uploads/docs/SonarWiz7_UG/HTML/automatic_time_varying_gain_tvg_.htm). Acesso em: 18 jan. 2023.

CHESAPEAKE TECHNOLOGY. **Streamline Surveys with SonarWiz**. 2023. Disponível em: <https://chesapeaketech.com/>. Acesso em: 18 jan. 2023.

CHS. CUBE Bathymetric Data Processing and Analysis. **Canadian Hydrographic Service**, n. 1, 7 p., fev. 2012. Disponível em: <https://www.charts.gc.ca/documents/data-gestion/bathymetric-traitement/bathymetric-traitement-eng.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2023.

CLARKE, J. E. H. **Bathymetric Sidescans** – the first step toward Oblique Sounding. Ocean Mapping Group, University of New Brunswick, Canada, 2013.

CLARKE, J. E. H. Multibeam Echosounders. *In*: MICALLEF, A.; KRASTEL, S.; SAVINI, A. **Submarine geomorphology**, Cham, Switzerland: Springer, 2018a. p. 25 – 41.

CLARKE, J. E. H. The Impact of Acoustic Imaging Geometry on the Fidelity of Seabed Bathymetric Models. **Geosciences**, v. 8, n. 180, 20 p., mar. 2018b. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/324009955\\_The\\_Impact\\_of\\_Acoustic\\_Imaging\\_Geometry\\_on\\_the\\_Fidelity\\_of\\_Seabed\\_Bathymetric\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/324009955_The_Impact_of_Acoustic_Imaging_Geometry_on_the_Fidelity_of_Seabed_Bathymetric_Models). Acesso em: 05 jan. 2023.

DHN. **Missão/Visão**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/node/80#:~:text=Manter%2Dse%20como%20um%20Servi%C3%A7o,navega%C3%A7%C3%A3o%2C%20durante%20os%20pr%C3%B3ximos%205>. Acesso em: 08 mar. 2022.

EDGETECH. **6205s2**: Multi Phase Wide Swath Bathymetry & Side Scan Sonar. Datasheet, USA, 2022. Disponível em: [https://www.edgetech.com/wp-content/uploads/2019/07/6205s2-11\\_1\\_22.pdf](https://www.edgetech.com/wp-content/uploads/2019/07/6205s2-11_1_22.pdf). Acesso em: 17 jan. 2023.

FERREIRA, I. O. **Controle de Qualidade em Levantamentos Hidrográficos**. Viçosa - MG, 216p. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, fev. 2018. Disponível em:

<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/18062/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2023.

FIGUEIREDO, I. C. **Qual a diferença entre Safety e Security?**. Disponível em: <https://www.mairovergara.com/qual-a-diferenca-entre-safety-e-security>. Acesso em: 08 mar. 2022.

FLEMMING, B.W. Side Scan Sonar: A Practical Guide. **International Hydrographic Review**, Monaco, v. 3, n. 1, p. 65-92, jan. 1976. Disponível em: <https://journals.lib.unb.ca/index.php/ihr/article/view/23734>. Acesso em: 10 jan. 2023.

FREITAS, F. C. **Interferometria**. 2011. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Física, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/32121/1/2011\\_tcc\\_fcfreitas.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/32121/1/2011_tcc_fcfreitas.pdf). Acesso em: 12 jan. 2023.

GAGG, G. **Apostila de Levantamentos Hidrográficos – Noções Gerais**. Departamento de Geodésia, UFRGS, 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/157210/001020445.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2023.

GIOVANINI, A. **Batimetria: o que é e para que serve?**.2020. Disponível em: <https://adenilsongiovanini.com.br/blog/batimetria-o-que-e-e-para-que-serve/>. Acesso em: 07 fev 2023.

GRALL, P.; KOCHANSKA, I.; MARSZAL, J. Direction-of-Arrival Estimation Methods in Interferometric Echo Sounding. **Sensors**, v. 20, n. 3556, 16 p. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3556>. Acesso em: 09 jan. 2023.

GUEDES, L. C S. **Comunicações Submarinas: Meio Aquático**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: [https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos\\_v1\\_2009\\_2/luis/2meioaquatico.html](https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_v1_2009_2/luis/2meioaquatico.html). Acesso em: 09 jan. 2023.

HALMAI, A. *et al.* Applicability of a Recreational-Grade Interferometric Sonar for the Bathymetric Survey and Monitoring of the Drava River. **International Journal of Geo-Information**, v. 9, n.149, 21 p., 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2220-9964/9/3/149>. Acesso em: 13 jan. 2023.

JOHNSON, H. P.; HELFERTY, M. The Geological Interpretation of Side-Scan Sonar. **Reviews of Geophysics**, v. 28, n. 4, p. 357-380, nov. 1990. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/RG028i004p00357>. Acesso em: 10 jan. 2023.

JUNG, D.; KIM, J.; BYUN, G. Numerical Modeling and Simulation Technique in Time-domain for Multibeam Echo Sounder. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, n. 10, p. 225-234, set. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2092678216305179>. Acesso em: 11 jan. 2023.

KRAEUTNER, P. H. *et al.* Multi-Angle Swath Bathymetry Sidescan Quantitative Performance Analysis. **In Proceedings of the Oceans'02**, Biloxi, MI, USA, p. 2253–2263, 29–31 out. 2002. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1191981>. Acesso em: 16 jan. 2023.

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, jan. 2000. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/855385>. Acesso em: 12 jan. 2023.

MOHAMMADLOO, T. H.; SNELLEN, M.; SIMONS, D. G. Multi-beam echo-sounder bathymetric measurements: Implications of using frequency modulated pulses. **Acoustical Society of America**, v 144, n. 2, p. 842-860, ago. 2018. Disponível em: <https://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/1.5050816>. Acesso em: 10 fev. 2023.

MORAES, E. C. in: MORAES. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, cap. 1, p. 1-22. Disponível em: [http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1\\_ECMoraes.pdf](http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf). Acesso em: 09 jan. 2023.

NADIR. *In*: DICIO, Dicionário Online de Português. Porto: 7Graus, 2023. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/nadir>. Acesso em: 03 jan. 2023.

NASCIMENTO, G. A. G. **Verificação da Aplicabilidade de Dados Obtidos por Sistema LASER Batimétrico Aerotransportado à Cartografia Náutica**. Presidente Prudente – SP, 110 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas), Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2019.

ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). Especificação da OHI para Levantamentos Hidrográficos: Publicação Especial N° 44 (S-44). **Principauté de Monaco: International Hydrographic Bureau**, 2020.

ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). **S-32 IHO - Hydrographic Dictionary / Multilingual Reference for IHO Publications**. Hydrographic Dictionary Working Group (HDWG). 2019.

ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). **Manual on Hydrography**: Publication C-13. 1 Ed. Monaco: IHO, 2005. 539 p.

PETROBRAS. **Bacia de Campos**. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/bacia-de-campos.htm#:~:text=Com%2025%20unidades%20em%20produ%C3%A7%C3%A3o,norte%20do%20Rio%20de%20Janeiro>. Acesso em: 08 dez. 2022.

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. **Desenvolvimento de Metodologia para Aplicação de Dados Adquiridos com o Sonar de Varredura Lateral Interferométrico na Produção de**

**Documentos Náuticos.** Niterói - RJ, 126p. Tese (Doutorado em Dinâmica dos Oceanos e da Terra), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2023.

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, nov. 2020. Disponível em: <https://ihr.iho.int/articles/evaluation-of-the-precision-of-phase-measuring-bathymetric-side-scan-sonar-relative-to-multibeam-echosounders/>. Acesso em: 29 mar. 2023.

PING DSP. **3DSS-iDX:** Integrated INS Shallow Water Mapping/Imaging System. Datasheet, 2020. Disponível em: <https://geo-matching.com/uploads/default/3/d/3dss-idx-brochure.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2023.

PING DSP. **CAATI.** 2018. Disponível em: <https://www.pingdsp.com/techCaati>. Acesso em: 30 jan. 2023.

R2SONIC. **5 main differences between multibeam and interferometric side scan sonars,** 2018. Disponível em: <https://www.r2sonic.com/interferometric-side-scan-sonar-vs-mbes/#:~:text=At%20nadir%2C%20all%20returns%20have,spot%20in%20the%20nadir%20area>. Acesso em: 03 jan. 2023.

RONHOVDE, A. et al. High-resolution Beamforming for Multibeam Echo Sounders Using Raw EM3000 Data. In: **Oceans '99**, 1999. IEEE. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/804997>. Acesso em: 05 jan. 2023.

SBG SYSTEMS. **Miniature High Performance:** Inertial Sensors. Datasheet, 2021. Disponível em: [https://www.sbg-systems.com/wp-content/uploads/Ellipse\\_Series\\_Leaflet.pdf](https://www.sbg-systems.com/wp-content/uploads/Ellipse_Series_Leaflet.pdf). Acesso em: 30 jan. 2023.

SBG SYSTEMS. **Tactical Grade Mems:** Inertial Systems. Datasheet, 2022. Disponível em: [https://www.sbg-systems.com/wp-content/uploads/Ekinox\\_Series\\_Leaflet.pdf](https://www.sbg-systems.com/wp-content/uploads/Ekinox_Series_Leaflet.pdf). Acesso em: 30 jan. 2023.

SEWADA, J. S. *et al.* Wideband Signals for Phase Differencing Sonar Systems. **2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)**, 5 p., 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8559146>. Acesso em: 17 jan. 2023.

SOUZA, L. A. P. **Revisão Crítica da Aplicabilidade dos Métodos Geofísicos na Investigação de Áreas Submersas Rasas.** 2006. 284 f. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21133/tde-30102006-171206/publico/TESE\\_Laps\\_2006.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21133/tde-30102006-171206/publico/TESE_Laps_2006.pdf). Acesso em: 27 mar. 2023.

SUBARSYAH; ARIFIN, L. Seabed Characterization Through Image Processing of Side Scan Sonar Case Study: Bontang and Batam. **Bulletin of the Marine Geology**, v. 34, n. 1, p. 37 – 50, jun. 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/339169804\\_Seabed\\_Characterization\\_through\\_Image\\_Processing\\_of\\_Side\\_Scan\\_Sonar\\_Case\\_Study\\_Bontang\\_and\\_Batam](https://www.researchgate.net/publication/339169804_Seabed_Characterization_through_Image_Processing_of_Side_Scan_Sonar_Case_Study_Bontang_and_Batam). Acesso em: 10 fev. 2023.

TABACNIKS, M. H. **Conceitos Básicos da Teoria dos Erros**. Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 2009, 23 p. Disponível em: [http://fap.if.usp.br/~tabacnik/tutoriais/tabacniks\\_concbasteorerr\\_rev2007.pdf](http://fap.if.usp.br/~tabacnik/tutoriais/tabacniks_concbasteorerr_rev2007.pdf). Acesso em: 09 jan. 2023.

TELEDYNE. **Caris Hips and Sips**. Datasheet, 2020. Disponível em: <https://www.teledynecaris.com/en/products/hips-and-sips/>. Acesso em: 18 jan. 2023.

VICENTE, J. *et al.* CUBE: A Nova Informação Hidrográfica. In: PIANC PORTUGAL, 2011, Porto, POR. **7<sup>as</sup> Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária**. Porto: Faculdade Engenharia da Universidade do Porto, 2011. 15 p. Disponível em: <https://pianc.pt/wp-content/uploads/2021/03/7as-jornadas/17.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2023.

WALL, R. W. Simple Methods for Detecting Zero Crossing. **IEEE Xplore**, v. 3, p. 2477-2481, dez. 2003. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1280634>. Acesso em: 13 jan. 2023.