

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

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SONAR DIFERENCIADOR
DE FASE EDGETECH 4600 NA DETECÇÃO DE FEIÇÕES
BATIMÉTRICAS DE PEQUENA ESCALA NO ENTORNO DA
CIDADE DE FLORIANÓPOLIS, ILHA DE SANTA CATARINA.**

RAFAEL SARTORI VALDIVIEZO DE CAMARGO

Niterói

2017

RAFAEL SARTORI VALDIVIEZO DE CAMARGO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SONAR DIFERENCIADOR
DE FASE EDGETECH 4600 NA DETECÇÃO DE FEIÇÕES
BATIMÉTRICAS DE PEQUENA ESCALA NO ENTORNO DA
CIDADE DE FLORIANÓPOLIS, ILHA DE SANTA CATARINA.**

Dissertação submetida ao programa
de pós-graduação em dinâmica dos
oceanos e da terra da Universidade
Federal Fluminense para obtenção
do grau de mestre em geologia e
geofísica marinha.

Orientador: Dr. Arthur Ayres Neto

Niterói

2017

C172

Camargo, Rafael Sartori Valdiviezo de

Análise do desempenho do Sonar Diferenciador de Fase Edgetech 4600 na detecção de feições batimétricas de pequena escala no entorno da cidade de Florianópolis, ilha de Santa Catarina / Rafael Sartori Valdiviezo de Camargo. – Niterói : [s.n.], 2017.

104 f.

Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha) – Universidade Federal Fluminense, 2017.

1.Sonar Diferenciador de Fase. 2.Sonar de Varredura Lateral. 3.Interferometria. 4.Superfície batimétrica. I.Título.

CDD 621.3895

Rafael Sartori Valdiviezo de Camargo

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SONAR DIFERENCIADOR DE
FASE EDGETECH 4600 NA DETECÇÃO DE FEIÇÕES
BATIMÉTRICAS DE PEQUENA ESCALA NO ENTORNO DA
CIDADE DE FLORIANÓPOLIS, ILHA DE SANTA CATARINA.**

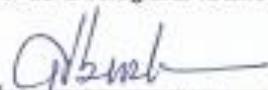
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre
Área de Concentração: Geologia e Geofísica

Aprovada em 04/07/2017

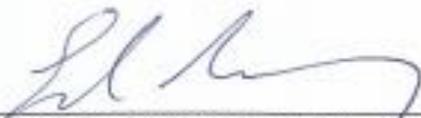
BANCA EXAMINADORA



Prof. Arthur Ayres Neto, Dr (Orientador)
Deptº de Geologia/LAGEMAR UFF



Prof. Gilberto Tavares de Macado Dias, Dr.
Deptº de Geologia/LAGEMAR-UFF



Prof. Estefan Monteiro da Fursaca, Dr.
Deptº de Geologia/LAGEMAR-UFF



Prof. Hélio Heringer Villeha, Dr.
UERJ

Dedico este trabalho à minha avó,
dona Lourdes, pelas cobranças e
principalmente por todo carinho.

Agradecimentos

Agradeço ao Ministério do Meio Ambiente pelo financiamento do projeto MMA-Riscos através do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, possibilitando o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao professor Dr. Antônio Klein da Universidade Federal de Santa Catarina por disponibilizar os dados utilizados neste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Dr. Arthur Ayres pela oportunidade de trabalharmos juntos, pela orientação ao longo desses dois anos e pela confiança creditada a mim.

Resumo

A tecnologia dos Sonares Diferenciadores de Fase (SDF) tem passado por avanços significativos para aprimorar a precisão batimétrica e detecção de feições, particularmente em águas rasas. Neste contexto, este trabalho apresenta resultados sobre a detecção de alvos de pequena escala ($<1 \text{ metro}^3$) em três ambientes distintos no entorno de Florianópolis, SC, utilizando-se um SDF Edgetech 4600, e aponta suas vantagens e/ou limitações. O SDF Edgetech 4600, de 540 khz, forneceu simultaneamente batimetria de varredura e imagens de sonar de varredura lateral (SVL). Os dados foram tratados no software Caris Hips & Sips, onde mosaicos e superfícies batimétrica foram criadas. Na região da Ponta das Aranhas, situada no nordeste de Florianópolis, o menor alvo encontrado foi uma depressão de 0,23 m de profundidade e 1,5 m de diâmetro. Também foram registradas grandes feições denominadas megaondulações catenárias. Balanços da embarcação aliados a uma má compensação pelo MRU impuseram limitações ao SDF, degradando significativamente os dados batimétricos. Ruídos mostraram-se uma fonte constante de degradação. Na Lagoa da Conceição, situada na região centro-leste de Florianópolis, os menores alvos encontrados foram uma canoa canadense de fibra naufragada, com 0,98 m de largura central; 4,05 m de comprimento; e 0,55 m de altura, onde suas bordas foram bem detalhada, e várias pockmarks, sendo que a menor resolvida pelo SDF apresentou 0,50 m de diâmetro e 0,03 m de profundidade. As limitações apresentadas neste local estão relacionadas à pequenas distâncias do fundo em que o sistema operou e aos ruídos. No Canal da Barra da Lagoa, também situado na região centro-leste de Florianópolis, os menores alvos encontrados foram pequenas rochas dispostas sobre o leito, tendo a menor delas 0,40 m de diâmetro e 0,05 m de altura. Um alvo de formato delgado também foi identificado, medindo 0,80 m de largura e 0,30 a 0,40 m de altura. As limitações apresentadas pelo SDF nesta área estão relacionadas à pequenas distâncias do fundo em que o sistema operou, aos ruídos, à incapacidade de resolver estruturas verticais e múltiplas reflexões. Desta maneira, este estudo mostrou que o SDF Edgetech 4600 é uma ferramenta com plena capacidade de caracterizar bem alvos pequenos, trazendo segurança para a navegação em águas rasas e para população que

habita regiões costeiras.

palavras-chave: sonar diferenciador de fase, sonar de varredura lateral, interferometria, detecção de alvos, Florianópolis, ruído, superfície batimétrica

Abstract

Phase Discrimination Sonars (PDS) technology has undergone significant advances in improving bathymetric accuracy and feature detection, particularly in shallow water. In this context, this work presents results on the detection of small scale targets (<1 m³) in three distinct environments of Florianópolis city, SC, using an Edgetech 4600 PDS, and points out its advantages and/or limitations. The PDS Edgetech 4600, with 540 kHz, provided both sweep bathymetry and sidescan sonar (SSS) images. The data were processed in the Caris Hips & Sips software, where mosaics and bathymetric surfaces were created. In the region of Ponta das Aranhas, located in the northeast of Florianópolis, the smaller target was a depression of 0.23 m depth and 1.5 m in diameter. Large features called catenary megaripples were also recorded. The vessel motions combined with poor compensation by MRU imposed limitations on PDS, significantly degrading bathymetric data. Noise has been shown to be a constant source of degradation. In Lagoa da Conceição, located in the central-eastern region of Florianópolis, the smallest targets found were a wreck of a fiber canadian canoe, with 0.98 m of central width; 4,05 m in length; and 0.55 m high, where its edges were well detailed, and several pockmarcks. The smaller pockmarck resolved by PDS presented 0.50 m in diameter and 0.03 m in depth. The limitations presented here are related to a survey with small distances between the sea floor and the sonar, and noise. In the Barra da Lagoa channel, also located in the eastern central region of Florianópolis, the smallest targets found were small rocks arranged on the channel bed, the smallest being 0.40 m in diameter and 0.05 m in height. A slender-shaped target was also identified, measuring 0.80 m in width and 0.30 to 0.40 m in height. The limitations presented by the PDS in this area are related also to a survey with small distances between the sea floor and the sonar, the noise, the inability to solve vertical structures and multiple reflections. In this way, this study showed that the PDS Edgetech 4600 is a tool with full capacity to characterize small targets well, bringing safety for navigation in shallow waters and for population that inhabits coastal regions.

keywords: *phase discrimination sonars, sidescan sonar, interferometry, target detection, Florianópolis, noise, bathymetric surface.*

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Visualização 3D do Sonar de Varredura Lateral sendo rebocado sobre uma superfície batimétrica, e de suas característica de emissão de pulso e cobertura acústica. Retirado de Atherton (2011). 15
- Figura 2** – Definições geométricas dos ângulos e distâncias geradas pela emissão de um pulso acústico por um arranjo de transdutores. Retirado de Hughes Clarke (2013a). 17
- Figura 3** - Três fatores que influenciam o retroespalhamento do leito marinho (de cima para baixo): inclinação do local de ensonificação, rugosidade da superfície, propriedades intrínsecas do fundo (e.g. influência de rochas nas camadas de subsuperfície). Retirado de Blondel (2009). 19
- Figura 4** – Fotografia demonstrando o Sonar Diferenciador de Fase Edgetech 4600 e seu arranjo de transdutores laterais..... 26
- Figura 5** - Gravura exemplificando a composição de transdutores do SDF Edgetech 4600. Fonte: Retirado de EdgeTech (2011). 30
- Figura 6** – Localização da área de sondagem na Ponta das Aranhas. O local onde a sondagem foi realizada está representado pela superfície batimétrica, na porção nordeste de Florianópolis, SC, entre a praia do Moçambique, ao sul, e a praia do Santinho, ao norte. 32
- Figura 7** - Localização da área de sondagem na Lagoa da Conceição. O local onde a sondagem foi realizada está representado pela superfície batimétrica, na porção centro-leste de Florianópolis, SC. 33
- Figura 8** - Localização da área de sondagem no Canal da Barra da Lagoa. O local onde a sondagem foi realizada está representado pela superfície batimétrica, na porção leste de Florianópolis, SC. 34
- Figura 9** - A) Receptores das antenas de GPS e Heading; B) Topside e junctionbox do MRU instalados em ambiente seco da embarcação; C) Da esquerda para direita: tela de controle da batimetria, tela de controle do sonar de varredura e tela de navegação; D) Embarcação coletando dados com a haste fixa na lateral e as antenas instaladas acima. 36
- Figura 10** – Localização dos marégrafos e linhas de costa referente a todas as áreas de levantamento batimétrico sondadas para o projeto MMA Riscos..... 37
- Figura 11** - Fluxograma do processamento interno de aquisição de dados do SDF EdgeTech 4600. Retirado de Porpilho (2015). 39
- Figura 12** – Fluxo de procedimentos que devem ser realizados durante o tratamento de dados batimétricos utilizando o software Caris Hips & Sips. Em sequência temos: Preparação, Carregamento de dados, Processamento de dados, Controle de qualidade e Geração de produtos. Retirado de Caris (2015)..... 40
- Figura 13** – Menor alvo encontrado na Ponta das Aranhas, caracterizado como uma depressão. Quadro superior esquerdo: superfície batimétrica localizando o alvo e o perfil. Quadro superior direito: mosaico de intensidades localizando o alvo. Quadro inferior: perfil demonstrando as medidas do alvo. Escalas de distância de 40m. Eixos profundidade x distância em

	metros.	44
Figura 14	– Quadro superior: superfície batimétrica identificando os perfis retirados das megaondulações. Quadro inferior: localização dos perfis sobre as megaondulações representadas no mosaico de intensidades. Escalas de distância de 100m.	45
Figura 15	– Perfis representando as megaondulações, retirados da superfície batimétrica. De cima para baixo: perfil AA', perfil BB', perfil CC'. Eixos profundidade x distância em metros.	46
Figura 16	– Três diferentes feições sedimentares amostradas pelo SDF. Quadro superior: superfície batimétrica, com escala de profundidade variando entre 1,8m e 27,8m. Quadro inferior: mosaico de intensidades, com a escala de intensidade variando entre 0,01 e 20 watts. Quadro vermelho direito: megaondulações. Quadro vermelho central: feições circulares. Quadro vermelho esquerdo: pequenas feições onduladas. Escalas de distância de 50m.	48
Figura 17	– Limitações apresentadas pelo SDF. Quadro esquerdo: superfície batimétrica revelando as limitações do SDF. Escala de profundidades varia entre 1,8m e 27,8m. Quadro direito: mosaico de intensidades revelando as limitações do SDF. Escala de intensidades varia entre 0,01 e 20 watts. Quadro vermelho: Rolling. Quadros verdes: Yawning. Escalas de distância de 50m.	52
Figura 18	– Seção da linha 009 como superfície de densidade de pontos batimétricos exemplificando yawning e Pitching. Escala de densidade varia entre 1 e 131 pontos por grid. Escala de distância de 100m.	53
Figura 19	– Exemplo de varreduras da linha 009 compondo uma pequena superfície, observadas no software Caris. Quadro superior: visão traseira das varreduras exaltando os ruídos na região do nadir e nos feixes mais externos. Quadro inferior: visão em 3D das varreduras compondo uma pequena superfície, exagerada verticalmente em cinco vezes.	55
Figura 20	– Perfis de mensuração dos ruídos presentes na superfícies batimétricas. Quadro esquerdo: localização do perfil A sobre a superfície. Quadro direito: localização do perfil B sobre a superfície. Escalas de profundidade variam de 0,59m a 27,59m. Escalas de distância de 50m. Eixos profundidade x distância em metros.	57
Figura 21	– Perfis que demonstram os efeitos causados pelas movimentações da embarcação e como eles modificam a superfície quando dados batimétricos de duas linhas, 007 e 009, são mesclados. Eixos profundidade x distância em metros.	59
Figura 22	– Superfícies geradas pela união entre as linhas 007 e 009. Quadro A: superfície batimétrica (m). Quadro B: superfície de densidade. Quadro C: superfície de desvio padrão (m). Quadro D: superfície de incerteza (m). Escala de distância de 100m.	61
Figura 23	- superfícies batimétricas geradas com a ferramenta CUBE usando diferentes tamanhos de grids: 0,10m; 0,20m; 0,30m e 0,40m. Escala de distância de 45m.	62
Figura 24	– fotografia da canoa canadense de fibra encontrada com o SDF e resgatada por mergulhadores.	63

- Figura 25** – Imagem do SVL evidenciando a canoa e suas medidas retiradas utilizando-se o software Caris. Quadro A: 0,98m de largura central. Quadro B: 4,05m de comprimento. Quadro C: 0,55m de altura. 64
- Figura 26** – Registro de amplitudes retirado com o software Caris, evidenciando a altas intensidades refletidas pelas bordas da canoa (setas verde e amarela), seguidas da zona de sombra acústica criada por elas (linha branca). 66
- Figura 27** – Canoa representada pelas varreduras batimétrica da linha 074. A canoa está destacada pelos círculos amarelos. Quadro superior: pontos batimétricos das varreduras com visão traseira. Quadro central: Imagem do SVL. Quadro inferior: visualização 3D das varreduras exageradas verticalmente em 2 vezes. 67
- Figura 28** - Canoa representada pelas varreduras batimétrica da linha 078. Não é possível apontar onde a canoa aparece nos feixes externos. Quadro superior: varreduras batimétricos com visão traseira. Quadro central: Imagem do SVL. Quadro inferior: visualização 3D das varreduras exageradas verticalmente em 2 vezes. 68
- Figura 29** - superfície batimétrica foi gerada por grids de 0,15 x 0,15m, destacando a canoa. Apenas os dados da linha 074 foram utilizados nesta superfície. Escala de profundidade varia de 4,06m a 5,26m. Escala de distância de 15m. 70
- Figura 30** - superfície batimétrica foi gerada por grids de 0,15 x 0,15m. A canoa não pode ser identificada nos feixes externos. Apenas os dados da linha 078 foram utilizados nesta superfície. Escala de profundidade varia de 3,15m a 5,55m. Escala de distância de 20m. 71
- Figura 31** - superfície batimétrica gerada por grids de 0,15 x 0,15m, com os dados das linhas 074 e 078. Escala de profundidade varia de 3,23m a 5,48m. Escala de distância de 15m. 72
- Figura 32** - superfície batimétrica 3D demonstrando a distribuição das pockmarcks pelo fundo da Lagoa da Conceição. A superfície foi construída com grids de 0,30 x 0,30m. 74
- Figura 33** – Localização dos perfis AA' e BB' sobre as pockmarcks em uma superfície batimétrica (superior) e em um mosaico de intensidades. Escala de distância de 40m. 75
- Figura 34** – Perfis AA' (superior) e BB' (inferior) mensurando algumas pockmarcks presentes na Lagoa da Conceição. Eixos profundidade x distância em metros. Círculo vermelho destaca a menor pockmarck encontrada. 76
- Figura 35** – Perfil que exemplifica as deformações dos feixes externos apresentadas pelas varreduras, durante o levantamento das áreas mais rasas da Lagoa da Conceição. Eixos profundidade x distância em metros. 77
- Figura 36** – Superfície batimétrica em 3D demonstrando como as deformações sofridas pelos feixes externos nas áreas mais rasas da Lagoa da Conceição distorcem a superfície batimétrica. 79
- Figura 37** – Quadro superior: visão traseira da nuvem de pontos formada por um setor com diversas varreduras, destacando como suas extremidades são distorcidas. Quadro inferior: visualização 3D das varreduras com suas extremidades distorcidas, exagerada verticalmente em 2,9 vezes. 80

- Figura 38** - Perfis de mensuração dos ruídos presentes na superfícies batimétricas. Quadro esquerdo: localização do perfil 01 (superior) sobre a superfície. Quadro direito: localização do perfil 02 (inferior) sobre a superfície. Escalas de profundidade variam de -0,97m a 7,03m. Escalas de distância de 35m. Eixos profundidade x distância em metros. 82
- Figura 39** - Superfícies geradas pela união entre duas linhas da Lagoa da Conceição. Quadro A: superfície batimétrica (m). Quadro B: superfície de densidade. Quadro C: superfície de desvio padrão (m). Quadro D: superfície de incerteza (m). Escala de distância de 100m. 84
- Figura 40** – Superfície batimétrica identificando os menores alvos detectados pelo SDF no Canal da Barra da Lagoa, assim como os perfis amostrados sobre os alvos. Escala de profundidades varia de 0m a 9m. Escala de distância de 15m. 85
- Figura 41** – Perfis superior e inferior amostrados na superfície batimétrica, mensurando os menores alvos encontrados no Canal da Barra da Lagoa. O perfil inferior destaca o menor alvo encontrado entre eles. Eixos profundidade e distância em metros. 86
- Figura 42** – imagem do SVL demonstrando as características do Canal, destacando os alvos encontrados na superfície batimétrica (círculos vermelho)..... 87
- Figura 43** – Superfície batimétrica destacando outro alvo encontrado na entrada do Canal da Barra da Lagoa (quadro vermelho). Escala de profundidade varia de 0m a 9m. Escala de distância de 30m. 87
- Figura 44** – Imagem de SVL caracterizando a entrada do Canal, destacando o alvo encontrado (quadro vermelho) e evidenciando as fraturas da rocha que não aparecem na superfície batimétrica (quadro verde). 88
- Figura 45** – Imagem de SVL destacando o registro das quilhas das embarcações que se encontram atracadas nos trapiches ao longo do Canal da Barra da Lagoa (quadro vermelho). Imagem de satélite retirada do software Google Earth Pro. Escala de distância de 37m. 90
- Figura 46** - Limitações relacionadas com a distância mínima de operação entre o sensor e o fundo. Quadro superior: nuvem de pontos gerada por varias varreduras, destacando as modificações sofridas. Quadro inferior: visão 3D das varreduras com exagero vertical de 1,4 vezes. Escala de profundidade variando em 0,50m. 91
- Figura 47** – Superfície batimétrica demonstrando a degradação da batimetria devido as limitações de o peração do SDF. Quadro superior: perfil batimétrico retirado da superfície batimétrica. Quadro inferior: superfície batimétrica detalhando as alterações sofridas no canal. Eixos profundidade x distância em metros. Escala de distância de 100m. 92
- Figura 48** - Superfície batimétrica (superior) e mosaico de intensidade (inferior) destacando as estruturas verticais de um trapiche presentes em uma seção do canal, e que não são encontradas na superfície batimétrica. Escala de distância de 35m. 94
- Figura 49** - Superfície batimétrica (superior) e mosaico de intensidade (inferior) destacando as estruturas verticais de uma rampa presente em uma seção do canal, e que não é encontrada na superfície batimétrica. Escala de distância de 35m. 95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações chave do SDF Edgetech 4600. Retirado de EdgeTech (2011).....	28
Tabela 2 – Especificações de binagens utilizadas para cada área de sondagem durante a coleta de dados batimétricos utilizando o software Hypack/Hysweep e o SDF Edgetech 4600.....	38
Tabela 3 – Resumo de alvos encontrados pelo SDF Edgetech 4600 para cada área de estudo.....	97

SUMÁRIO

1 - Introdução	1
2 – Objetivos	4
2.1 - Geral	4
2.2 - Específicos	4
3 – Motivação	5
4 – Fundamentação teórica	6
4.1 - Acústica Submarina	6
4.1.1 - Unidades de Medidas Acústicas	8
4.1.2 - Equação do Sonar	9
4.1.3 - Reflectividade Acústica	11
4.1.4 - Refração	13
4.1.5 - Múltiplas Acústicas	13
4.2 - Sonar de Varredura Lateral	14
4.3 - SVL Diferenciador de Fase	22
4.4 - Sistema Diferenciador de Fase Edgetech 4600	25
4.4.1 - Desempenho	27
4.4.2 - Operação do sistema Edgetech 4600	29
5 - Materiais e Métodos	31
5.1 – Área de Estudo	31
5.1.1 – Ponta das Aranhas	31
5.1.2 – Lagoa da Conceição	33
5.1.3 – Canal da Barra da Lagoa	34
5.2 - Aquisição de dados:	35
5.3 – Processamento	39
6–Resultados e Discussão	42
6.1- Ponta das Aranhas	42
6.1.1 – Identificação de Alvos	42
6.1.2 - Limitações:	51
6.2 – Lagoa da Conceição	62
6.2.1 - Identificação de alvos	62
6.2.2 – Limitações	77
6.3 - Canal da Barra da Lagoa	84
6.3.1 - Identificação de Alvos	84

6.3.2 – Limitações.....	91
7 – Conclusões	97
8 – Referências Bibliográficas	100

1 - Introdução

O uso de métodos geofísicos na investigação geológica e geotécnica, tanto em terra quanto em água, tem aumentado muito nas últimas décadas. Profissionais, ao implementarem estudos em terrenos submersos, têm optado por métodos que produzam informações mais detalhadas que aquelas geradas pelos métodos convencionais de investigação (ecobatímetros monofeixe), priorizando o aprimoramento da caracterização da área para torná-la, dentre outros aspectos, mais segura (Souza 2006).

Segundo Souza (2006), nestas últimas três décadas tem se voltado ainda mais a atenção para as técnicas utilizadas na investigação de áreas rasas ou muito rasas, devido principalmente a crescente ocupação das regiões costeiras que, conseqüentemente, gera demandas voltadas a um desenvolvimento econômico alinhado à preservação do meio ambiente (estudos de impacto ambiental, poluição, caracterização para empreendimentos costeiros). O comércio marítimo, por exemplo, é definitivamente uma parte vital da economia mundial atual. O uso crescente das vias navegáveis como corredores de transporte, assim como o aumento progressivo do tamanho das embarcações geram demandas por informações mais precisas sobre as características físicas destes corredores, particularmente sobre suas profundidades (Gostnell 2005).

Métodos geofísicos tem especial relevância, pois constituem um conjunto de métodos indiretos de investigação que possibilitam fácil acesso aos locais de interesse, permitem a observação contínua da superfície e subsuperfície do fundo marinho ao longo de um perfil, e tornam viável a rápida observação de grandes áreas (Souza 2006).

Levantamentos de dados geofísicos realizados em águas rasas não cartografadas frequentemente possuem variáveis que representam riscos a integridade e desenvolvimento da atividade, como a presença de altos fundos e rochas, o embate de ondas e pequenas profundidades, entre outros. Além disso, águas muito rasas impõe limitações a equipamentos muitas vezes desenvolvidos para operações em áreas com diferentes características. Nos ecobatímetros multifeixe, a configuração do tamanho de uma varredura

batimétrica, tipicamente de três vezes a profundidade local, torna-se um fator restritivo (e.g. trabalhando em 4 metros de profundidade obtemos apenas 12 metros de varredura acústica). Quanto mais raso é o ambiente, mais linhas de sondagem são necessárias para que o fundo seja totalmente coberto. Este fator leva ao gasto de uma quantidade maior de tempo no levantamento, além de aumentar o tempo de permanência em regiões que apresentam riscos a segurança da atividade (e.g. próximo de costões rochosos ou zona de arrebatamento de ondas, assim como na presença de baixios, onde há risco de encalhe ou danos irreparáveis na embarcação). Por razões de custo e segurança é sempre desejável que se minimize o tempo gasto em sondagens de áreas rasas. Estas preocupações, entre outras, direcionaram o desenvolvimento dos ecobatímetros diferenciadores de fase (Gostnell 2005).

Ecobatímetros multifeixe são ferramentas valiosas para a determinação da profundidade quando a cobertura total do fundo é necessária. Estes sistemas permitem uma completa ensonificação do fundo marinho com o consequente aumento da capacidade de resolução e detecção de pequenas feições (IHO 2005).

Os sistemas batimétricos mais atuais utilizam dois tipos de tecnologias capazes de coletar informações batimétricas por uma faixa (“varredura”) no fundo marinho. Os Formadores de Pegadas (“Beamforming”), chamados de “Multibeam” ou Multifeixe (MBES), e os Sonares Diferenciadores de Fase (“Phase Discrimination Sonars” - SDF), também chamados de Interferométricos ou SideScan Batimétrico (Hughes Clarke et al. 1996).

Na última década, a tecnologia SDF tem passado por avanços significativos e a última geração desses sistemas competem com os MBES “beamformers” em precisão batimétrica e detecção de feições, particularmente em águas rasas. O SDF tornou-se uma ferramenta muito útil para levantamentos com pequenas embarcações e veículos submarinos autônomos (AUV), com vantagens significativas em termos de custo, cobertura batimétrica e aquisição simultânea ao sonar de varredura lateral (Hiller 2011). Segundo Brisson et al. (2014) estes sistemas podem gerar uma economia financeira de 50%, quando comparados aos MBES.

Os SDF tipicamente apresentam uma varredura batimétrica de até 12 vezes a altura do instrumento (relacionado à profundidade local). Isto significa

que em uma profundidade de 4 metros, o SDF é capaz de coletar dados batimétricos em uma faixa de quase 50 metros (Cloet 1988). Além de adquirirem uma maior quantidade de dados batimétricos em uma densa nuvem de pontos, os SDF se destacam por fornecerem dados batimétricos e sonográficos simultaneamente (com resoluções similares e posicionamento idêntico), capazes de gerar mapas em 3D que aumentam a confiança na detecção de feições e auxiliam na interpretação de dados (Cloet 1988; Collier & Brown 2005; Fonseca & Calder 2005; Raineault et al. 2013; Brisson et al. 2014).

Embora estejam em funcionamento há décadas, tradicionalmente estes sistemas apresentam deficiências como a falta de cobertura dentro da região do nadir, problemas com ruídos internos e ambientais, assim como dificuldades em discretizar múltiplos ângulos de retorno dos sinais acústicos (i.e. múltiplos retornos de diferentes ângulos ao mesmo tempo), que acabam limitando a eficácia da tecnologia (de Moustier 1993; Brisson et al. 2014). A tecnologia dos SDF pode fornecer grandes benefícios à criação de cartas náuticas, entretanto, ainda são considerados como uma tecnologia em desenvolvimento pela indústria marítima.

Apesar desses problemas, recentes avanços na eletrônica e algoritmos envolvidos combinados ao uso de um número maior de receptores, levaram a um grande aprimoramento da precisão desta tecnologia (Griffiths et al. 1997; Kraeutner & Bird 1999; Wilby 1999).

Ainda que existam numerosos trabalhos científicos escritos sobre a funcionalidade teórica destes sistemas e uma variedade de estudos conduzidos pelos fabricantes, têm ocorrido poucas análises independentes da sua performance in situ (Gostnell 2005). Este estudo utilizou um SDF Edgetech 4600 para obtenção de imagens de sonar varredura lateral (SVL) e de dados batimétricos em três ambientes rasos com diferentes características ambientais com o objetivo de investigar o nível de detecção de feições batimétricas de pequena escala, assim como destacar suas limitações e vantagens de operação entre os diferentes ambientes.

2 - Objetivos

2.1 - Geral

Analisar o desempenho do Sistema Diferenciador de Fase Edgetech 4600 na detecção de alvos de pequena escala (< 1 metro³) em águas rasas de três ambientes distintos no entorno da ilha de Florianópolis, Santa Catarina, apontando suas vantagens e/ou limitações, como subsídio para sua inserção e solidificação no mercado.

2.2 - Específicos

- Identificar os menores alvos possíveis e analisar o desempenho do SDF na região da Ponta das Aranhas;
- Identificar os menores alvos possíveis e analisar o desempenho do SDF na região da Lagoa da Conceição;
- Identificar os menores alvos possíveis e analisar o desempenho do SDF na região do Canal da Barra da Lagoa;

3 - Motivação

A tecnologia dos SDF, apesar de ainda estar em estágio de desenvolvimento, é considerada como uma tecnologia capaz de substituir os sonares multifeixes. Entretanto, muito ainda deve ser investigado para se compreender as vantagens e desvantagens do método.

4 – Fundamentação teórica

4.1 - Acústica Submarina

O oceano está repleto de energias acústicas oriundas de diversas fontes – quebra de ondas, vento, comunicação sônica entre cetáceos, entre outros – todas se propagando naturalmente abaixo da superfície. Discriminar um pulso particular ou um padrão acústico é realmente desafiador, embora a energia acústica produzida artificialmente exiba uma tendência de ser melhor estruturada, por seguir padrões de repetição e de frequência (Atherton 2011).

O som é descrito como vibrações acústicas ou perturbações transmitidas em formato de ondas através de um meio elástico. Existem dois tipos mais comuns de ondas elásticas: Longitudinais e Transversais. Ambas são iniciadas por distúrbios que transferem energia ao meio, entretanto suas formas de propagação divergem. As ondas longitudinais – também denominadas “compressivas” ou “ondas P” – se deslocam através da compressão e relaxamento de partículas do meio elástico, e tal movimentação se dá na mesma direção de propagação da onda, enquanto que as ondas Transversais – também denominadas “cisalhantes” ou “ondas S” – deslocam-se através da movimentação de partículas em direções perpendiculares à sua direção de propagação, análoga as ondas na superfície d’água (Lurton 2010; Blondel 2009).

Algumas das propriedades mais importantes das ondas acústicas são a velocidade do som, a frequência e o comprimento de onda.

A velocidade do som refere-se à velocidade com a qual uma onda se propaga através do meio elástico. O princípio baseia-se em medir quantos metros (L) uma crista de onda se desloca em um determinado tempo (T). Dividindo-os (L/T), obtemos a velocidade da onda (C). Esta se caracteriza pela velocidade de fase da onda, que se difere da velocidade de grupo. Entretanto, para ecossondas, essa diferença é praticamente insignificante. A velocidade varia tipicamente entre 1405 m/s em condições de água doce e 1550 m/s em condições de água salgada. O que determina a velocidade do som na água é

uma combinação entre temperatura, salinidade e pressão. Das citadas acima, mudanças na temperatura tem maior influência. Porém, conforme se aumenta a profundidade, a coluna d'água torna-se relativamente isoterma e a salinidade constante. Nestas condições a pressão passa a ter maior influência nas variações de velocidade (Blondel 2009; Atherton 2011).

É extremamente importante que se determine os perfis de velocidade ao longo da coluna d'água com precisão, pois a aplicação de seu valor ao tempo de retorno do sinal emitido remete a um cálculo preciso da distância de um objeto. Estes valores de velocidade podem ser calculados mergulhando-se um medidor de condutividade, temperatura e pressão (CTD) ou um perfilador de velocidade do som (SVP), ao longo de toda coluna d'água (IHO 2005; Blondel 2009).

A frequência (f) é obtida pela contabilização do número de ondas que passam por um determinado ponto durante o intervalo de um segundo. A medida é determinada em ciclos por segundo. Um ciclo por segundo equivale a 1 Hertz (Hz). Na acústica submarina, altas frequências são expressas em termos de kilohertz (1.000Hz por segundo = 1kHz) ou megahertz (1.000.000Hz por segundo = 1MHz). Se o tempo de passagem entre duas ondas pelo mesmo ponto for mensurado, encontra-se o período (T). Existe uma relação inversa entre a frequência e o período de uma onda, descrito por $f=1/T$. Na água, a velocidade do som praticamente independe da frequência. As variações relacionadas à frequência são menores que 2×10^{-4} , o que as torna insignificantes quando comparado às pequenas distâncias (ranges) em que os equipamentos operam (Blondel 2009; Atherton 2011).

O comprimento de onda, representado pela letra grega Lambda (λ), é a medida em metros entre duas cristas ou duas cavas subsequentes. Existe uma relação fixa entre comprimento de onda, frequência e velocidade do som: $\lambda=C/f$. Se a velocidade do som se mantém constante, um aumento na frequência gerará uma redução no comprimento de onda. Por outro lado, se a frequência se mantém constante, o comprimento de onda aumenta com o aumento da velocidade do som. Uma vez escolhida, a frequência de ondas acústicas geradas por ecossondas é constante (invariável), enquanto variações

na velocidade do som alteram o comprimento de onda (Blondel 2009; Atherton 2011).

4.1.1 - Unidades de Medidas Acústicas

À propagação do som atrelam-se três importantes individualidades e suas unidades de medidas. São elas: pressão acústica (micropascal), intensidade acústica (watts) e o nível sonoro – “sound level” – (decibel).

Uma onda sonora naturalmente altera a pressão do ambiente em um determinado ponto e tempo. A pressão total em qualquer instante de tempo contempla a pressão do ambiente somada a pressão acústica. Esta mudança de pressão é então captada pelo transdutor e quantificada pelo seu hidrofone calibrado, e usualmente é apresentada em micropascal (μPA). Pascal é um padrão internacional de unidade de pressão equivalente a um Newton por metro quadrado. Devido a características senoidais da onda de pressão acústica, existem métodos mais eficazes de dedução da pressão, além da amplitude média. Pode ser calculada a amplitude pela pressão de pico, que ocorre exatamente no pico da onda acústica, como também a amplitude pode ser mensurada com maior eficácia pela raiz quadrática média (RMS). O RMS é calculado medindo-se a pressão para cada ponto ao longo da onda, retirando o valor médio entre todos os pontos e calculando a raiz quadrada da média (IHO 2005; Blondel 2009; Atherton 2011).

A intensidade traduz-se como a energia de uma onda acústica que se propaga através de uma área em um determinado instante no tempo. Esta unidade de força (“powerunit”) é proporcional ao quadrado da pressão acústica. A frente da onda não exhibe pressão constante e quando um hidrofone calibrado é utilizado para captar as variações de pressão, as voltagens resultantes são utilizadas em um cálculo onde são determinadas medidas estatísticas de sua magnitude, o que resulta em valores de RMS, que comumente são expressos em Watts por metro quadrado. A força acústica é determinada pela integração da intensidade por uma determinada área. Como a força é proporcional a intensidade, quando a pressão é dobrada, quadruplica-se a intensidade e a força (IHO 2005; Blondel 2009; Atherton 2011).

O nível sonoro – “sound level” – é análogo ao “volume de um som” captado pelos ouvidos. É descrito em decibéis, que expressa taxas de força e intensidade. Uma escala logarítmica é utilizada na determinação da quantidade de força transmitida pelo sonar através de certa distância e tempo, fazendo-se útil devido ao fato de termos que lidar com pressões variando em diversas ordens de magnitude em um ambiente marinho. Devido a esta representação logarítmica de taxas, o decibel é uma unidade adimensional. Sendo assim, deve ser referenciado para que obtenha um valor. Na acústica submarina, o decibel é referenciado a uma escala de 1micropascal (1 μ Pa). Como força e intensidade em decibéis (dB) são expressas em uma escala logarítmica de base 10, cada incremento de 10dB equivale a um aumento da força transmitida em 10 vezes (20dB = 100x; 30dB = 1000x). Um número importante na acústica submarina é 3dB. Um aumento dessa magnitude duplica o nível sonoro, e -3dB reduz à metade (IHO 2005; Blondel 2009; Atherton 2011).

4.1.2 - Equação do Sonar

Em acústica submarina também é importante que se entendam as definições dos parâmetros que compõe a equação do sonar. O nível da fonte (“source level” - SL), a perda durante transmissão (“transmission loss” - TL), a força do alvo (“target strength” - TS), o nível de ruído (“noise level” - NL), o índice de directividade (“directivity Index” - DI) e o limiar de detecção (“detection threshold” - DT), juntos, compõe a equação: (Urick 1975; Atherton 2011)

$$DT \leq SL - 2TL + TS - (NL - DI)$$

O nível da fonte (SL) é definido como a energia acústica criada quando o transdutor é disparado e exhibe um nível sonoro a uma distância referenciada a 1m da fonte. Ressalta-se que é necessário um limite na criação de energia acústica. Maiores níveis de energia transmitidos para água levam a um aumento na razão sinal-ruído, o que geralmente é desejado em qualquer sistema de aquisição. Entretanto, níveis demasiados podem causar danos irreversíveis aos componentes do transdutor ou criar grande pressão acústica capaz de causar cavitação. Na cavitação, a pressão acústica oriunda da transformação de energia elétrica em mecânica efetivamente faz com que as

moléculas de água em contato com a face do transdutor vaporizem, formando bolhas de gás, que, conseqüentemente, deterioram a transmissão do sinal (Urlick 1975; Lurton 2010).

Ao longo da viagem através do meio aquoso, a onda acústica começa a perder intensidade (perda durante transmissão - TL), principalmente por dois motivos. Conforme a frente de onda se move ao longo da coluna d'água, ela se expande tanto no plano horizontal quanto no vertical. A certa distância da fonte, a energia é espalhada por uma área X . Quando dobramos a distância, a mesma energia agora é espalhada por uma área equivalente a $4X$. Desse modo, a intensidade reduz-se pelo inverso do quadrado da distância percorrida ($1/R^2$). Esta redução é causada pelo espalhamento geométrico da energia acústica, que independe da frequência e também ocorre durante caminho de volta ao receptor. Já a atenuação é determinada pela absorção da energia pelo meio de propagação somada à energia que é refletida para longe do receptor (não retorna). À medida que a onda se desloca pelo meio, a energia espalhada é convertida em calor devido à colisão entre moléculas causadas por este deslocamento. Esta atenuação é representada matematicamente pelo decaimento exponencial da intensidade pelo alcance do sinal acústico e sua unidade é comumente utilizada em dB/quilometro (km). Exemplificando, um coeficiente de absorção de 30 dB/km atenuará a intensidade em um fator de 1000 a cada km percorrido. A atenuação apresenta forte dependência à frequência do sinal, como também às características físico-químicas do meio, como a salinidade (quantidade de sulfato de magnésio e ácido bórico), temperatura, pressão, e pH (realmente importante em baixas frequências). Entretanto, para sonares empregados em levantamentos batimétricos os efeitos atenuação respondem mais as mudanças de frequência, podendo variar de 1 dB/km para frequências de 12 KiloHertz (kHz), a mais de 100 dB/km para frequências maiores de 300 kHz. Basicamente a atenuação aumenta com o aumento da frequência e da salinidade, a diminuição da temperatura e da pressão. É importante ressaltar que independente da frequência, os dois motivos de perda na transmissão (TL) são computados como um só elemento, sendo o espalhamento geométrico mais relevante quando próximo da fonte de emissão, enquanto os componentes de atenuação são mais relevantes

conforme o aumento da distância (Urlick 1975; Lurton 2010; Atherton 2011).

Conforme a onda acústica continua a se propagar pelo meio, vai se expandindo e colidindo com inúmeros alvos, como o leito marinho, os peixes, as rochas, ou qualquer objeto que estiver em seu caminho. Os níveis de sinais refletidos pelos alvos são oriundos de suas próprias características, tamanho, forma e composição (densidade). Essas características determinam a “força do alvo” (TS) refletida aos receptores (Urlick 1975; Lurton 2010; Atherton 2011).

O nível de ruídos (“noise level” - NL), descrito como ondas de pressões acústicas originadas pelo próprio ambiente, representam um fator potencialmente limitante à atuação dos sonares na detecção de sinais acústicos. Quando viajam em frequências próximas ou equivalentes as emitidas pelo sonar estão em níveis maiores que os emitidos pela fonte, podem mascarar os retornos de um alvo, assim como ruídos eletrônicos gerados internamente pelos circuitos do sonar (Urlick 1975; Lurton 2010; Atherton 2011).

O Índice de directividade (DI) é uma medida relativa à concentração de energia irradiada no espaço. De maneira prática, quanto mais focada for a emissão do sinal pelo transdutor, maior será o índice de directividade (Urlick 1975; Lurton 2010; Atherton 2011).

Uma vez que o sinal retorna e atinge o receptor, devemos considerar o quão sensível é o sistema na detecção do mesmo. Sistemas menos sensíveis trazem dificuldade à conversão em voltagem ou à detecção e processamento do sinal. Se o sinal trabalha a níveis abaixo deste limiar de detecção (DT), o sonar torna-se incapaz de detectar o alvo (Urlick 1975; Lurton 2010; Atherton 2011).

4.1.3 - Reflectividade Acústica

A reflectividade não é tão simples quanto o significado de sua palavra. Ao analisá-la, devemos considerar as complexas relações envolvendo diferentes variáveis que culminam em um valor de reflexão, como composição do meio, frequência do sonar, tamanho, espessura e formato do alvo, ângulo de incidência com que a frente de onda atinge o alvo, rugosidade acústica

("acoustic roughness") e duração do pulso. Cada um desses fatores apresentam grande relevância na detecção e caracterização de um alvo. Fisicamente, alvos mais "duros" refletem mais energia que alvos mais "maleáveis", porém as características do alvo não devem ser examinadas por sua densidade material, e sim por sua densidade acústica. Este termo baseia-se nas diferenças de velocidade em que o som se propaga por diferentes alvos. As diferenças de velocidade entre o ar e a água tornam as bolhas de ar excelentes refletores. Quando a velocidade do som muda abruptamente entre diferentes meios, um forte eco é gerado, geralmente menor que o comprimento de onda. Contudo, quando esta mudança ocorre de forma gradual, através de distâncias maiores que o comprimento de onda, interações complicadas acontecem entre a frente de onda que está penetrando o alvo e os ecos refletidos. Neste caso, o sinal refletido pode ser extremamente fraco a ponto de ser incapaz de ser detectado pelo sonar (Lurton 2010; Blondel 2009).

O tamanho e formato do alvo também devem ser considerados, assim como o ângulo de incidência do sinal acústico. Alvos maiores são geralmente mais fáceis de serem detectados do que alvos menores. Da mesma forma, alvos que apresentam diversas faces dispostas em diferentes ângulos tendem a ser mais visíveis que alvos curvados ou redondos. Compreendendo-se as características reflectivas e físicas do alvo é possível determinar a máxima distância em que o alvo poderá ser detectado. Em termos práticos, quando o alvo for menor que a pegada ("beam"), especialmente alvos de baixa reflectividade, mais difícil será sua identificação (Lurton 2010; Atherton 2011).

Refletor Especular – "specular reflector" – é um termo acústico que descreve alvos que exibem grande reflexão. As condições especulares de reflexão ocorrem quando alvos apresentam faces ou bordas que preferencialmente refletem todo o sinal na direção do receptor. Eles podem se tornar invisíveis quando o sinal acústico atinge o alvo em baixo ângulo de incidência rasante ("grazing angle"), comportando-se neste caso como um espelho, que reflete a maior parte do sinal para longe dos receptores (Blondel 2009; Atherton 2011).

Rugosidade acústica – "acoustic roughness" – é um termo que descreve

a textura da superfície de um alvo. A rugosidade é descrita como uma textura igual ou maior que metade do comprimento de uma frequência de onda transmitida pelo sonar. Uma superfície rugosa tornam alvos de baixa reflexão mais fáceis de serem detectados. (Blondel 2009; Lurton 2010; Atherton 2011).

4.1.4 - Refração

Assim como ondas eletromagnéticas, as ondas acústicas também seguem a lei de Snell-Descartes que delibera sobre a reflexão e refração. Duas camadas de água com temperatura, salinidade e pressão diferentes impactam na velocidade de propagação do som. Estas diferenças implicam em um desvio na trajetória de deslocamento da onda acústica, quando atravessadas pela mesma. Conseqüentemente, este desvio resulta numa aferição errônea das distâncias dos alvos, deteriorando assim a resolução de alcance do equipamento. Desta forma, mudanças na altura ou angulação do equipamento devem ser evitadas e aferições de velocidades utilizando um SVP ou CTD devem ser executadas repetidamente (Urick 1975).

4.1.5 - Múltiplas Acústicas

O sinal que é propagado pela coluna d'água, expandindo-se na vertical e horizontal, é interceptado por superfícies refletoras. Quando isso acontece, uma parcela do sinal é refletido em diversas direções, incluindo na do receptor. O receptor, por sua vez, plota todos os sinais que recebe em função do tempo, não fazendo distinção de ecos que retornam por caminhos indesejáveis. Esta característica acaba por inserir dados denominados múltiplas. Geralmente as múltiplas ocorrem em águas rasas ou próximos a fortes refletores. A múltipla mais comum é causada por ecos que são refletidos pela superfície d'água (interface água – ar). Elas podem percorrer três caminhos diferentes até serem registradas, descritos como: 1) do transdutor ao alvo, do alvo a superfície, da superfície ao receptor; 2) do transdutor a superfície, seguindo para o alvo e retornando ao receptor; 3) do transdutor para a superfície, da superfície ao alvo, retornando pelo mesmo caminho. Os casos 1 e 2 apresentam o mesmo tempo de viagem e formarão múltiplas praticamente idênticas, assumindo que a superfície da água seja plana. Já o caso 3 produzirá uma múltipla diferente

das demais (Atherton 2011).

As múltiplas não são desejadas nos registros por não representarem a realidade. Desta forma existem maneiras de tentar minimizar ou eliminá-las. Dependendo da profundidade em que se trabalha, uma alternativa é selecionar uma escala de distância (“scale range”) que seja menor que a distância entre o transdutor e a superfície, o que manteria as múltiplas fora deste limite. Porém não é tão prático, especialmente quando se trabalha em profundidades muito pequenas. Outra alternativa está em alterar a altura do sonar na coluna d’água. Isto muda o espaçamento entre as múltiplas, podendo em alguns casos elimina-las. O problema está em manter um ótimo ângulo de incidência rasante do feixe em relação ao fundo, junto à mudança de altura do instrumento. Ainda como alternativa podemos inclinar o transdutor para longe da superfície e utilizar um transdutor que tenha um feixe vertical menor. Estas alternativas devem ser analisadas e aplicadas aos ambientes em que mais se adequam. (Blondel 2009; Lurton 2010).

4.2 - Sonar de Varredura Lateral

A utilização, pela primeira vez, da geometria de coleta de dados de um Sonar de Varredura Lateral (SVL) foi provavelmente acidental, segundo Hughes Clarke (2013). Neste episódio, um transdutor monofeixe convencional foi montado de forma oblíqua, permitindo a obtenção de uma imagem bruta derivada de uma série temporal de intensidades acústicas que foram refletidas de volta para o sonar pelo fundo marinho. Com este eco mais longo resultante do posicionamento oblíquo, as informações sobre a variação espacial da declividade e da rugosidade do fundo marinho passaram a ser consideradas. Esta geometria permitiu que sucessivos escaneamentos fossem unidos, dando formato a uma imagem do fundo marinho, desde que o sonar esteja se deslocando ortogonalmente à direção da varredura.

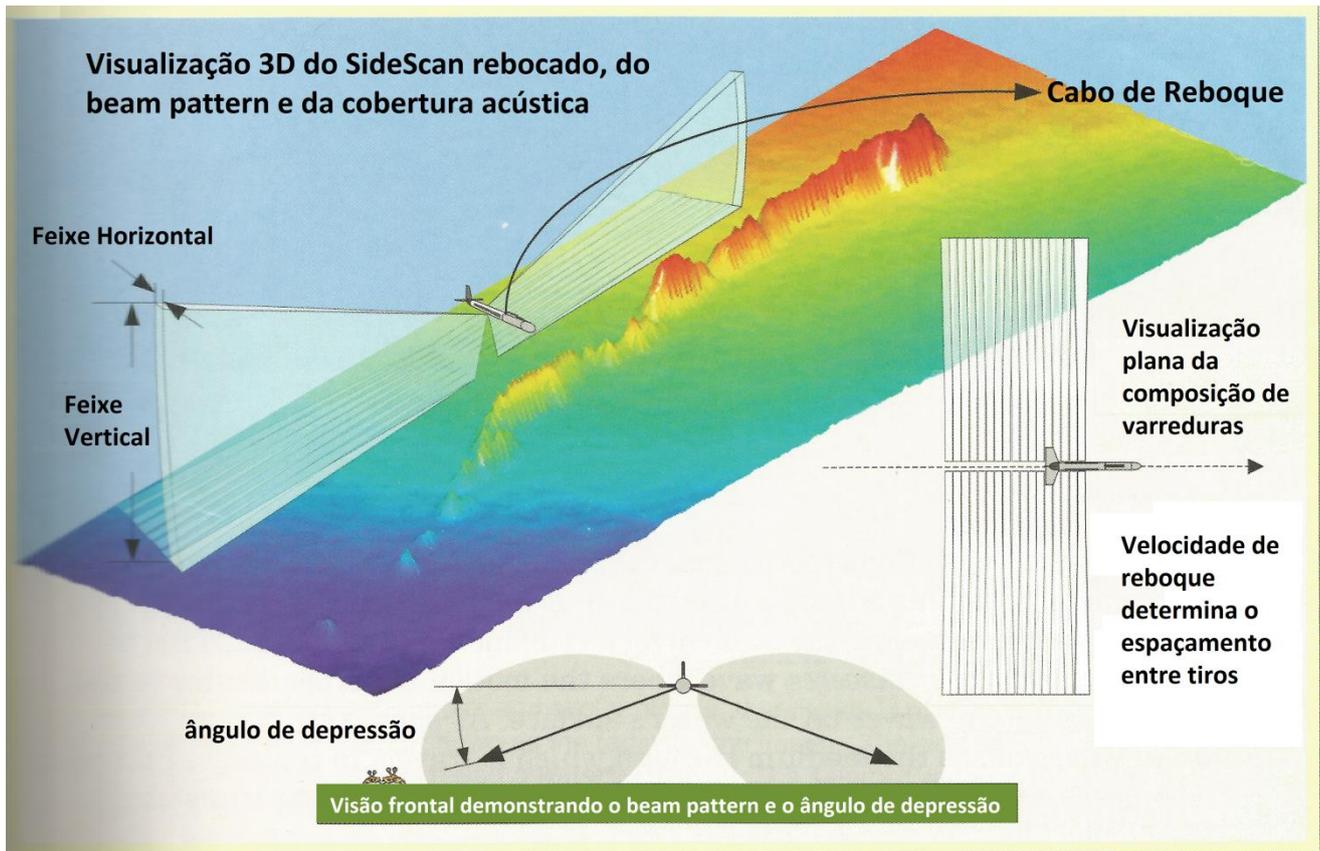


Figura 1 – Visualização 3D do Sonar de Varredura Lateral sendo rebocado sobre uma superfície batimétrica, e de suas características de emissão de pulso e cobertura acústica. Retirado de Atherton (2011).

O SVL é um sistema ativo que consiste em um conjunto de transdutores igualmente espaçados em um longo arranjo, que produzem um feixe de particular geometria. Este feixe é largo (grande angulação) em relação à direção perpendicular do eixo longo do arranjo (“across-track”), para que sejam cobertas as maiores distâncias possíveis, e é estreito (pequena angulação) em relação à paralela do eixo longo do arranjo (“along-track”), buscando maiores resoluções. Estes arranjos são acoplados um à boreste e outro à bombordo do corpo do SVL ou de um veículo de exploração submarina. A cada período de transmissão, ou “tiro”, o feixe acústico gerado irá iluminar uma faixa estreita do fundo marinho. Ao longo do tempo, uma imagem de uma grande área é obtida com a concatenação de sucessivas faixas (Figura 1) (Hughes Clarke 2013a).

Este sistema permite diversas opções de implementação. Pode ser acoplado a um casco de uma embarcação ou na extremidade de uma haste fixa, como também ser rebocado ou acoplado a um veículo submarino operado remotamente (ROVs) ou a um veículo submarino autônomo (AUVs). Sua

geometria permite a aplicação em áreas ultra-rasas a abissais. Este instrumento é capaz de cobrir uma porção larga do fundo marinho bem distante da plataforma de coleta, com varreduras que contemplam tamanhos que variam desde alguns metros a até 60km ou mais. Estes tamanhos levam em conta a soma das duas emissões laterais. Utilizando diferentes frequências, de 6.5 kHz a 1MHz, o SVL pode atingir resoluções de 60m a 1centímetro (cm) (Tian 2011; Blondel 2009). A distância do sonar a um ponto no fundo marinho é chamada “slant range” ou distância inclinada. A “ground range” ou distância horizontal equivale a distância entre um ponto no fundo marinho e o ponto mais próximo, imediatamente abaixo do sonar, conhecido como nadir. O ângulo de incidência (“incidence angle”) é o ângulo do pulso emitido em relação à incidência normal (“normal incidence”) no fundo (90°). O ângulo de incidência rasante (“grazing angle”) é o ângulo que o pulso acústico emitido faz em relação à inclinação do fundo, quando ambos se intersectam (Figura 2). Este ângulo é um fator chave no entendimento de como o sinal será refletido. A maior parte da energia é refletida na direção especular. Outras partes serão refletidas em outras direções (ou retroespalhadas e distribuídas no entorno do ângulo principal de reflexão especular). Dependendo do terreno, uma fração da energia será absorvida pelo fundo. Apenas uma porção diminuta do pacote energético emitido retornará aos receptores. Este sinal é definido como “backscatter” ou retroespalhamento. Todo o sinal que retorna para o receptor é restringido à um azimute fixo (Hughes Clarke 2013a).

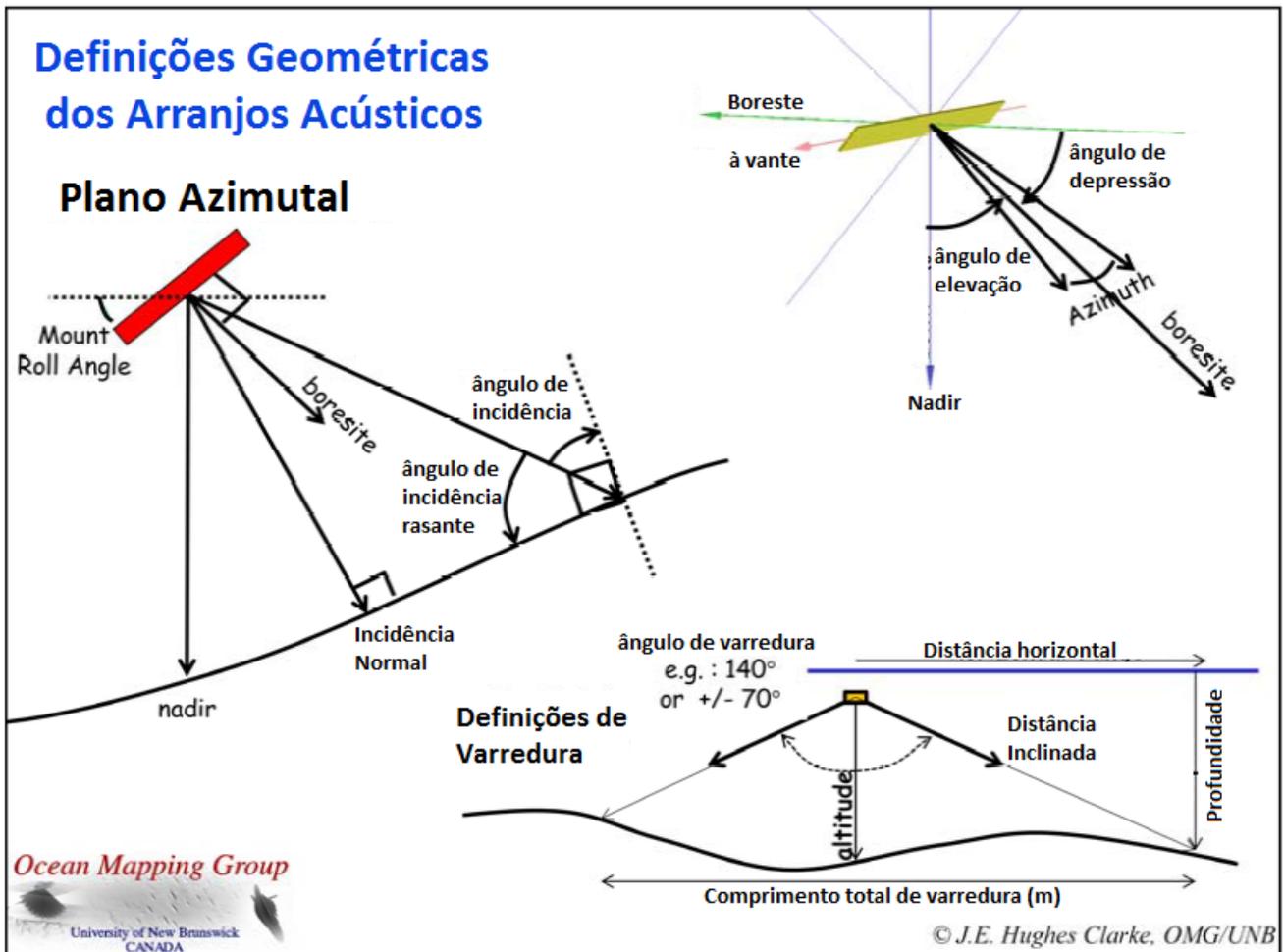


Figura 2 – Definições geométricas dos ângulos e distâncias geradas pela emissão de um pulso acústico por um arranjo de transdutores. Retirado de Hughes Clarke (2013a).

Quando gravado, o retroespalhamento irá fornecer diferentes tipos de informação. A diferença de tempo entre a transmissão (tiro inicial) e a recepção do sinal é diretamente proporcional à distância inclinada. A partir da altitude do SVL em relação ao fundo marinho é possível deduzir a distância horizontal até o local onde o sinal foi refletido. A amplitude do eco irá informar sobre a natureza do alvo atingido. (Blondel 2009)

O retroespalhamento é afetado por três principais fatores: a geometria do sistema sensor – alvo (ângulo de incidência local do pulso, declividade, etc.), as características físicas da superfície (pequena rugosidade, densidade, velocidade do som, etc.) e a natureza intrínseca da superfície (composição, densidade, importância relativa entre volume e reflexão da superfície para a frequência utilizada e configurações da imagem) (Tian 2011).

Uma declividade cuja face está voltada diretamente para o sonar irá

produzir maiores quantidades de reflexão (mais retroespalhamento), enquanto que uma declividade cuja face aponta para outras direções irá refletir uma quantidade pequena do sinal. Ressaltando-se que em alguns casos a reflexão pode até não existir. Desta maneira, um tipo de solo pode aparecer acusticamente mais claro, no entanto apenas por apresentar diferentes ângulos de declividade. Se um pulso acústico é refletido por uma superfície suave, sem rugosidade, a característica especular refletirá uma grande quantidade do sinal para longe, diminuindo muito a quantidade do sinal que retorna para o receptor, quanto maior for o ângulo de incidência. Ao contrário, quando o pulso é refletido por uma superfície rugosa, o seu retroespalhamento em todas as direções faz com que uma grande quantidade do sinal retorne aos receptores. Dessa forma, trechos compostos por cascalho irão aparecer acusticamente mais claros que trechos compostos por lama. O volume que é refletido pode ser maior devido ao tipo de fundo que o refletiu e se existir possibilidade de penetração acústica nos sedimentos com a frequência utilizada. Neste caso alguns tipos de fundo podem apresentar características mais suaves pela utilização de determinado comprimento de onda e mais rugosos com outro comprimento de onda, por causa de objetos enterrados no sedimento ou bioturbação (Figura 3) (Blondel 2009).

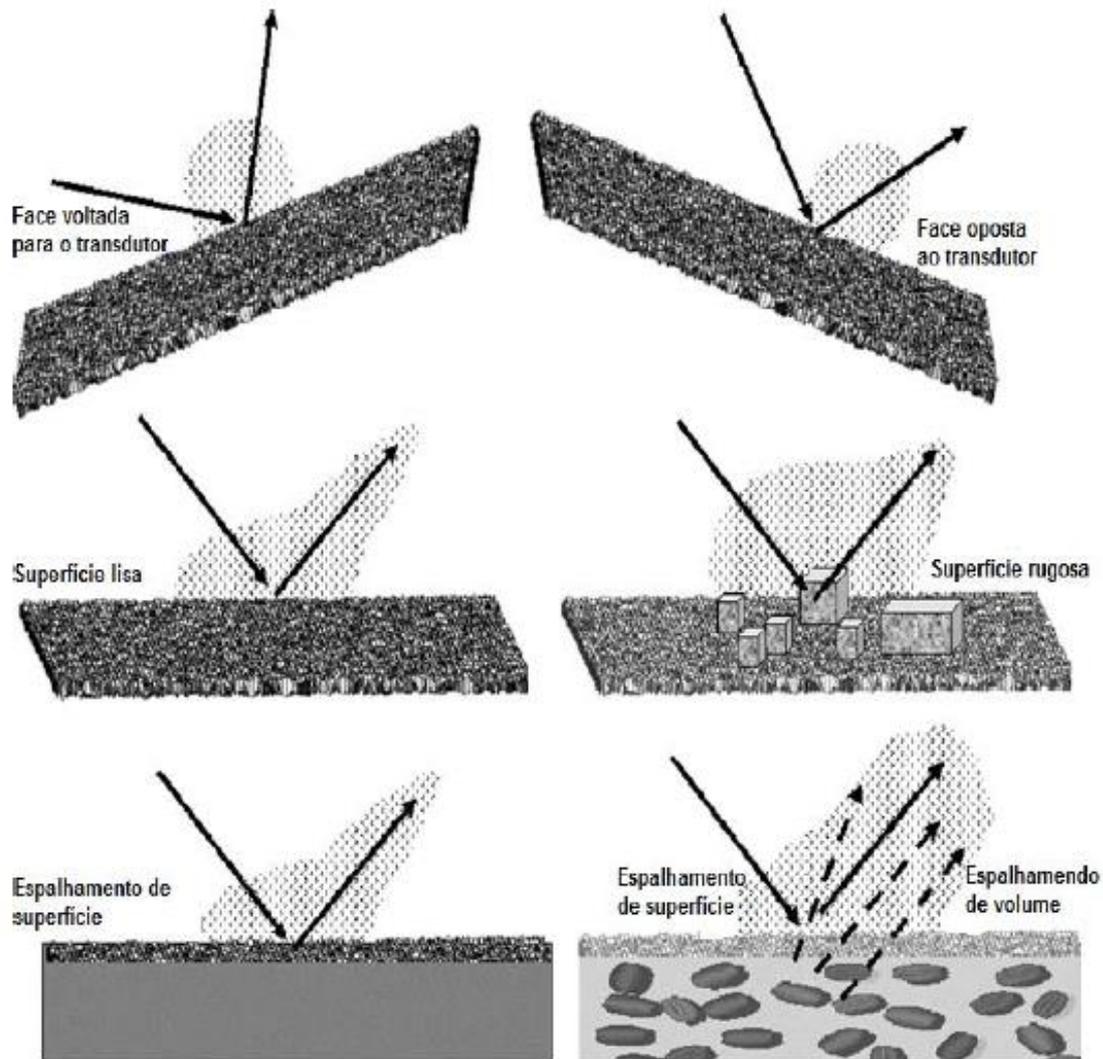


Figura 3 - Três fatores que influenciam o retroespalhamento do leito marinho (de cima para baixo): inclinação do local de ensonificação, rugosidade da superfície, propriedades intrínsecas do fundo (e.g. influência de rochas nas camadas de subsuperfície). Retirado de Blondel (2009).

Idealmente, a energia acústica é transmitida por um setor de 90 graus, entre o nadir e as distâncias mais longínquas. Considerando um fundo como plano, quando maior for o ângulo de incidência do pulso, menor serão as respostas reflexivas obtidas. Desta maneira, uma quantia maior de energia deve ser projetada para estes locais. Sendo assim, um design oblíquo é aplicado nos sistemas SVL onde o lóbulo central do pulso (“boresite”) é apontado para as áreas mais distantes. Entretanto, para tal existe um equilíbrio alcançado entre duas características desejáveis, porém conflitantes: envio de energia suficiente para as regiões mais distantes e o envio mínimo de energia acima da horizontal, a fim de se evitar as multi-reflexões (Blondel 2009; Hughes Clarke 2013a).

Quando falamos na razão sinal/ruído, as maiores razões obtidas ocorrem na região onde o lóbulo central do pulso intercepta o fundo. Entretanto, as imagens que melhor caracterizam os alvos são produzidas nas áreas mais distantes, onde os ângulos de incidência são maiores, e as sombras aparecem unidas ao relevo. Nesta área, a razão entre a altura do SVL e a distância horizontal, denominada “aspect ratio” é baixa. Contrastando, MBES tem um melhor desempenho nas medições de batimetrias em regiões onde o aspect ratio é mais alto (Hughes Clarke 2013a).

O design oblíquo dos transdutores de um SVL é prejudicial às áreas mais próximas ao nadir, isto porque a inclinação resulta no direcionamento das cavas e lóbulos laterais, oriundos do padrão de emissão do pulso (“beam pattern”), para esta região. Sendo assim, uma baixa intensidade de energia é emitida e recebida na vertical. Isto minimiza as multi-reflexões (“multipath”), mas também dificulta a identificação da distância mínima do fundo (“minimum slante range”), tornando escura a linha central de delimitação entre coluna d’água – fundo na imagem formada pelo SVL (Atherton 2011; Hughes Clarke 2013a).

O fato do sistema não obter informações sobre o ângulo de elevação acaba o tornando impreciso na definição da distância radial (estimativa da distância horizontal), principalmente se existem diferenças no relevo. Isto faz com que a incerteza na posição dos alvos, até os 60° (ângulo de elevação), seja maior. Outro fator negativo é que, na ausência de conhecimento sobre as características do fundo, o sistema assume que o fundo é plano. Por esse motivo, um alvo que difere dessa característica assumida pelo sistema tem a sua imagem distorcida. Esta distorção ocorre simplesmente na direção radial e tende a ser menor com o aumento na distância inclinada (Hughes Clarke 2013a).

A ausência de informações sobre o ângulo de elevação também não impede que inferências sejam feitas sobre o relevo topográfico. Se o fundo não é composto por materiais de diferentes características, um aumento na intensidade do retroespalhamento pode ser associado a uma elevação local que dirige esta energia de volta ao receptor. Combinando essas alterações na

intensidade às sombras geradas por elas é possível se determinar a elevação do objeto, desde que o fundo seja plano. As sombras formadas por objetos positivos (e.g. rochas, naufrágios) têm o seu comprimento cada vez maior seguindo um aumento no ângulo de incidência. Já as sombras formadas por objetos negativos (e.g. pockmarks) têm o seu comprimento inalterado seguindo um aumento no ângulo de incidência (Atherton 2011; Hughes Clarke 2013a).

Outro fator negativo derivado da falta de informação sobre o ângulo de elevação é o “layover”. Este ocorre quando um declive ou objeto é mais íngreme que o pulso em expansão. Isto faz com que o pulso emitido seja refletido por dois pontos, ou mais, que retornam ao mesmo tempo para o receptor. O sistema então combina todos os ecos de uma distância inclinada comum, registrando assim uma imagem incorreta. O layover ocorre de maneira mais extrema quando um objeto é atingido pelo pulso antes da distância mínima do fundo ser definida. Neste caso o alvo é registrado na coluna d’água e o algoritmo de correção da distância inclinada distorce todos os outros alvos que estiverem alocados depois desde, no mesmo azimute. Por conseguinte, quanto mais afastado do sonar o alvo se encontrar, menor será o layover. Este efeito é extremamente degradante para SVL batimétricos (Blondel 2009; Atherton 2011; Hughes Clarke 2013a).

A resolução da distância horizontal (ou a resolução across-track) de um SVL é definida pela largura de banda do pulso. Bandas mais largas irão produzir excelentes resultados referentes à distância radial (horizontal). A determinação da distância radial fica pior com o aumento do ângulo de incidência rasante. Assim, a definição do alvo radialmente no “across-track” é pior no nadir e vai melhorando conforme as distâncias para o mesmo aumentam (Blondel 2009; Atherton 2011).

Já a resolução do “along-track” pode ser controlada pela largura do feixe (“beamwidth”) ou pelo espaçamento entre tiros. A largura efetiva do feixe (produto do pulso de emissão e recepção) controla os menores comprimentos de onda que podem ser observados na direção “along-track”. Para um receptor com largura de feixe fixo, essa dimensão cresce com a distância radial. Quanto ao espaçamento entre tiros, os benefícios de se ter um feixe curto no “along-

track” só é real se as faixas iluminadas do fundo marinho forem subsequentes, sem nenhum espaço “vazio” entre elas. Este espaço dependerá da velocidade em que a plataforma de sondagem se desloca e da distância inclinada máxima desejada (Blondel 2009; Atherton 2011).

Apesar de toda sofisticação eletrônica, sonares simplesmente medem a pressão acústica em relação ao tempo. Nos sonares ativos, no momento em que a energia acústica é transmitida para a coluna d’água, um relógio interno dispara e o receptor do sonar, que contém um circuito de amostragem rápido, mede os níveis de voltagem gerados pelo transdutor. A voltagem medida é proporcional a pressão sofrida pelo transdutor. A grande maioria dos sonares de alta frequência utilizam transdutores feitos de cerâmicas que apresentam propriedades eletroacústicas. Altas voltagens energizam o transdutor e causam um alinhamento dos elétrons. O estresse causado na cerâmica devido ao alinhamento resulta em um movimento físico. Quando o transdutor está submerso e o sonar emite um pulso, a energia do som é mecanicamente transferida para o fluido que o circunda. Inversamente, quando impactado por uma pequena pressão acústica, a cerâmica a converte em voltagem (Atherton 2011).

4.3 - SVL Diferenciador de Fase

Como foi visto, a principal limitação de um sistema SVL está na incapacidade de definição do ângulo de elevação. Com isso, alguns sistemas passaram a apresentar uma extensão na geometria utilizando vários receptores em paralelo, na tentativa de solucionar essa limitação. Este método é denominado por uma variedade de termos, entre eles: SVL Interferométrico, SVL Batimétrico e SVL Diferenciador de Fase (SDF). O terceiro é mais utilizado, pois é mais direto. Apenas os primeiros sistemas que foram desenvolvidos efetivamente utilizaram a interferometria (Hughes Clarke 2013a). A interferometria usa o princípio básico de um sistema SVL, onde uma série temporal de intensidades acústicas é registrada. Além disso, a interferência da onda acústica nos dois sensores gera um “beampattern” com cavados e

lóbulos. Deste, podem ser extraídas as distâncias inclinadas, entre o ponto onde cada lóbulo atinge o fundo e o sensor. O ângulo de cada lóbulo em relação à estrutura dos sensores é precisamente conhecido, sabendo-se a velocidade do som (Kolouch 1984).

As dificuldades inerentes ao método estão em diferenciar ou separar um lóbulo de outro. Pelo princípio, os lóbulos são contados a partir do nadir até as regiões mais distantes, mas se houver uma topografia muito irregular ou se o arranjo de transdutores estiver deslocado, torna-se fácil ignorar acidentalmente um lóbulo (Hughes Clarke 2013a). Segundo de Moustier (1988), toda a computação que envolvia esses cálculos era muito cara para ser obtida em tempo real e o número de pontos batimétricos obtidos em cada ciclo de transmissão era limitado.

Ao invés de apenas utilizar a interferência entre os dois arranjos para contar os lóbulos e cavas, porque não mensurar as diferenças de fase entre eles? Esta solução foi apresentada pelo método diferenciador de fase (equivocadamente chamado de “interferometria”). O método nada mais é que uma extensão do método interferométrico, onde a diferença de fase relativa entre o sinal que retorna aos dois arranjos do sistema é determinado. Ao invés de apenas monitorar intervalos de zero ou meio comprimento de onda, este método permite utilizar a variação contínua de fase entre lóbulos e cavas para se estimar os ângulos de elevação (Hughes Clarke 2013a).

Apesar de ser um sistema inovador, sua geometria gera alguns problemas. A ambiguidade de fase entre os lóbulos é um deles, o que dificulta a discriminação quando os arranjos estão separados por uma distância maior que meio comprimento de onda. Quando essa distância é igual a meio comprimento de onda, não existe ambiguidade, entretanto esta geometria é muito mais sensível ao ruído. O ideal é chegar a uma combinação entre as duas. Além disso, este arranjo dificulta a identificação de pequenas feições, como “ripplemarks” já que a quantização da fase é limitada ($-\pi$ a $+\pi$) (Wilby 1999; Hughes Clarke 2013a).

Uma maneira de resolver este problema das fases ambíguas é desenvolvê-las, observando as descontinuidades presentes na série temporal e

adicionando múltiplos íntegros de 2π para conseguir uma medida contínua. Entretanto, um sinal ruidoso pode dificultar este processo, além de criar uma incerteza na estimativa do ângulo da fase por adicionar um pequeno vetor de fase aleatório ao final do sinal. À medida que o sinal enfraquece ou o ruído aumenta, a incerteza no ângulo da fase também aumenta, para ambos os transdutores (Blondel 2009; Hughes Clarke 2013a).

Para reduzir as incertezas é importante diminuir o ruído presente nos dados. Para tal algumas técnicas são geralmente utilizadas, como uma suavização na fase (“smearing”). Entretanto, após a suavização, um sistema com espaçamento entre elementos equivalente a meio comprimento de onda visivelmente perde resolução, enquanto que um sistema com comprimento maior tende a preservar melhor o sinal, não degradando assim os dados. Claramente existe um benefício na resolução quando utilizamos sistemas com essa configuração, mas para tal, as ambiguidades entre fases devem ser solucionadas. Praticamente todos os sistemas batimétricos diferenciadores de fase usam amostras instantâneas de fases diferenciais e rodam filtros com domínio no tempo. Isto aumenta efetivamente a relação sinal/ruído ao custo da resolução radial (Hughes Clarke 2013a).

Para um sistema de espaçamento único entre arranjos, existem várias soluções de elevação angular possíveis para um dado valor de fase. Entretanto, se um sistema apresenta mais de um par de espaçamentos entre arranjos é possível obter a solução por comparações entre seus resultados. Para um espaçamento entre arranjos diferente, os conjuntos possíveis de soluções de fase normalmente não se encaixam, exceto na fase correspondente correta. Se sistemas podem apresentar 3 ou mais arranjos de espaçamentos diferentes, um pode ser comparado aos outros e assim permitir a seleção daquela fase cuja combinação entre todos prova ser a mais próxima (não exatamente a mesma devido à degradação causada por ruídos). Isto resolve o problema de ambiguidade de fase desses sistemas (Hughes Clarke 2013a).

A única e maior limitação deste método diferenciador de fase são as distâncias comuns. Esta condição ocorre em duas situações: no nadir, e

quando a inclinação do fundo do mar é mais acentuada do que a frente de onda em expansão. Para qualquer destas geometrias, as duas ou mais distâncias comuns serão captadas ao mesmo tempo e um ângulo de elevação será atribuído a elas. Para isto, as fases de todas serão combinadas, resultando em uma fase aparente gerada pelas diferenças entre as fases de cada uma das distancias. Este resultado não reflete a real direção de nenhuma delas e acaba por tornar estes dados inúteis (Kraeutner & Bird 1999; Hughes Clarke 2013a).

Devido à quantidade imensa de dados coletados pelo sistema, a filtragem de dados se faz necessária a fim de simplificar o processamento. Os três mais comuns são: Filtro de amplitude, ponderado pela intensidade, Filtro estatístico, comparando os resultados da vizinhança, e Binagem (binning), representando uma média entre resultados. Após a filtragem os dados batimétricos são apresentados com densidades muito inferiores as originais, especialmente em áreas onde ocorrem as distâncias comuns, como no nadir (Wright & Brisson 2011; Hughes Clarke 2013a).

4.4 - Sistema Diferenciador de Fase Edgetech 4600

O sistema Edgetech 4600 (Figura 4) é uma combinação integrada de ecobatímetro e sonar de varredura lateral com capacidade de produzir mapas tridimensionais de alta resolução do fundo marinho em tempo real enquanto fornece um registro simultâneo de imageamento e batimetria. O 4600 trabalha com um arranjo de oito receptores e um projetor de cada lado, formando um par de longos transdutores. O elevado número de canais permite a rejeição avançada de múltiplas, reverberação e ruído acústico, e as técnicas de processamento EdgeTech's Full Spectrum® também fornecem um conjunto de dados mais denso na região do nadir quando comparados a outros sistemas interferométricos, atendendo às especificações da IHO SP-44, NOAA e USACE para detecção de feições (EdgeTech 2011).



Figura 4 – Fotografia demonstrando o Sonar Diferenciador de Fase Edgetech 4600 e seu arranjo de transdutores laterais.

O sistema traz alguns benefícios em relação à outros sistemas, determinados “benefícios chave”, como: registro simultâneo de dados batimétricos e de sidescan sonar; varredura de grandes dimensões em águas rasas – até 12 vezes a profundidade e ângulo de varredura de 200°; melhor resolução espacial que sonares multifeixe formadores de pegada; disposição dos transmissores e receptores mais longa para um imageamento de alta resolução em maiores distancias; simples sincronização dos sistemas; pulso “Continuous Wave – CW” para curta distância e pulso de frequência modulada “Chirp Full Spectrum” para longa distância; “Beamforming & Beamsteering” para preencher a lacuna no nadir e para eliminar múltiplas (EdgeTech 2011). Segundo EdgeTech (2011), com estes benefícios o sistema pode ser aplicado a uma série de atividades, entre elas, levantamento batimétrico de águas rasas, produção de cartas náuticas, operações de dragagem, segurança em portos e ancoradouros, busca e identificação de detritos marinhos e mapeamento de habitat bentônico.

O que se destaca neste equipamento é sua tecnologia de pulso ChirpFull Spectrum para obter maior resolução em distâncias mais longas, maximizando a razão sinal-ruído de imagens acústicas através de frequências de banda larga (EdgeTech 2011).

Um dos aspectos pendentes do processamento de sinal Full Spectrum é o uso de um amplo pulso de transmissão de banda larga que varre o ambiente em uma faixa de frequências diferentes. Isso gera um grande pacote de energia acústica na água. Em vez de tentar operar com um pulso de pico acústico muito curto e acentuado, como os sistemas CW convencionais, o sistema Full Spectrum espalha a transmissão por um longo tempo de duração (EdgeTech 2011).

Normalmente, quando pulsos longos são utilizados, a resolução das feições presentes no leito marinho é degradada. Entretanto, a resolução é ampliada neste sistema após o processamento de correlação do sinal recebido. Com o Full Spectrum, os lóbulos laterais que compõe o feixe de transmissão são reduzidos, alcançando um padrão de feixe com praticamente nenhum lóbulo lateral (EdgeTech 2011).

4.4.1 - Desempenho

Em relação ao desempenho do sistema, algumas considerações são feitas levando em conta fatores que possam o influenciar. Como o sistema calcula a profundidade através de ângulos e diferenças no tempo de retorno, fatores relacionados ao ambiente e ao próprio sistema podem influenciar nesses cálculos, como a atenuação do sinal devido a diferenças na temperatura e salinidade, a limitação e degradação devido à detecção de múltiplas quando a amostragem é realizada sobre pequenas profundidades (EdgeTech 2011).

Tabela 1 – Especificações chave do SDF Edgetech 4600. Retirado de EdgeTech (2011).

KEY SPECIFICATIONS	
SYSTEM	
Sonar Frequency (choice of either/or)	540 kHz
Side Scan Sonar Swath Coverage	250 m
Bathymetric Swath Coverage	10-12 times altitude, 150 m swath
Side Scan Sonar Range Resolution	2 cm
Bathymetric Range Resolution	3 cm
Side Scan Sonar Horizontal Beamwidth	0.5 degrees
Bathymetric Vertical Resolution	3 cm
Pulse Bandwidth	54 kHz
Max Depth Below Transducers	50m
Pulse Modulation	CW & CHIRP
Array Elements	1 Transmit and 8 Receive per side
Ping Repetition Rate	Both channels simultaneously, up to 50 Hz
Pulse Length	15 μ s (CW) to 1.1 ms (CHIRP)
Port/Starboard Crosstalk	< 60 dB

A Tabela 1 mostra as especificações do equipamento. As que melhor descrevem o equipamento são a “SideScan Range Resolution” do SVL de 2cm; a “Bathymetric Range Resolution” de 3cm; a resolução vertical (“Bathymetric Vertical Resolution”) de 3cm; o “SideScan Sonar Horizontal Beamwidth” do SVL de 0,5°; e a largura de banda do pulso (“Pulse Bandwidth”) de 54 kHz (EdgeTech 2011).

O fabricante afirma através da análise de uma superfície batimétrica que o equipamento é capaz de identificar objetos pequenos de aproximadamente 1m de diâmetro. Entretanto não especifica a que profundidade esses objetos foram sondados. Também é demonstrado através de um gráfico que o sistema apresenta um ótimo rendimento em termos de cobertura devido ao tamanho da varredura. Segundo os mesmos, este rendimento é atingido entre 25 e 75m de profundidade, intervalo onde o tamanho da varredura chega próximo as 12 vezes a profundidade prometidas pelo fabricante (EdgeTech 2011).

Embora a Edgetech garanta que o sistema 4600 atinja os requisitos necessários à ordem especial, determinados pelas normas S-44 da

Organização Hidrográfica Internacional (EdgeTech 2011; Hiller et al. 2012; Dodd 2013), ele deixa claro que, como em qualquer levantamento batimétrico, usar um equipamento que seja teoricamente capaz de satisfazer a incerteza requerida, não necessariamente é suficiente para atender aos requisitos destas normas. É necessário levar em consideração outras fontes de erros inerentes à atividade (e.g. sistemas inerciais, “offsets” e “patch test”) além das geradas pelo SDF.

4.4.2 - Operação do sistema Edgetech 4600

O sistema Edgetech 4600 é composto por quatro principais elementos: um “peixe”, uma unidade de fornecimento de energia e interface, cabos interconectores e um computador para aquisição e processamento de dados (EdgeTech 2011).

O corpo submerso, comumente chamado de “peixe”, compreende dois arranjos de transdutores. Cada arranjo é composto por oito receptores e um emissor do pulso acústico. O emissor fica disposto no meio do arranjo, dividindo os receptores. Este grande número de canais (dezesesseis receptores no total) contribui para uma grande rejeição de dados indesejados como múltiplas, reverberação e ruídos. Um sensor de velocidade do som é disposto na ponta do peixe para fins de contribuição na correção dos cálculos de distância (Figura 5) (EdgeTech 2011).

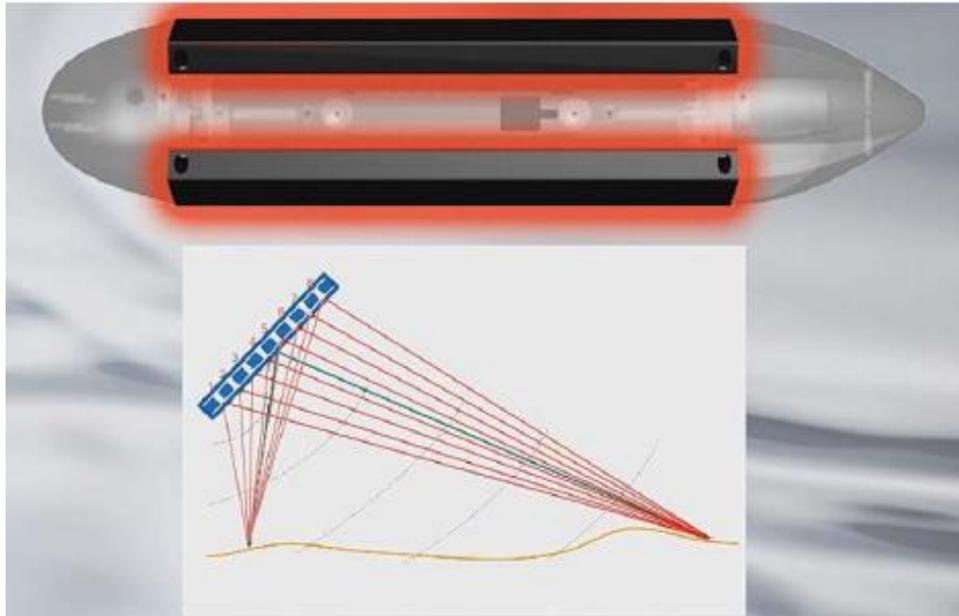


Figura 5 - Gravura exemplificando a composição de transdutores do SDF Edgetech 4600. Fonte: Retirado de EdgeTech (2011).

Os múltiplos elementos de recepção também permitem aplicar uma técnica de formação de feixes ("beamforming") que, embora os dados se apresentem mais espaçados e ruidosos do que em outras áreas da varredura, ajuda a reduzir a escassez de dados na região do nadir que é por vezes uma característica de sistemas batimétricos multifeixe, aumentando assim a eficiência na cobertura (EdgeTech 2011).

5 - Materiais e Métodos

5.1 – Área de Estudo

As três áreas de estudo deste trabalho estão localizadas na região leste de Florianópolis, SC, e compreendem: a Ponta das Aranhas, a Lagoa da Conceição e o Canal da Barra da Lagoa.

5.1.1 – Ponta das Aranhas

A Ponta das Aranhas está localizada mais precisamente no nordeste de Florianópolis, entre a praia do Moçambique, ao sul, e a praia do Santinho, ao norte. A área sondada faz parte da plataforma continental interna e antepraia e abrange profundidades que variam de 3 a 25 metros, aproximadamente.

A geologia é caracterizada pela presença de areia média a fina (PGGM 2010). A declividade local apresenta média de $1,57^\circ$ (Porpilho 2015). Além disso, a região é exposta e dominada por ondas.

A Figura 6 destaca a superfície batimétrica no local onde a sondagem foi realizada na Ponta das Aranhas. Os dados foram coletados no dia 13/11/2013 e um total de 8 linhas foram sondadas, com espaçamento de 40 m entre as linhas.

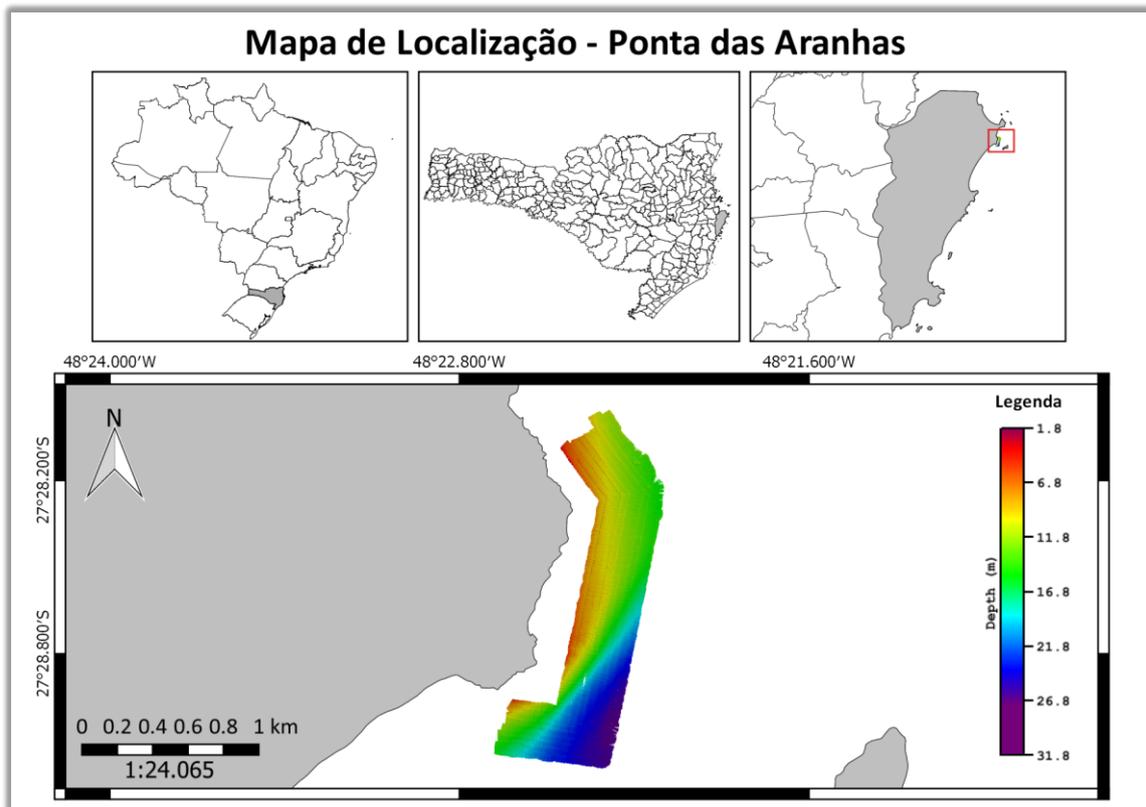


Figura 6 – Localização da área de sondagem na Ponta das Aranhas. O local onde a sondagem foi realizada está representado pela superfície batimétrica, na porção nordeste de Florianópolis, SC, entre a praia do Moçambique, ao sul, e a praia do Santinho, ao norte.

5.1.2 - Lagoa da Conceição

A Lagoa da Conceição está localizada no centro-leste de Florianópolis. Este é um sistema lagunar de baixa hidrodinâmica que se conecta com o oceano através de um pequeno canal estreito, no setor central (Muehe & Caruso Jr. 1989). De acordo com o tipo de canal que a conecta com o oceano adjacente, Kjerfve (1986) a classifica como estrangulada. A Lagoa possui comprimento total de 13,5 km, largura entre 2,5 e 0,15 km e área total de aproximadamente 20 km² (Porpillo et al. 2014). A sedimentação da Lagoa da Conceição é padrão de um ambiente lagunar, ou seja, os sedimentos arenosos estão nas áreas marginais, e os siltsos nos locais mais profundos e centrais (Bresciani 1998).

A Figura 7 destaca a superfície batimétrica no local onde a sondagem foi realizada na Lagoa. O levantamento ocorreu durante os dias 11 e 12/12/2013, onde no total foram sondadas 56 linhas, com espaçamento de 10m entre linhas.

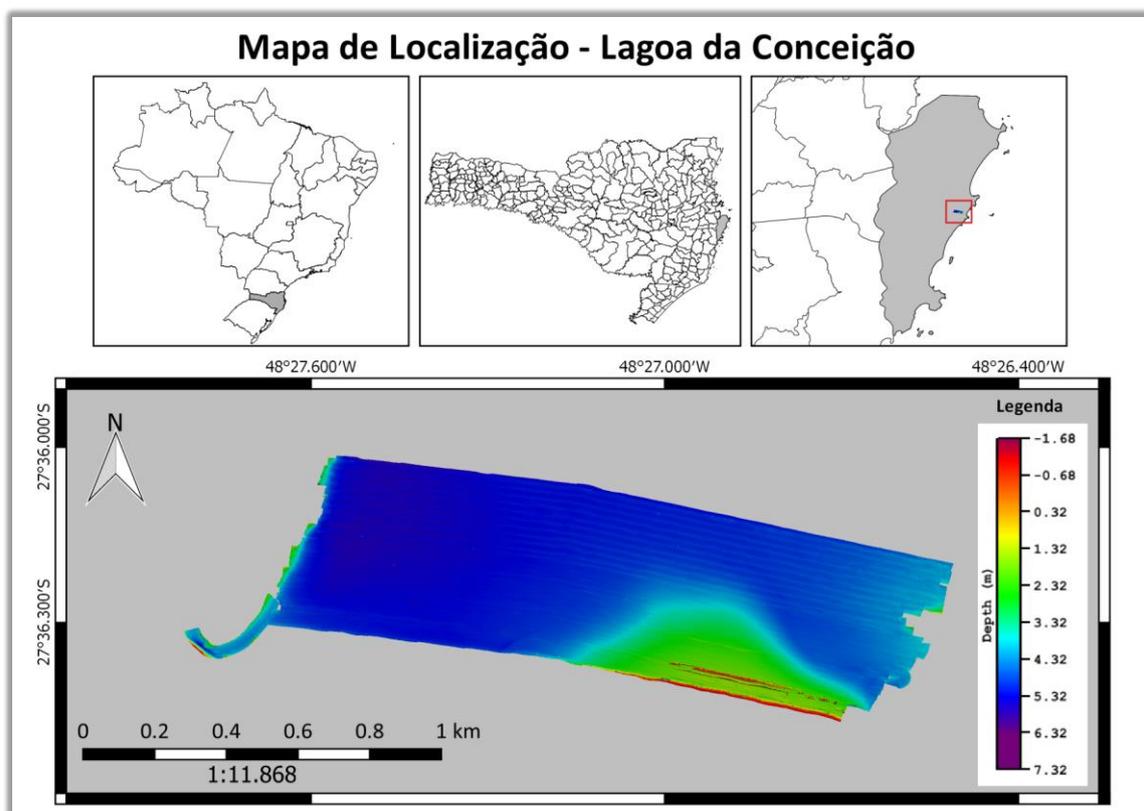


Figura 7 - Localização da área de sondagem na Lagoa da Conceição. O local onde a sondagem foi realizada está representado pela superfície batimétrica, na porção centro-leste de Florianópolis, SC.

5.1.3 – Canal da Barra da Lagoa

O Canal da Barra da Lagoa pertence ao sistema lagunar da Lagoa da Conceição e constitui o único meio de ligação que a lagoa tem com o mar. A extensão total é de 2,8km e a largura é de 25m em média, formando meandros ao longo de seu curso. Sua profundidade média é de 2,5m (Pereira et al. 2001; Sierra de Ledo & Soriano-Sierra 1999).

Nos anos de 1954, 1955 e 1968 foram realizadas dragagens no canal, que levaram a sua efetiva estabilização dada pela construção do molhe na desembocadura em 1985. Desde então sua posição e seção transversal permanecem estáveis (Pereira 2004).

A Figura 8 destaca a superfície batimétrica no local onde a sondagem foi realizada. A sondagem ocorreu na manhã do dia 11/12/2013, onde apenas duas linhas foram coletadas, em direções opostas. Como o canal é estreito e restringe a navegação, um espaçamento controlado entre linhas não pode ser aplicado.

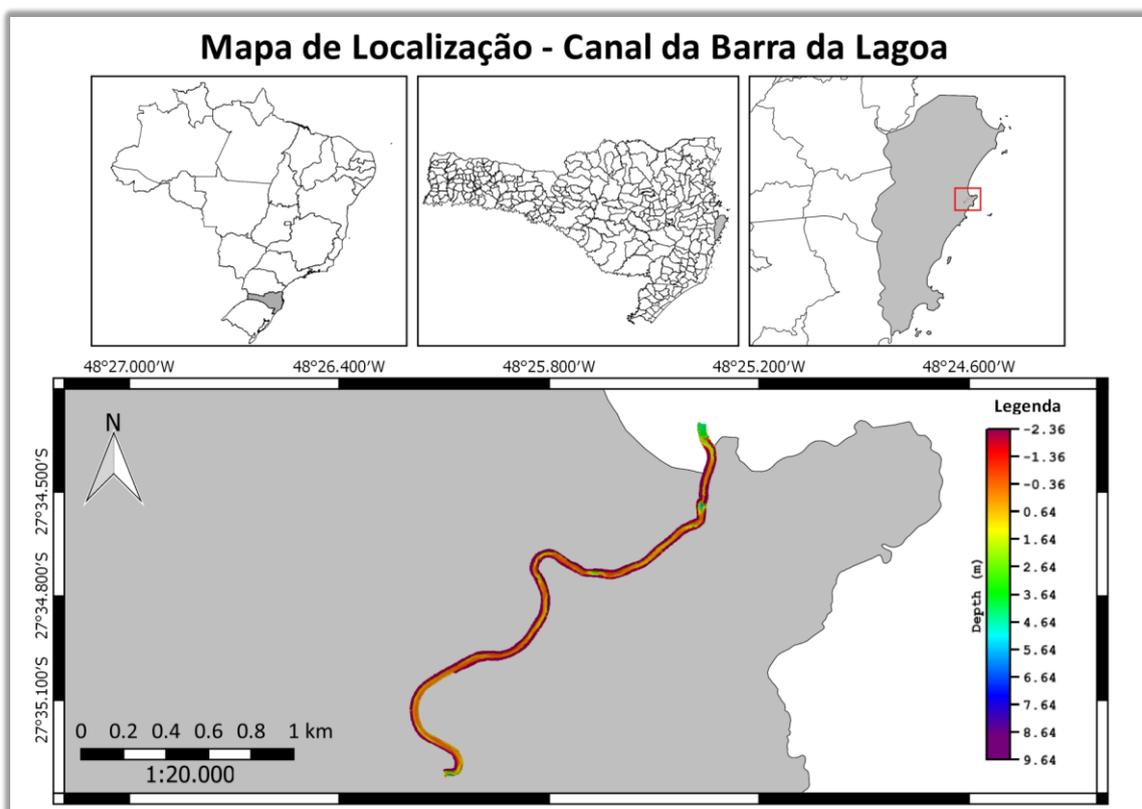


Figura 8 - Localização da área de sondagem no Canal da Barra da Lagoa. O local onde a sondagem foi realizada está representado pela superfície batimétrica, na porção leste de Florianópolis, SC.

5.2 - Aquisição de dados:

Os dados geoacústicos apresentados neste trabalho foram cedidos pelo Laboratório de Oceanografia Costeira (LOC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A coleta dos dados foi realizada para um projeto voltado a análise de riscos costeiros, desenvolvido pelo LOC e financiado pelo Fundo Nacional sobre Mudanças do Clima, do Ministério do Meio Ambiente.

O sistema utilizado para a coleta de dados geoacústicos foi o SDF da empresa EdgeTech®, modelo 4600, com 540kHz de frequência, utilizado para coleta de dados simultâneos de batimetria e sonografia em áreas rasas, até 50 metros de profundidade, como especificado anteriormente (EdgeTech 2011).

O SDF necessita da utilização de equipamentos periféricos responsáveis tanto pelo posicionamento geográfico do sistema, pelas correções das movimentações dinâmicas da embarcação, como também pela correção das velocidades de propagação do som na água. Para tal foram utilizados um sistema de posicionamento geográfico diferencial (DGPS) da empresa Novatel®, modelo FlexPack6, que possuem duas antenas instaladas na parte superior da embarcação, espaçadas 1,5 m entre si, de maneira a informar, além da posição geográfica, o "Heading" ou rumo da embarcação em um ângulo de 360° (Figura 9). A antena Novatel apresentou incertezas horizontal e vertical na ordem de 0,15 m e 0,25 m, respectivamente, utilizando correções Omnistar XP.

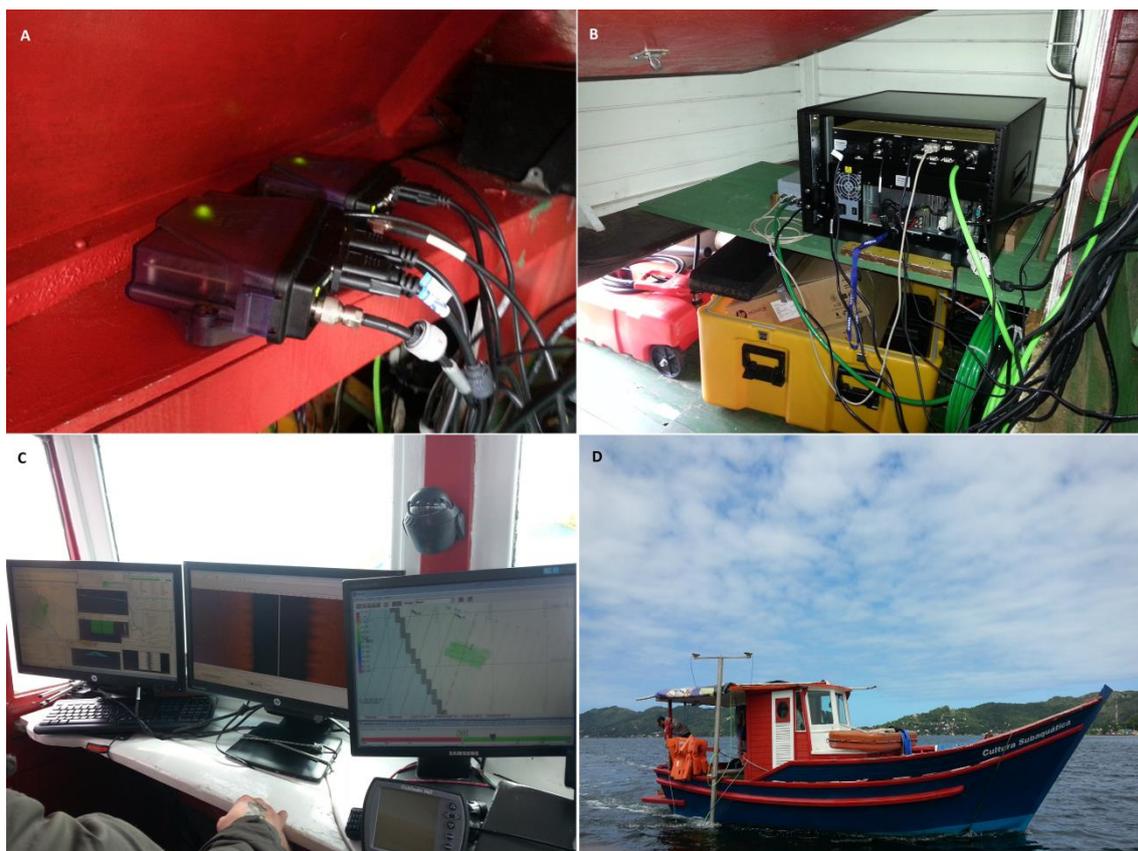


Figura 9 - A) Receptores das antenas de GPS e Heading; B) Topside e junctionbox do MRU instalados em ambiente seco da embarcação; C) Da esquerda para direita: tela de controle da batimetria, tela de controle do sonar de varredura e tela de navegação; D) Embarcação coletando dados com a haste fixa na lateral e as antenas instaladas acima.

Uma unidade que referencia os movimentos laterais e verticais da embarcação (“Motion Reference Unit – MRU”) foi utilizada para posterior correção da movimentação simultânea da varredura batimétrica. O sistema utilizado foi da marca Ship Motion Control® – SMC, modelo 108, capaz de detalhar os movimentos laterais de caturro (“pitch”), rolagem (“Roll”) e vertical (“heave”). Para tal o sistema foi instalado no centro de massa da embarcação. O MRU apresentou incertezas, valor de RMS da ordem de $0,03^\circ$ para pitch e roll, e 5 cm ou 5% para heave. A frequência de atualização de dados utilizada foi de 100Hz.

O perfilador de velocidade do som – SVP - da marca Odom®, modelo Digibar S foi utilizado durante os levantamentos com o intuito de mensurar com precisão as velocidades de propagação do som ao longo da coluna d’água em diversos pontos dentro da área de levantamento para posteriormente realizar

as devidas correções dos dados batimétricos obtidos. Os dados foram coletados em intervalos de 15 minutos para áreas mais estratificadas. Em áreas mais homogêneas os intervalos de coleta foram de 30 minutos.

Paralelamente, dados de maré foram coletados através de três marégrafos de pressão, posicionados em pontos estratégicos ao levantamento. Os marégrafos utilizados são da marca Ohmex[®], modelo Tide M8 e da marca Valeport[®], modelo Tidemaster. Os pontos de instalação dos marégrafos podem ser observados na Figura 10.

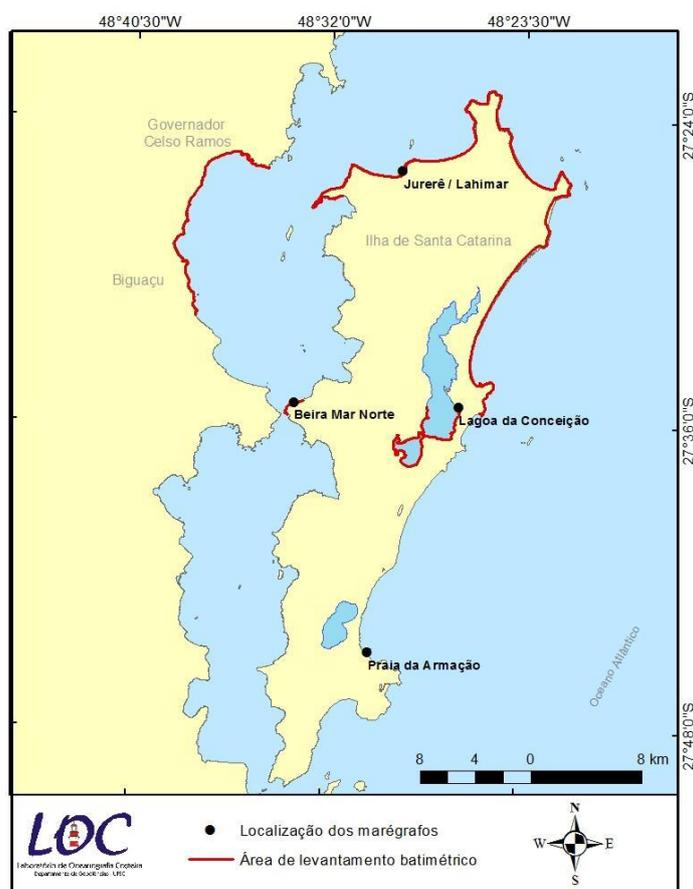


Figura 10 – Localização dos marégrafos e linhas de costa referente a todas as áreas de levantamento batimétrico sondadas para o projeto MMA Riscos.

Antes dos levantamentos acontecerem, todos os equipamentos foram devidamente instalados no barco e, como pedem os padrões de calibração para MBES, todos os offsets foram precisamente mensurados e, em seguida, o “patch test” foi realizado. Os dados batimétricos e sonográficos foram coletados utilizando-se os softwares Hypack[®]/Hysweep[®] e Discover[®], respectivamente.

Os dados batimétricos e de SVL aqisitados são enviados em tempo real para o software Hypack[®]/Hysweep[®], onde o mesmo converte a alta taxa de amostragem de distâncias/ângulos em amostras X,Y e Z transformadas em pegadas (binagem) dispostos ao longo da varredura. Este processo comum irá resultar em 400 a 800 pegadas uniformemente espaçadas pelo across-track, fazendo com que o dado pareça mais com um dado de MBES.

Durante a aquisição, os dados batimétricos foram binados por distância, conforme a tabela abaixo:

Tabela 2 – Especificações de binagens utilizadas para cada área de sondagem durante a coleta de dados batimétricos utilizando o software Hypack/Hysweep e o SDF Edgetech 4600.

Local	Tamanho do Bin (m)	Número de Bins	Tamanho Swath (m)
Ponta das Aranhas	0,20	400	80
Lagoa da Conceição	0,10	400	40
Canal da Barra da Lagoa	0,10	400	40

Um fluxograma exemplificando o passo a passo da aquisição dos dados, exclusivo do sistema Edgetech 4600 é exposto abaixo (Figura 11). A imagem demonstra a sequência de operação do sistema durante a aquisição. Basicamente os dados periféricos entram na interface e são enviados para o peixe, onde são sincronizados aos dados acústicos brutos e retornam à interface. Da interface, todos que estão sincronizados são enviados para o software Discover, onde o processador batimétrico calculará os ângulos e distâncias. Todos os dados são posteriormente enviados junto aos dados de SVP para o software de aquisição e processamento Hypack, onde um arquivo final é gerado.

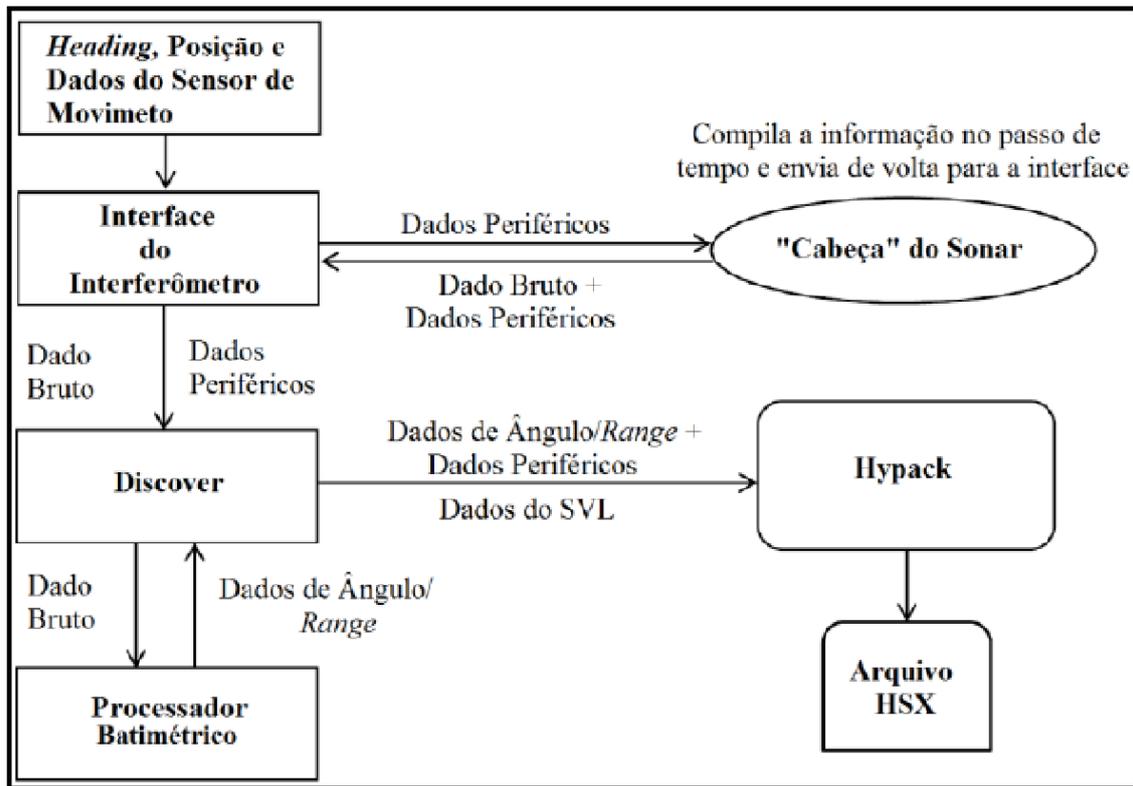


Figura 11 - Fluxograma do processamento interno de aquisição de dados do SDF EdgeTech 4600. Retirado de Porpilho (2015).

5.3 - Processamento

Os dados batimétricos e sonográficos foram analisados por intermédio do software Caris Hips&Sips®. O passo a passo do tratamento da batimetria segue o protocolo exposto abaixo.

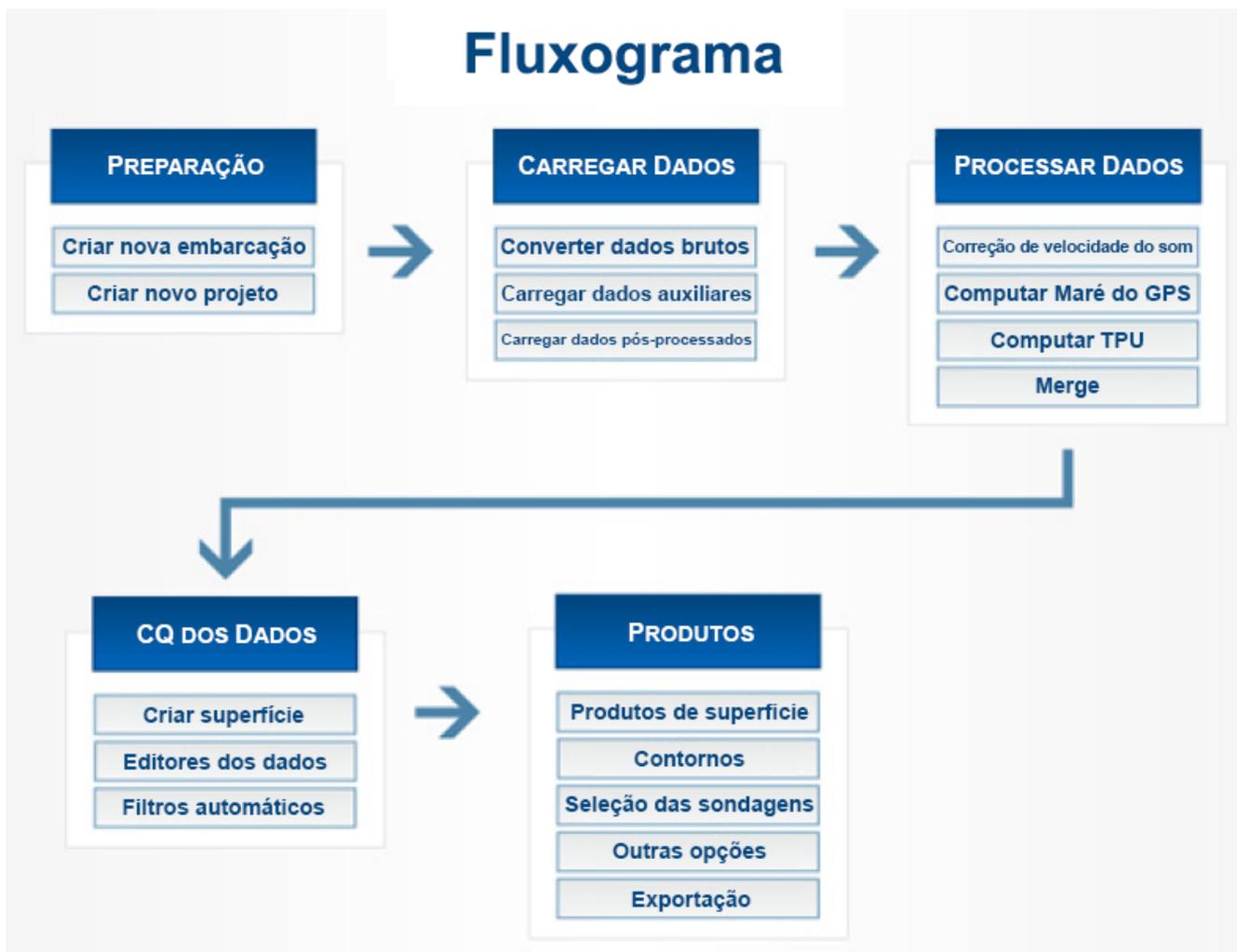


Figura 12 – Fluxo de procedimentos que devem ser realizados durante o tratamento de dados batimétricos utilizando o software Caris Hips & Sips. Em sequência temos: Preparação, Carregamento de dados, Processamento de dados, Controle de qualidade e Geração de produtos. Retirado de Caris (2015).

Durante a preparação (Figura 12), o projeto foi criado e o barco foi montado, contendo todas as informações de offsets, patch test, incertezas e dimensões da embarcação. Em seguida todos os dados brutos, que já estavam binados no arquivo .HSX (Hypack) foram convertidos para extensão do Caris. Durante o processamento dos dados, a velocidade do som foi corrigida, assim como a maré e as incertezas totais propagadas foram calculadas, e todas essas informações foram fundidas aos dados batimétricos. Em seguida, os dados passam por um controle de qualidade, onde podem manualmente ser limpos diretamente na varredura ou filtros podem ser aplicados. Na sequência, as superfícies batimétricas foram geradas utilizando-se a ferramenta CUBE.

Como citado por Hiller (2011), devido à grande quantidade de dados produzidos pelos SDF e a utilização de rotinas de processamento projetadas

para os MBES formadores de pegada, o grande gargalo dos SDF se encontra no processamento dos dados. No âmbito de demonstrar como os dados do SDF são bem processados apenas pela ferramenta CUBE, nenhuma limpeza manual ou aplicação de filtros foram realizadas.

Os dados sonográficos coletados na extensão .JSF, após serem convertidos para a extensão do CARIS, passaram por correções, onde a série temporal foi transformada em distâncias, a coluna d'água foi retirada e ganhos foram aplicados antes da criação dos mosaicos.

6-Resultados e Discussão

6.1- Ponta das Aranhas

6.1.1 - Identificação de Alvos

A identificação de alvos é uma característica primordial presente nos sistemas batimétricos que desejam se consolidar no mercado hidrográfico. Em regiões rasas, com menos de 40m de profundidade, é extremamente importante que os alvos identificados nos dados batimétricos sejam confiáveis, principalmente para a garantia da segurança na navegação. A OHI padroniza essa confiabilidade determinando limites estatísticos que os dados devem apresentar de acordo com a classe em que se enquadram (IHO 2008).

Apesar das resoluções apresentadas pelo fabricante, a Figura 13 mostra o menor alvo visualmente identificável em ambas as superfícies. Devido às características apresentadas no registro de intensidades (Figura 13, painel superior à direita), estamos diante de um buraco, onde sua forma circular e sua sombra acústica indicam a presença de uma depressão, uma vez que, quanto menor for o ângulo de incidência rasante, menor são as chances de a energia acústica atingir o fundo da depressão e ilumina-la.

Segundo Hughes Clarke (2013a), o aspect ratio, definido como a proporção entre a altitude do sonar e o comprimento da cobertura acústica, traz vantagens para as imagens de SVL em menores ângulos de incidência rasante, mas contrasta com a batimetria, onde geralmente maiores aspect ratios fornecem uma topografia de alta qualidade. Para este alvo, o aspect ratio se mostrou favorável para ambas as amostragens.

O perfil retirado da superfície batimétrica caracteriza a depressão em termos de desnível vertical e largura. Como pode ser observada, ela apresenta um desnível vertical máximo de 0,23 m e um diâmetro de 1,5 m. Embora ela se pareça com as pockmarcks encontradas na Lagoa da Conceição (Porpilho et al. 2014), apenas um levantamento sísmico de alta resolução poderá comprovar sua origem, caso depósitos rasos de gás sejam encontrados.

Wright & Brisson (2011), testando a aplicabilidade do SDF Edegetech 4600 na sondagem de um canal do porto de Everglades, FL, demonstram a capacidade de localizar alvos ao identificarem visualmente uma pequena rocha de 0,8 m (C) x 0,3 m (L) x 0,2 m (A) em uma superfície batimétrica gerada por grids de células com 0,50 m. A identificação do alvo foi confirmada nos registros de intensidades acústicas, mas as profundidades em que o registro foi feito (em torno de 4 m) são bem menores do que as apresentadas aqui.

Na superfície batimétrica (Figura 13, painel superior à esquerda) podemos observar que o sistema foi capaz de identificar o alvo a uma profundidade de 10,7 m. A posição do alvo entre as linhas de sondagem também o favoreceu, pois este ficou entre as extremidades das varreduras onde a relação sinal ruído é mais alta. Este é um fator que deve ser levado em consideração.

O alvo foi identificado, entretanto, com dificuldade. Esta dificuldade está atrelada a níveis de ruídos nos dados que começam a mascarar qualquer alvo cujas características físicas apresentadas sejam menores ou iguais a eles (baixa relação sinal ruído). Mesmo para uma superfície batimétrica mais detalhada, com grid de 0.30 m x 0.30 m, um alvo como o caracterizado acima, em profundidades como as especificadas, chega próximo ao limite de identificação imposto pelos ruídos.

Se um alvo é detectado nos dados batimétricos, o registro de SVL é utilizado para confirmar a existência e medir as características físicas deste alvo (Wright & Brisson 2011). O registro simultâneo dos perfis batimétricos e dos perfis de intensidades acústicas provou ser extremamente vantajoso para a identificação de pequenas feições, principalmente por elas estarem sempre próximas aos limites da relação sinal – ruído.

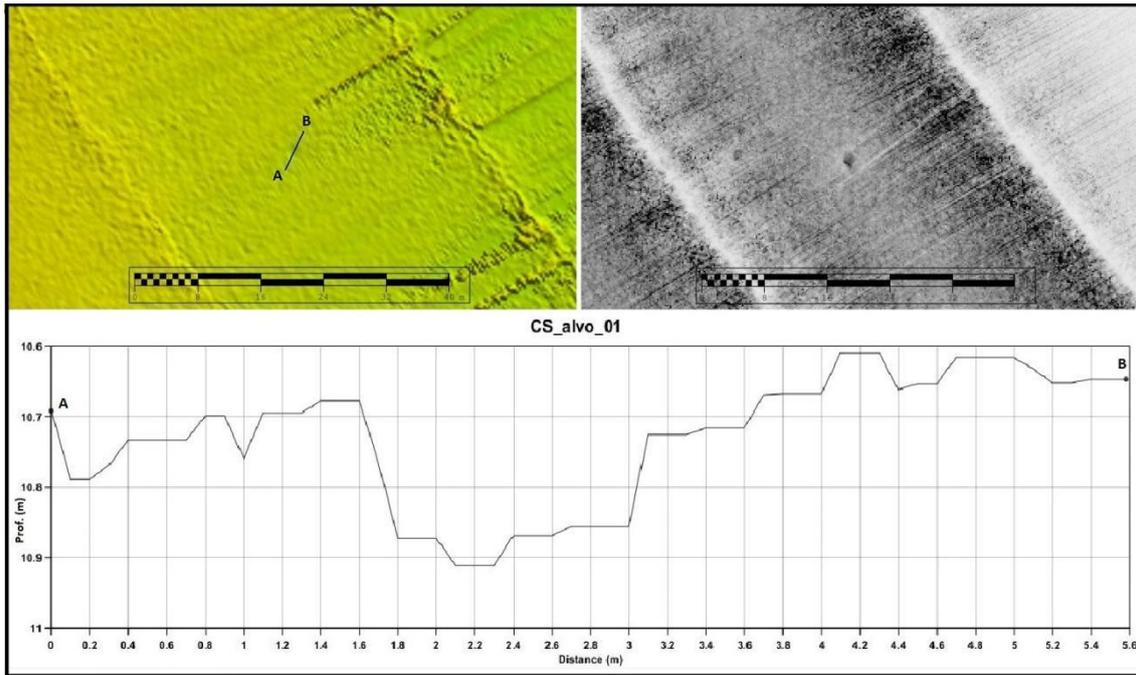


Figura 13 – Menor alvo encontrado na Ponta das Aranhas, caracterizado como uma depressão. Quadro superior esquerdo: superfície batimétrica localizando o alvo e o perfil. Quadro superior direito: mosaico de intensidades localizando o alvo. Quadro inferior: perfil demonstrando as medidas do alvo. Escalas de distância de 40m. Eixos profundidade x distância em metros.

O SDF demonstrou plena capacidade de detecção para alvos de grande porte. Porpilho (2015), estudando a geomorfologia da mesma área através de métodos geofísicos, aponta a presença de formas de leito na parte sul, orientadas praticamente perpendiculares à linha de costa. Visto sua forma e dimensão, estas feições foram classificadas como megaondulações assimétricas, catenárias, já que apresentaram comprimento entre 6 e 15 m (Porpilho 2015; Ashley 1990; Short 1999).

A Figura 14 identifica os locais onde três perfis foram amostrados diretamente sobre as megaondulações na superfície batimétrica com resolução de 0.30m e na superfície de intensidades acústicas. Através deles as feições sedimentares puderam ser caracterizadas quanto à sua altura, comprimento de onda e até mesmo a direção de migração sedimentar. Segundo Porpilho (2015), a altura destas feições varia entre 0,5 – 1,2 m e observa-se a presença do ângulo mais íngreme a sotamar, indicando o sentido de migração para norte.

Os perfis da Figura 15 foram extraídos da superfície batimétrica (Figura 14) onde um ponto de amostragem foi representado a cada 0.30 cm. O primeiro perfil vai do ponto A ao A' e passa pelas cristas de quatro

megaondulações. A maior delas apresenta aproximadamente 1 m de altura e 15 metros entre cavados. Nos três perfis assimétricos é possível observar a inclinação angular mais íngreme à sotamar, como proposto por Porpilho (2015). O mesmo pode ser observado nos outros dois perfis (BB' e CC').

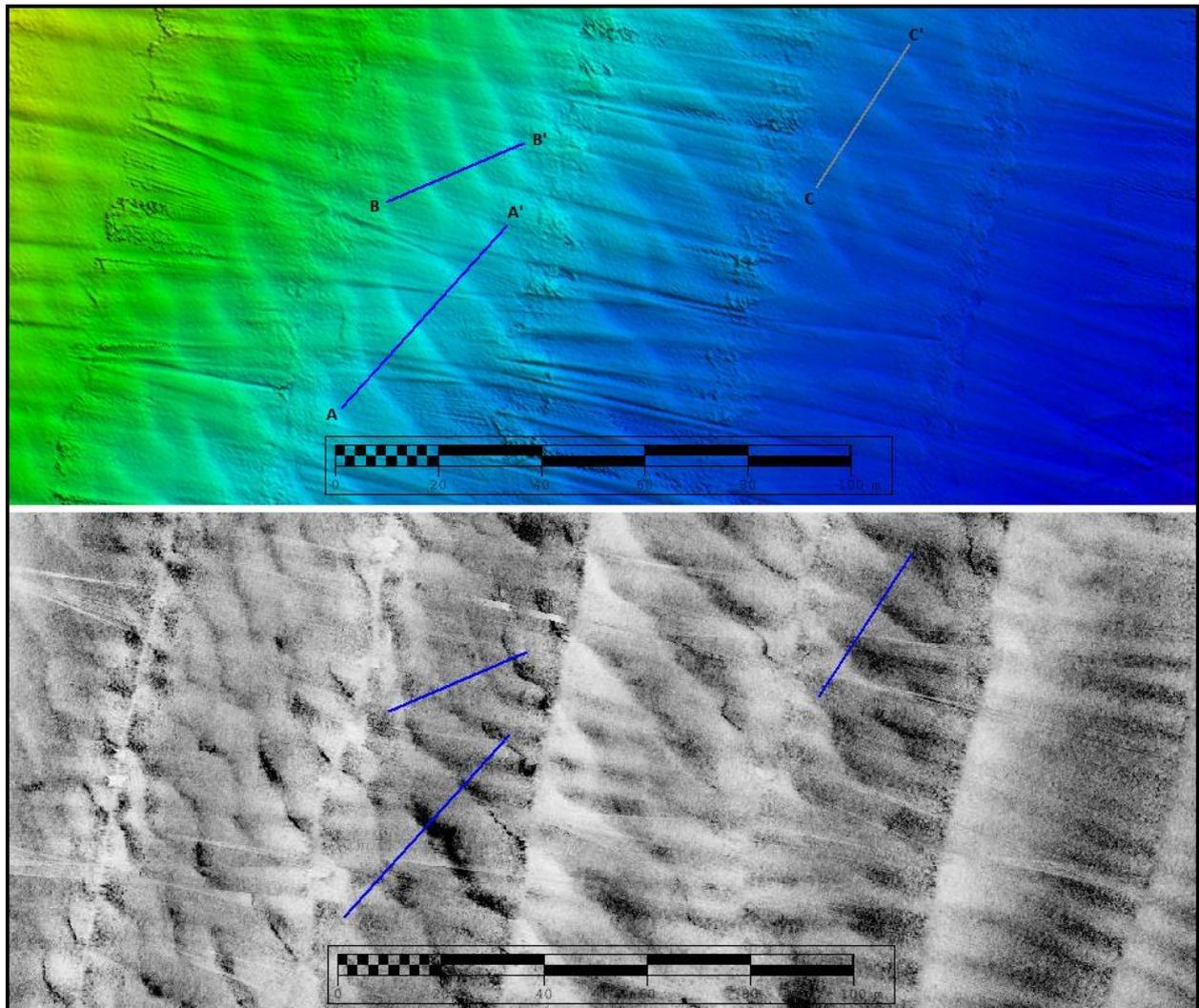


Figura 14 – Quadro superior: superfície batimétrica identificando os perfis retirados das megaondulações. Quadro inferior: localização dos perfis sobre as megaondulações representadas no mosaico de intensidades. Escalas de distância de 100m.

A fácil caracterização de feições de grande porte mescla-se com a presença de ruídos. Estes são notados tanto nas imagens quanto nos perfis e são gerados devido a limitações do próprio SDF e do sensor se movimentos.

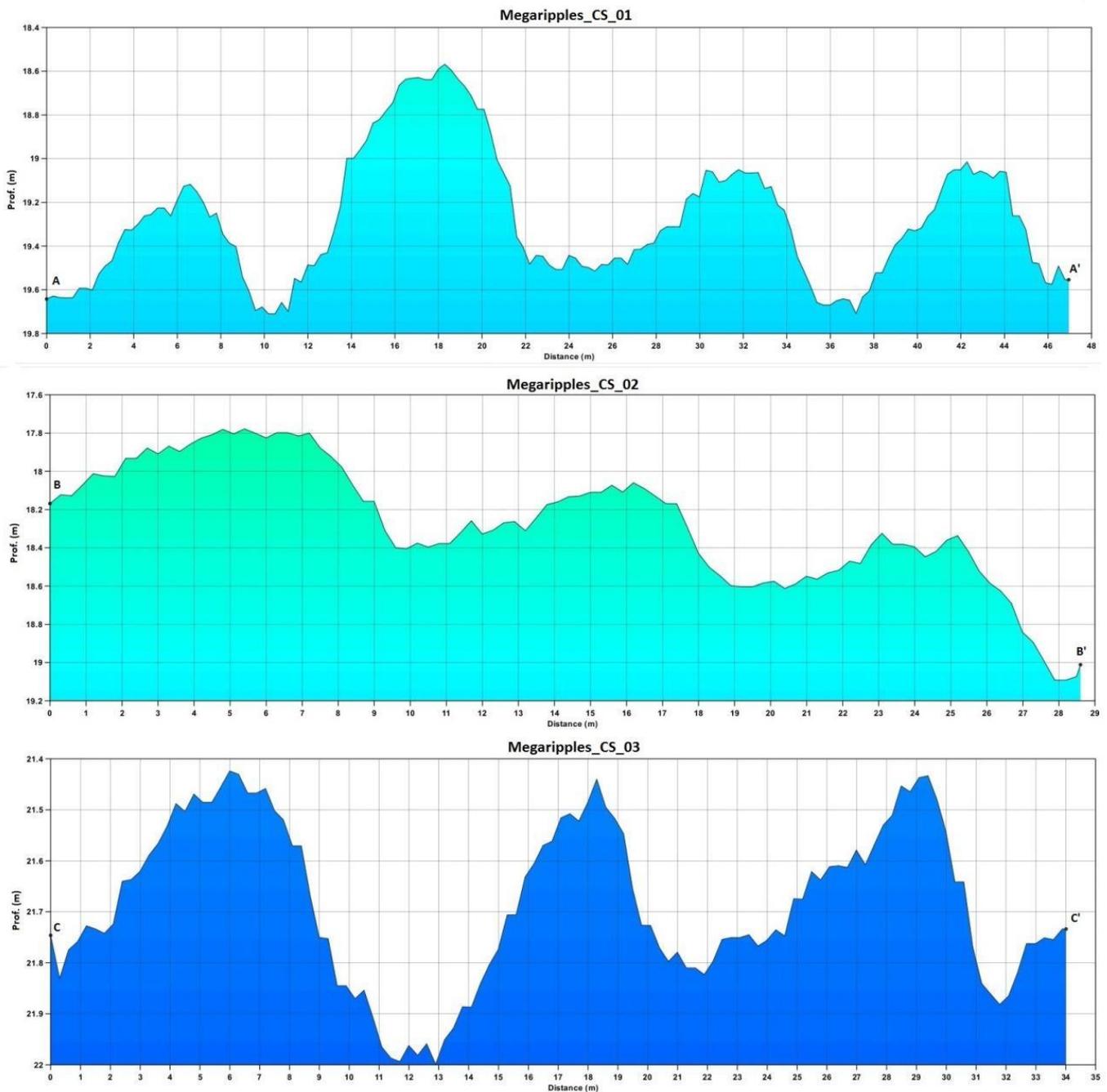


Figura 15 – Perfis representando as megaondulações, retirados da superfície batimétrica. De cima para baixo: perfil AA', perfil BB', perfil CC'. Eixos profundidade x distância em metros.

Na Figura 16 vemos três diferentes feições registradas simultaneamente numa superfície batimétrica e em um mosaico de intensidades acústicas. No quadrado destacado à direita, temos um conjunto de três megaondulações assimétricas. Devido ao tamanho, citado anteriormente, é possível identifica-las com facilidade no registro de intensidades, onde demonstram uma face elevada mais clara, voltada para o sensor acústico (ângulo de incidência mais

próximo da perpendicular à direção de deslocamento do pulso acústico), e, oposta a esta, uma face elevada sombreada, onde os reflexos acústicos são mais escassos devido a uma maior acentuação na declividade (ângulo de incidência quase paralelo à direção de deslocamento do pulso acústico). O encontro entre as duas fácies marca a crista das megaondulações. Alguns ruídos também podem ser observados, principalmente próximos ao nadir e em faixas perpendiculares à linha de navegação.

É clara a presença das megaondulações na superfície batimétrica feita com grid de 0,30 x 0,30m. Entretanto, alguns ruídos começam a se mesclar com as feições, fazendo com que as mesmas se alterem. Isto pode ser verificado quando olhamos para a direção das cristas e cavas das megaondulações. Estas acabam sendo segmentadas por ruídos gerados pelo próprio sistema e pela falta de eficácia na compensação dos movimentos sofridos pela embarcação. Ainda assim é possível traçar um perfil e identificar pela elevação a direção de deslocamento sedimentar, como visto anteriormente.

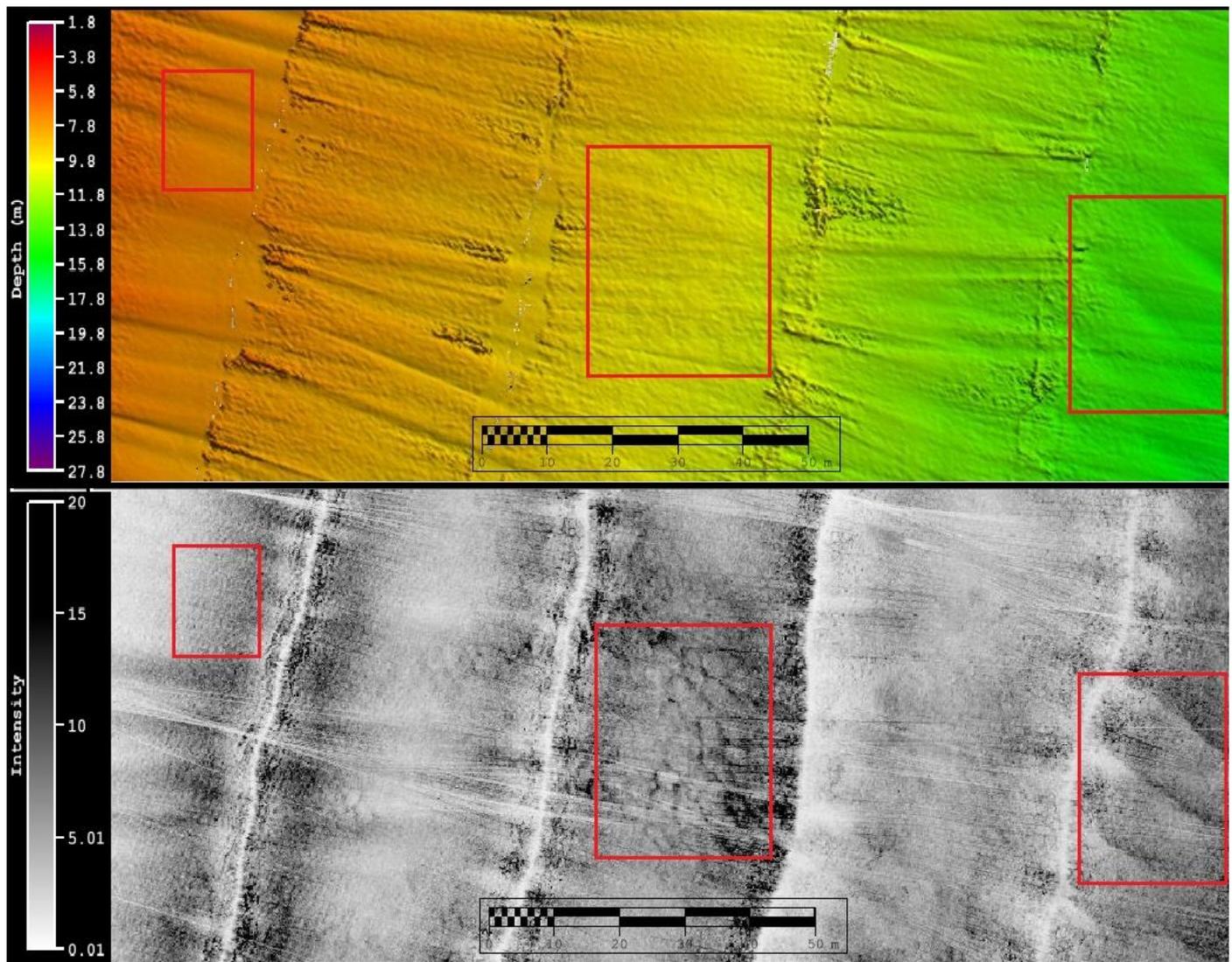


Figura 16 – Três diferentes feições sedimentares amostradas pelo SDF. Quadro superior: superfície batimétrica, com escala de profundidade variando entre 1,8m e 27,8m. Quadro inferior: mosaico de intensidades, com a escala de intensidade variando entre 0,01 e 20 watts. Quadro vermelho direito: megaondulações. Quadro vermelho central: feições circulares. Quadro vermelho esquerdo: pequenas feições onduladas. Escalas de distância de 50m.

Um dos principais atributos de identificação de objetos em imagens de SVL são as sombras formadas nos registros. Por causa de seus baixos ângulos de incidência rasante em áreas mais distantes da varredura acústica, os SVL são mais suscetíveis ao surgimento de sombras. Estas sombras têm retornos acústicos muito baixos ou inexistentes e podem também criar artefatos quando formadas em SDF (e.g. Lurton 2010). No entanto, podem contribuir para a interpretação das feições. As sombras estão relacionadas ao ângulo de incidência rasante e à altura do objeto que as originam, e a partir delas podem ser estimados o formato e a altura desse objeto (Blondel 2009). Com o SDF a uma altitude como a apresentada na Figura 16, a identificação e formação das

sombras tonam-se desfavoráveis, por causa do alto ângulo de incidência rasante, surgindo isoladamente apenas devido ao formato (ângulos) dos objetos em relação à direção do pulso acústico.

O quadrado ao centro (Figura 16) destaca outro tipo de feições dispostas em conjunto, que variam entre 2 - 4m de diâmetro. O registro de intensidades demonstram bem suas características geométricas circulares, mas em alguns pontos nota-se que estas características são ligeiramente perturbadas, devido principalmente aos giros laterais da embarcação sobre o seu próprio eixo. Na superfície batimétrica, a presença de ruídos é tamanha que acaba por mascarar as feições em quase sua totalidade, deixando perceptível apenas uma feição, quando bem analisada.

Segundo Brissette (2006), ao tentar identificar objetos em superfícies batimétricas pós-processadas, pequenos erros na posição horizontal e vertical podem fazer com que o mesmo objeto detectado em diferentes linhas de sondagem caia em diferentes células de grid. Como resultado, o valor Z gridado faz com que o objeto pareça maior do que realmente é, ou pode torná-lo indetectável quando as duas linhas são combinadas pela média das alturas batimétricas. Este fato pode explicar a ausência da feição na superfície batimétrica (Figura 16), uma vez que as partes mais externas e ruidosas das varreduras foram combinadas com as partes mais internas e claras, exaltando os ruídos e mascarando a feição.

No quadro destacado à esquerda (Figura 16) podemos observar pequenas feições arenosas onduladas com comprimento de onda variando entre 0,20 – 0,50m. Apesar de pequenas, estas feições foram registradas no mosaico de intensidades, porém de forma mais clara apenas nas áreas mais próximas ao nadir, onde uma maior quantidade de energia acústica incide sobre o fundo. Não é possível identificar as mesmas feições em áreas mais distantes do nadir devido à baixa razão sinal-ruído. Onde os ruídos causados pelos giros laterais da embarcação sobre o seu próprio eixo ocorrem, as feições são completamente distorcidas. Na superfície batimétrica é impossível detectar as mesmas feições. Suas dimensões estão bem abaixo das apresentadas pelos ruídos, tornando-se assim um desafio para o sistema

identificar tais feições nesta profundidade (7 a 16m). Grids menores, de 0,10 x 0,10m por exemplo, impossibilitam ainda mais a identificação por pronunciarem ainda mais os ruídos.

A binagem de dados é uma prática comum para esse tipo de sistema batimétrico. Sua principal função é reduzir a densidade e ruído dos dados batimétricos processados antes de serem gridados. Na binagem, todos os pontos batimétricos brutos de toda a varredura são divididos pelo número de pegadas determinado pelo usuário. Quando divididos, cada pegada tem seus pontos utilizados para calcular uma média e obter um valor único. A binagem pode ser feita de duas maneiras: por distância (e.g. 200 pegadas de 0,20m) ou por ângulo (e.g. 200 pegadas de 0,5°). Ambas as técnicas de binagem são adequadas para fins de mapeamento geral, desde que a resolução horizontal dos resultados binados ao longo da varredura produza uma densidade de dados batimétricos adequada para suportar a resolução do grid desejado (Wright & Brisson 2011; Schmidt & Jerram 2015).

O critério fundamental para a detectabilidade de um alvo específico é que se o alvo pode fornecer energia acústica suficientemente refletida em direção aos receptores e se as reflexões acústicas do ambiente ao redor forem uniformes e baixas, então o alvo pode ser detectado pelo sonar. Teoricamente, o retroespalhamento é afetado, em importância decrescente, pela geometria do sistema sensor-alvo (ângulo relativo de ensonificação), pelas características morfológicas da superfície (e.g. rugosidade de micro-escala) e pela sua natureza intrínseca (composição, densidade, impedância, importância relativa do volume e superfície de reverberação) (Blondel & Murton 1997; Blondel 2000; Lurton 2010; Tian 2008).

Segundo Brissette (1997), a pegada do sonar nas extremidades da varredura deve ser menor que o menor alvo para que haja qualquer chance de detecção. Quanto menor a pegada do sonar, em relação ao objeto, maior a probabilidade de detecção. Pegadas de menor largura permitem a detecção de objetos em maiores profundidades assim como a de objetos menores na mesma profundidade.

A binagem de 0,20m dos dados pode ter contribuído para a não

detecção, uma vez que essas micro-ondulações apresentam tamanhos similares as pegadas. Além disso, seu tamanho diminuto e suas características acústicas homogêneas mesclam seu retroespalhamento aos ruídos ambientais, dificultando a identificação do sinal retroespalhado.

6.1.2 - Limitações:

Na Figura 17 é possível observar uma das limitações do SDF. Devido ao fato da coleta de dados batimétricos e sonográficos ser simultânea é necessário que o sistema assuma características de operação dos MBES, os quais necessitam ser fixos na embarcação. O mais comum é montá-lo em uma extremidade de uma haste, mas dependendo da situação, fixá-lo no casco da embarcação é a melhor opção. Com isso, os dados coletados pelo SVL ficam suscetíveis a qualquer movimentação que a embarcação venha a desenvolver. No quadro à direita, observamos um mosaico de intensidades acústicas coletados pelo SDF nas proximidades do campo das megaondulações. É possível observar a degradação sofrida pelos dados devido às movimentações do SDF sincronizadas à embarcação. Os defeitos mais pronunciados são causados pelo roll, movimento onde a embarcação inclina repetidas vezes para um lado e para o outro, em um balanço lateral. Como consequência, o registro de intensidades apresenta faixas horizontais escuras e claras sequenciais. Com o balanço da embarcação, o “boresite” ou centro do pulso acústico é direcionado, hora para a extremidade da varredura, hora para o nadir. As variações de energia acústica são distribuídas pela varredura tornando o registro mais e menos intenso em sequência (quadro vermelho da Figura 17). Essas movimentações causam grande degradação nos dados, impedindo até a identificação de alvos. Segundo Cobra (1992), esta instabilidade gerada pela movimentação da embarcação é classificada como rotacional e denominada “Rolling”. Ela resulta em distorções de intensidades nas áreas ensonificadas pelo SDF, principalmente logo abaixo do nadir e nas porções mais externas.

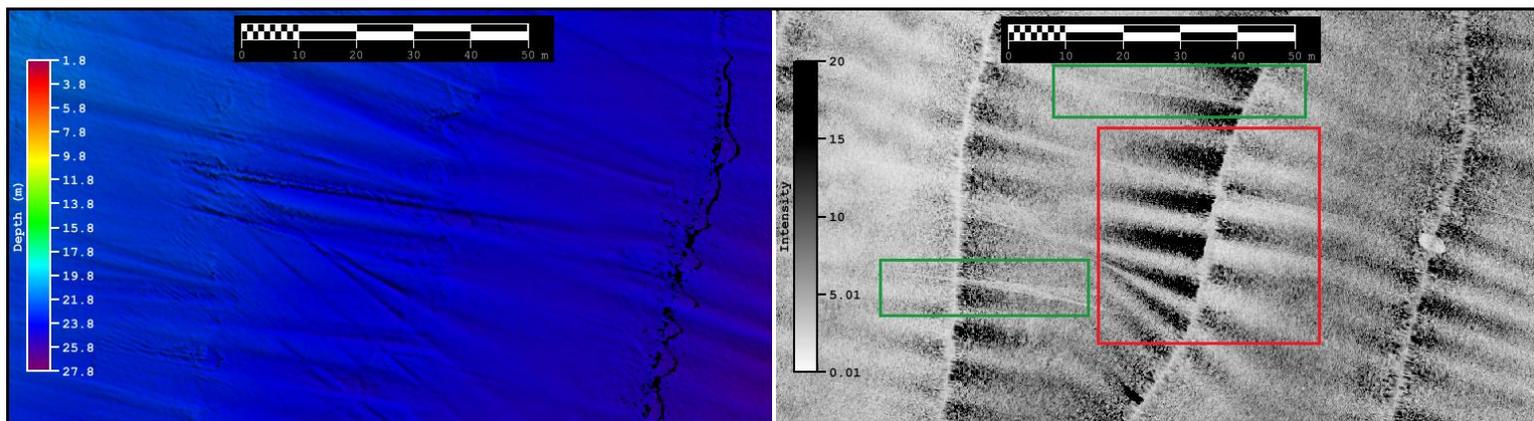


Figura 17 – Limitações apresentadas pelo SDF. Quadro esquerdo: superfície batimétrica revelando as limitações do SDF. Escala de profundidades varia entre 1,8m e 27,8m. Quadro direito: mosaico de intensidades revelando as limitações do SDF. Escala de intensidades varia entre 0,01 e 20 watts. Quadro vermelho: Rolling. Quadros verdes: Yawning. Escalas de distância de 50m.

Além da degradação gerada pelo balanço lateral é possível observar marcas no registro de intensidades relacionadas às alterações na densidade amostral, devido exclusivamente aos giros da embarcação no seu eixo vertical ou curvas. Como o trabalho com pulsos acústicos de alta frequência em ambientes rasos demandam um ping rate elevado, qualquer mudança de direção em torno do eixo principal da embarcação gerará uma amostragem além da necessária. Como consequência, o registro de intensidades é degradado por leques laterais que podem ser observados no quadro verde da Figura 17. Estes podem causar distorções nas imagens, modificando assim a realidade das feições e alvos amostrados.

Segundo Cobra (1992), ventos e correntes marinhas causam variações instantâneas na velocidade e direção de navegação de uma embarcação. Como os SDF estão sujeitos a estas instabilidades geradas por movimentação, variações no aspect ratio e outras distorções geométricas de larga escala acabam deterioram as imagens formadas. A instabilidade demonstrada na Figura 17 é classificada como rotacional e denominada “Yawing”. Ela causa um agrupamento de pontos batimétricos de um lado e, simultaneamente, uma dispersão de pontos do outro lado da varredura, alterando a densidade de dados. Quanto mais externos forem os feixes, mais intensas serão as variações. Essas instabilidades são mais sensíveis em embarcações de pequeno porte e podem diminuir a chance de detecção de um objeto durante a dispersão, assim como alterar seu real tamanho, aumentando-o durante o agrupamento (Cobra 1992; Hughes Clarke et al. 1998).

A Figura 18 pertence a uma seção da linha 009 da área estudada e mostra a densidade de dados extraídos de sua superfície batimétrica. É possível observar de forma clara como os dados de SDF sofrem mudanças com as instabilidades rotacionais “yawning” e “pitching” (caturro).

O mapa batimétrico à esquerda (Figura 17) representa a mesma área e também demonstra erros que não compõe a real batimetria do local. As distorções presentes no registro de intensidade acústica geradas principalmente pelo “Rolling” também estão presentes na superfície batimétrica, apesar da utilização de um compensador de movimentos junto ao set de equipamentos que compõe o SDF. Isto é fruto de rápidos balanços laterais da embarcação unidos a um compensador de ondas não adequado para as condições de trabalho. Neste caso, resíduos não compensados dos balanços aparecem na superfície batimétrica.

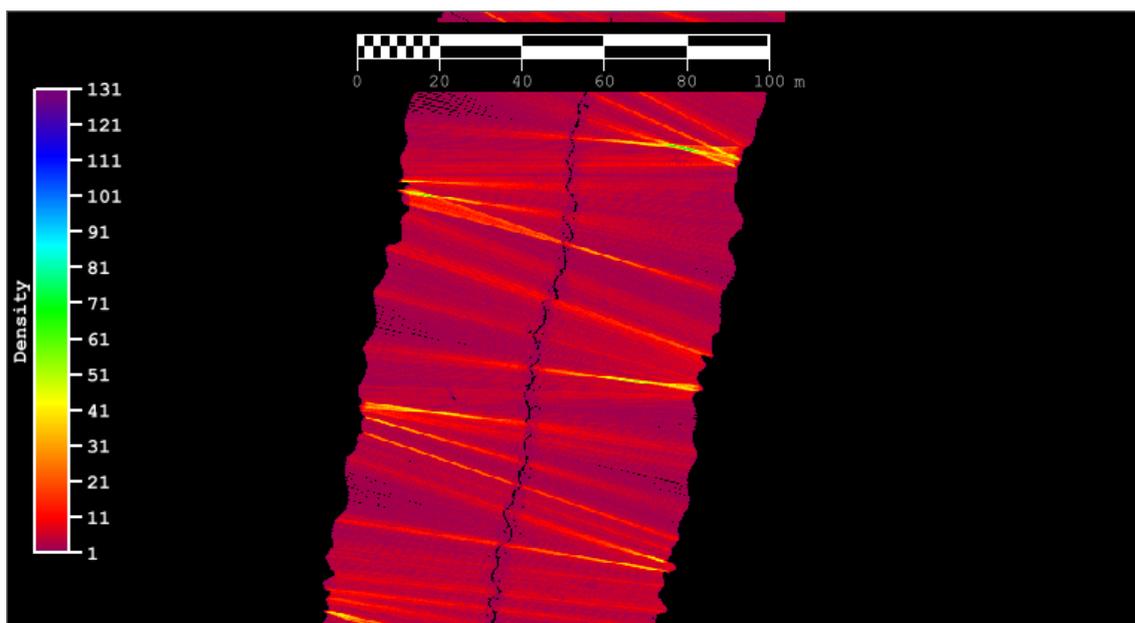


Figura 18 – Seção da linha 009 como superfície de densidade de pontos batimétricos exemplificando yawning e Pitching. Escala de densidade varia entre 1 e 131 pontos por grid. Escala de distância de 100m.

Erros na determinação da atitude podem, em alguns casos, serem maiores que a resolução ou maiores que a acurácia nominal de medida do sensor de movimento. Se a atitude for sub-amostrada ou se a atitude estiver fora da banda de passagem do sensor, então podem ocorrer erros maiores que os erros medidos pelo instrumento (Hare 1995).

Parker & Mallace (2005), comparando a eficiência entre cinco sensores

de movimento de fabricantes diferentes, demonstra que, sob rolamento de alta frequência (até 12°) e taxa de variação de até 8° por segundo, nenhum deles foi capaz de operar dentro de seus próprios níveis de precisão de rolamento especificados.

Hughes Clarke (2003) cita diversos fatores que levam a erros de atitude e geram resíduos na superfície batimétrica. Dentre eles, os que podem causar erros observados na superfície batimétrica, além do supracitado, são o alinhamento imperfeito dos eixos de roll e pitch com o sistema referencial da embarcação e os erros nas medidas dos offsets dos sensores em relação ao sistema de coordenadas da embarcação.

Ruídos:

Em dados de sonar, um outlier é uma amostra não representativa da profundidade, provavelmente porque não surge de uma medida batimétrica, mas de um ruído ou reflexões de outros objetos (Hiller & Hogarth 2005).

Acusticamente, ruídos são compostos por diversas frequências. Embora exista uma ampla gama de fontes de ruído ambiental no oceano, os únicos que realmente impactam no desempenho dos sonares são aqueles que estão dentro da largura de banda (“bandwidth”) utilizada pelo sistema (Hughes Clarke 2013b).

Segundo Hiller (2011), tradicionalmente os SDF apresentam problemas relacionados a ruídos ambientais e internos, assim como em resolver diferentes ângulos que retornam ao mesmo tempo.

A fase de um retorno acústico do assoalho marinho é um parâmetro muito ruidoso para medir. Em um ambiente livre de ruído, a fase instantânea de cada um dos retornos em cada um dos receptores poderia ser determinada. Cada receptor, no entanto, é geralmente corrompido por ruído não correlacionado (ruído térmico, ou ruído gerado por pequenas manchas de diferente composição). Mesmo o ruído sendo pequeno em relação ao sinal emitido, ele pode influenciar na medida do ângulo, adicionando um pequeno

vetor de fase aleatória ao final da fase do sinal. Isso gera uma incerteza na estimativa do ângulo do retorno acústico. Estes ruídos nos ângulos são a principal fonte de ruídos presentes nas superfícies batimétricas (Hughes Clarke 2013a; Hiller 2011).

A Figura 19 foi retirada da linha de sondagem 009, com varredura total de 80m em profundidades de 10 – 15m (cobertura = 8x profundidade) e exemplifica como os dados de SDF são ruidosos. Nela, diversas varreduras em sequência formam uma pequena superfície. Na parte de cima, tem-se a visão traseira das varreduras. É possível observar como seus ruídos são maiores na região do nadir e como eles crescem em direção aos feixes externos. Fica claro que, a partir dos 20m (para cada lado) a influência dos ruídos aumenta progressivamente, degradando a qualidade de praticamente metade da varredura. Na parte de baixo podemos ver a superfície 3D formada por cada varredura, exagerada verticalmente em cinco vezes, ressaltando os ruídos presentes em cada um.

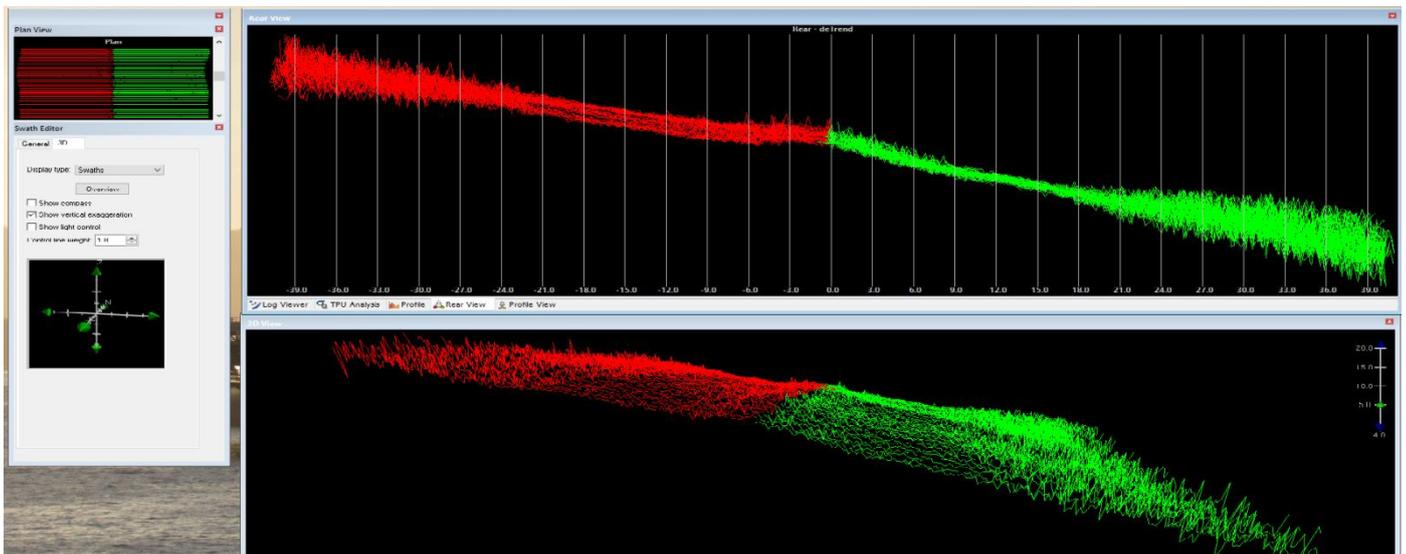


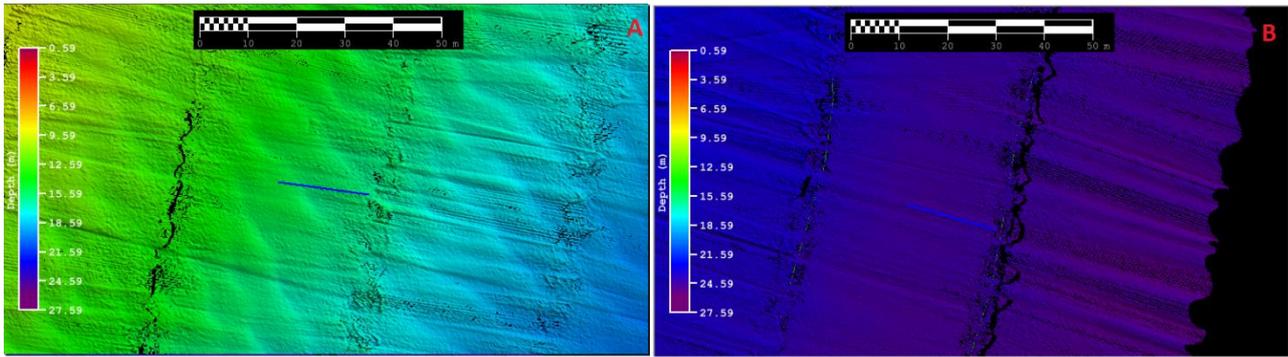
Figura 19 – Exemplo de varreduras da linha 009 compondo uma pequena superfície, observadas no software Caris. Quadro superior: visão traseira das varreduras exaltando os ruídos na região do nadir e nos feixes mais externos. Quadro inferior: visão em 3D das varreduras compondo uma pequena superfície, exagerada verticalmente em cinco vezes.

Os ruídos foram mensurados (Figura 20) extraindo-se perfis de uma superfície batimétrica com 100% de cobertura, ou seja, em linhas paralelas, a metade da varredura de uma é 100% coberto pela metade da varredura da outra. A superfície foi gerada com o CUBE e gridada em 0,20m. Os perfis extraídos exibem uma informação a cada 0,05m. A escolha dos locais

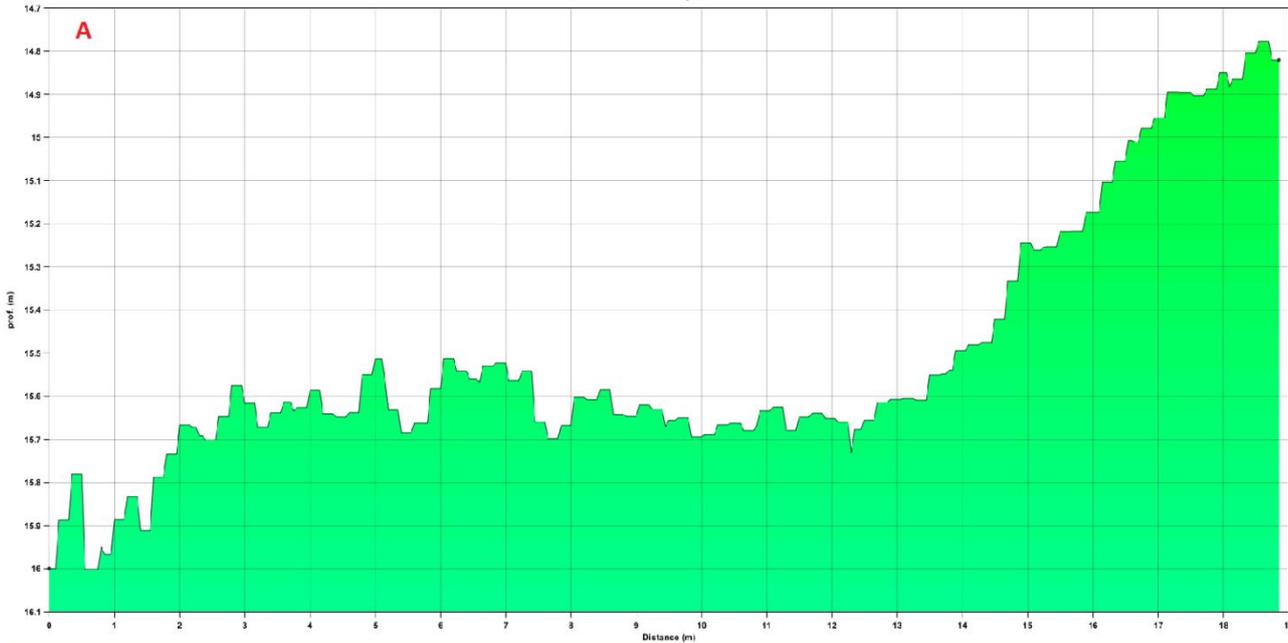
contempla duas profundidades diferentes e o tamanho de cada perfil foi determinado de modo a representar a região onde a metade interna (menos ruidosa) de um dos lados da varredura une-se a metade externa (mais ruidosa) que pertence à varredura da linha ao lado. As direções dos perfis foram escolhidas de modo a evitar a amostragem dos ruídos de menor frequência gerados pela movimentação da embarcação.

O perfil mais raso “A” está localizado sob as megaondulações e limita-se entre as profundidades de 14,8 a 16 m. Neste perfil, apesar dos tamanhos variarem, dificilmente um ruído passa dos 0,10 m de altura. Apenas entre os 8 m iniciais do perfil podemos observar alguns maiores. É nessa região que os dados referentes às reflexões do nadir em uma linha mesclam-se com os dados referentes aos feixes externos da outra. Como as incertezas nessas regiões da varredura são maiores, os ruídos presentes ali também serão.

O perfil “B” está localizado na porção mais profunda do local, fora das megaondulações, e limita-se entre as profundidades de 24,2 e 24,7 m. Diferentemente do perfil “A”, neste perfil uma porção bem maior dos ruídos passa dos 0,10 m, principalmente nos 12 m iniciais do perfil, com alguns se aproximando dos 0,20m. É visível que os ruídos causam degradações na varredura ainda maiores com o aumento da profundidade.



Ruído Perfil 01 - Sup. 0.20m



Ruído Perfil 02 - Sup. 0,20m

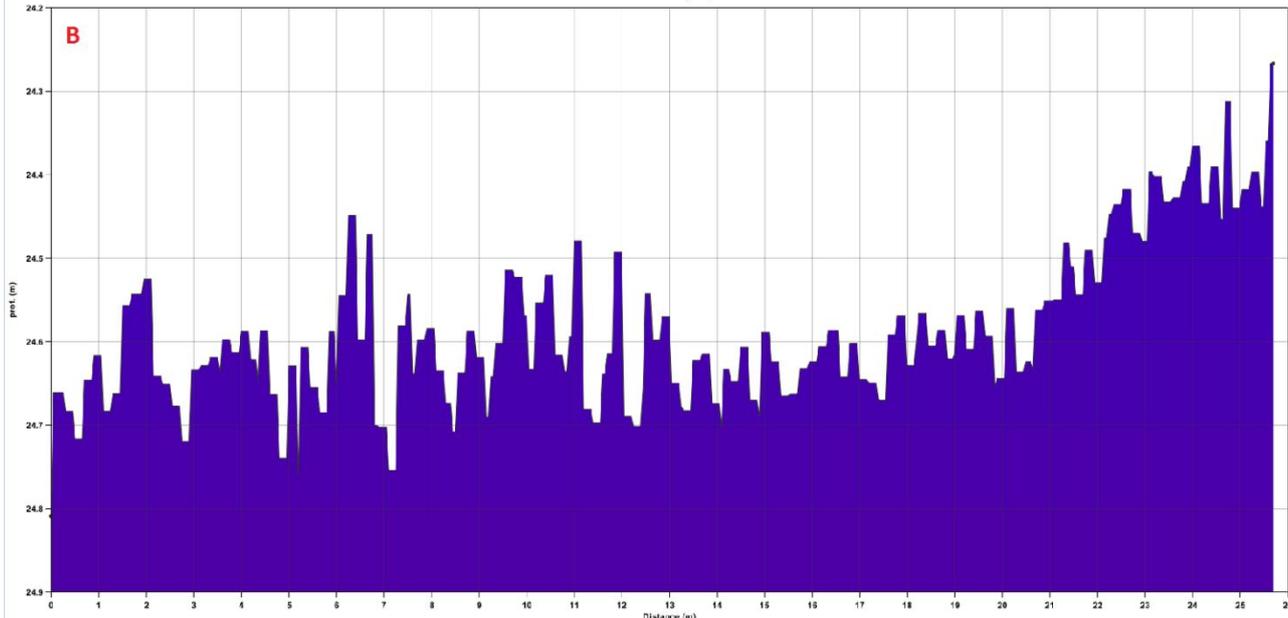


Figura 20 – Perfis de mensuração dos ruídos presentes na superfícies batimétricas. Quadro esquerdo: localização do perfil A sobre a superfície. Quadro direito: localização do perfil B sobre a superfície. Escalas de profundidade variam de 0,59m a 27,59m. Escalas de distância de 50m. Eixos profundidade x distância em metros.

Na Figura 22 podemos observar o que acontece quando duas linhas paralelas são gridadas juntas. Em “A” temos uma superfície batimétrica sob o campo de megaondulações com grid de 0,30m. Metade da varredura referente a cada uma das duas linhas de sondagem se sobrepuseram em 100% de cobertura na parte central da superfície (e.g. dividindo a superfície em três setores norte-sul, separados pelas linhas de sondagem, os feixes que se sobrepõe estão localizados no setor central). Além do nadir, as extremidades da superfície (não sobrepostas) apresentam nítidos ruídos relacionados à geometria do sonar, principalmente nas áreas mais rasas. Na parte central, as partes mais externas e ruidosas dos feixes mesclam-se com as partes mais internas e menos ruidosas, diminuindo assim o ruído aparente. Entretanto, os efeitos gerados pelo “pitching” e “yawning” quando mesclados aparentam ser ainda mais degradantes. Efeitos podem ser intensificados ou anulados dependendo da fase em que ambos se unem. Isto pode ser observado na comparação entre perfis abaixo (Figura 21).

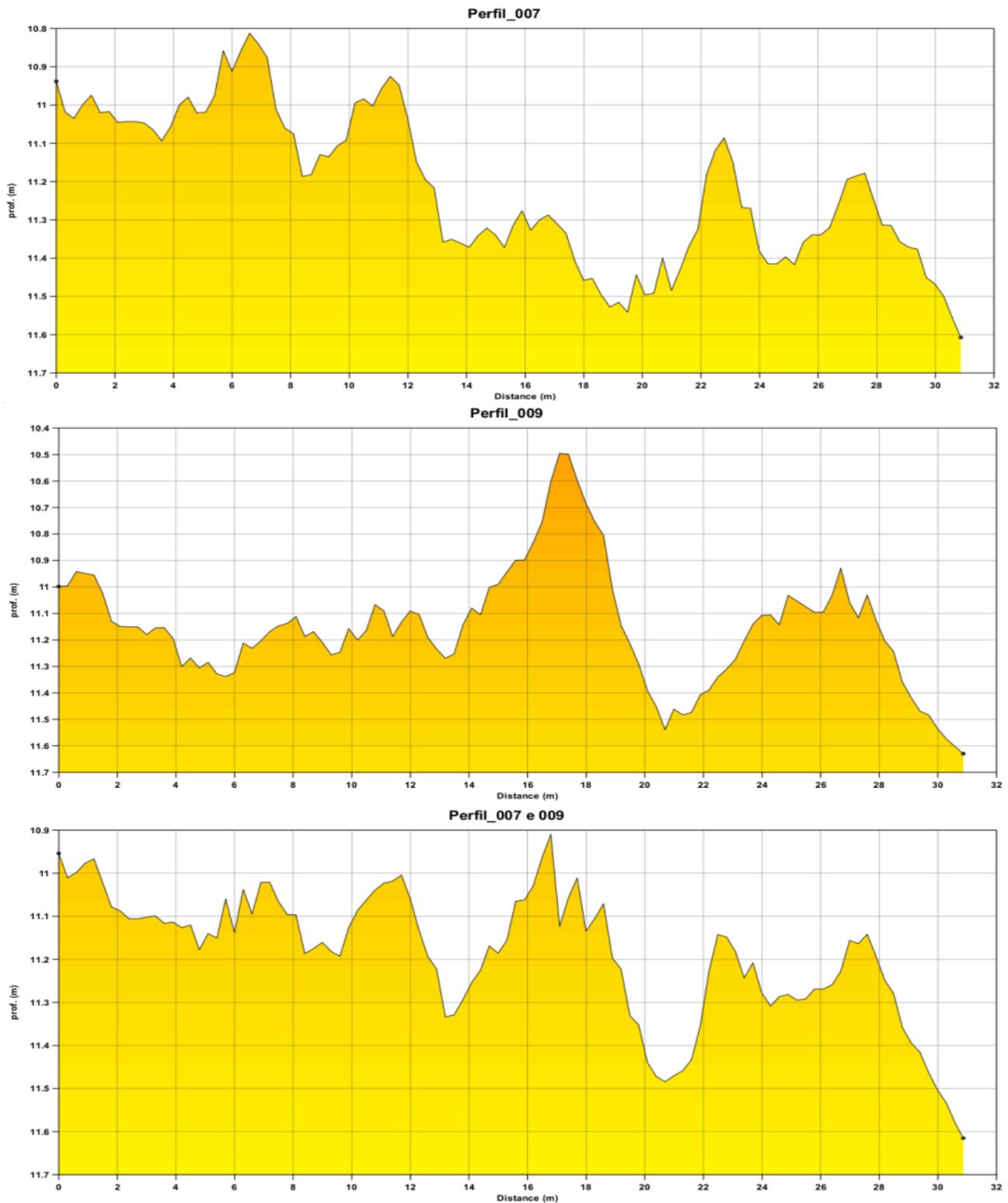


Figura 21 – Perfis que demonstram os efeitos causados pelas movimentações da embarcação e como eles modificam a superfície quando dados batimétricos de duas linhas, 007 e 009, são mesclados. Eixos profundidade x distância em metros.

O quadro “B” demonstra a distribuição da densidade de dados batimétricos. Além de evidenciar os ruídos mencionados acima, podemos observar que as densidades nas partes sobrepostas são efetivamente maiores

que as apresentadas nas extremidades opostas. As densidades podem variar de uma medição para uma pegada a até 93 medições para uma pegada.

O quadro “C” demonstra os valores de desvio padrão para as medições batimétricas que compõe a superfície. Naturalmente seu valor aumenta com o aumento da distância do nadir. É possível observar com clareza essa característica nos setores onde não há sobreposição. No setor central, fica claro que a sobreposição gera um aumento nos valores de desvio padrão, principalmente onde as extremidades de cada varredura unem-se ao nadir e onde os ruídos oriundos das movimentações da embarcação se mesclam em fases diferentes.

A razão dos altos valores de desvio padrão nos dados de SDF é atribuída ao fato de que o conjunto de dados é muito mais denso e não há nenhum algoritmo de detecção de fundo aplicado durante a aquisição como existe nos MBES (Hiller & Lewis 2004).

No quadro “D” podemos observar a distribuição das incertezas. Elas apresentam comportamento similar ao desvio padrão, com seus valores aumentando com o aumento da distância do nadir, no entanto sua escala de variação é bem menor, variando de 0,10 a 0,12m. Seus valores apresentam também um ligeiro aumento no setor sobreposto. Os valores mais altos estão associados a apenas alguns ruídos gerados pela movimentação da embarcação.

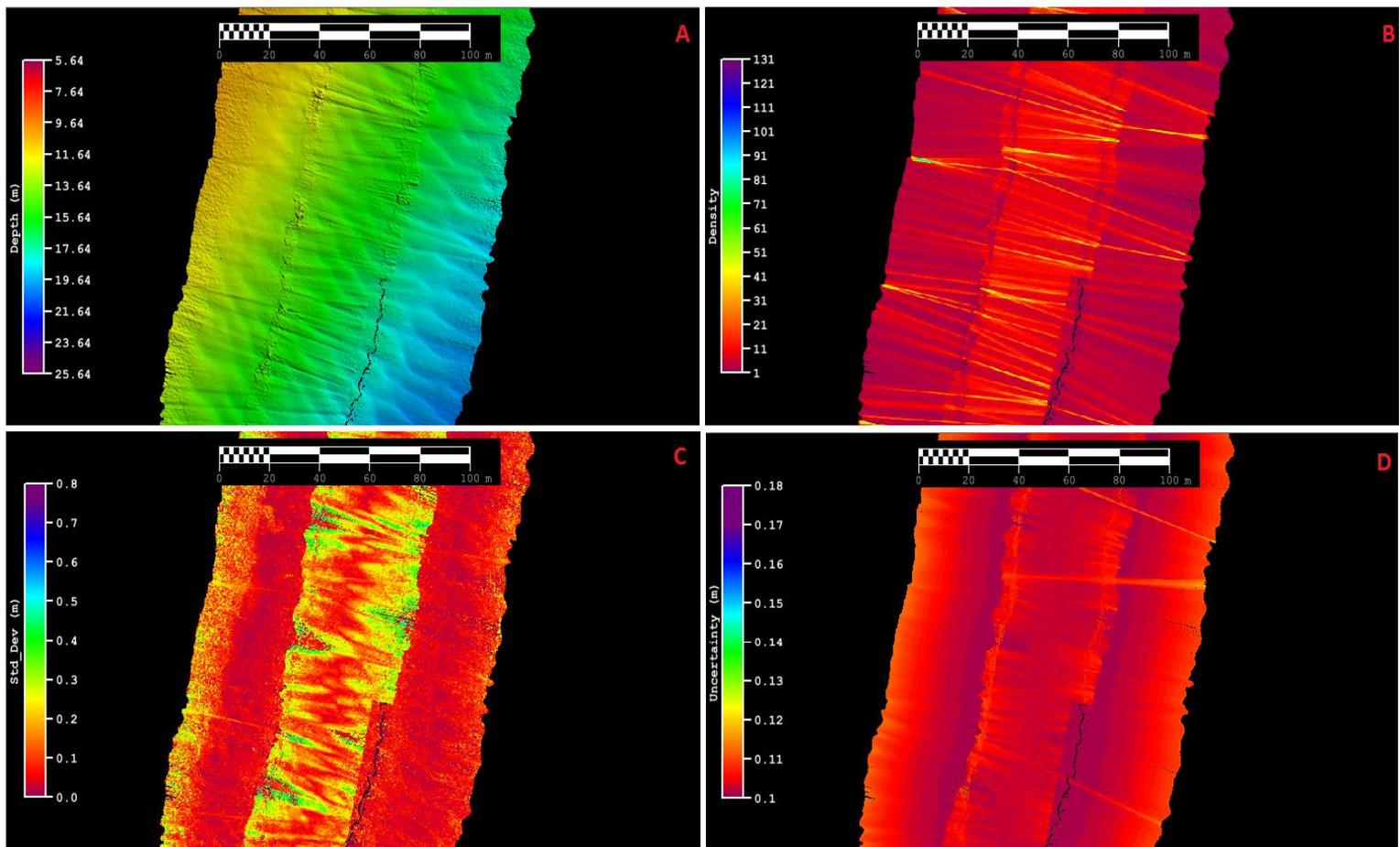


Figura 22 – Superfícies geradas pela união entre as linhas 007 e 009. Quadro A: superfície batimétrica (m). Quadro B: superfície de densidade. Quadro C: superfície de desvio padrão (m). Quadro D: superfície de incerteza (m). Escala de distância de 100m.

Para fins de comparação, em busca da melhor apresentação, superfícies batimétricas foram geradas com o CUBE em diferentes tamanhos de grids: 0,10m; 0,20m; 0,30m e 0,40m (Figura 23). A superfície que visualmente apresenta o melhor balanço entre preservação dos detalhes e supressão de ruídos é a gridada com 0,30m. A mesma situação foi observada por Jerram & Schmidt (2015), utilizando diferentes SDF.

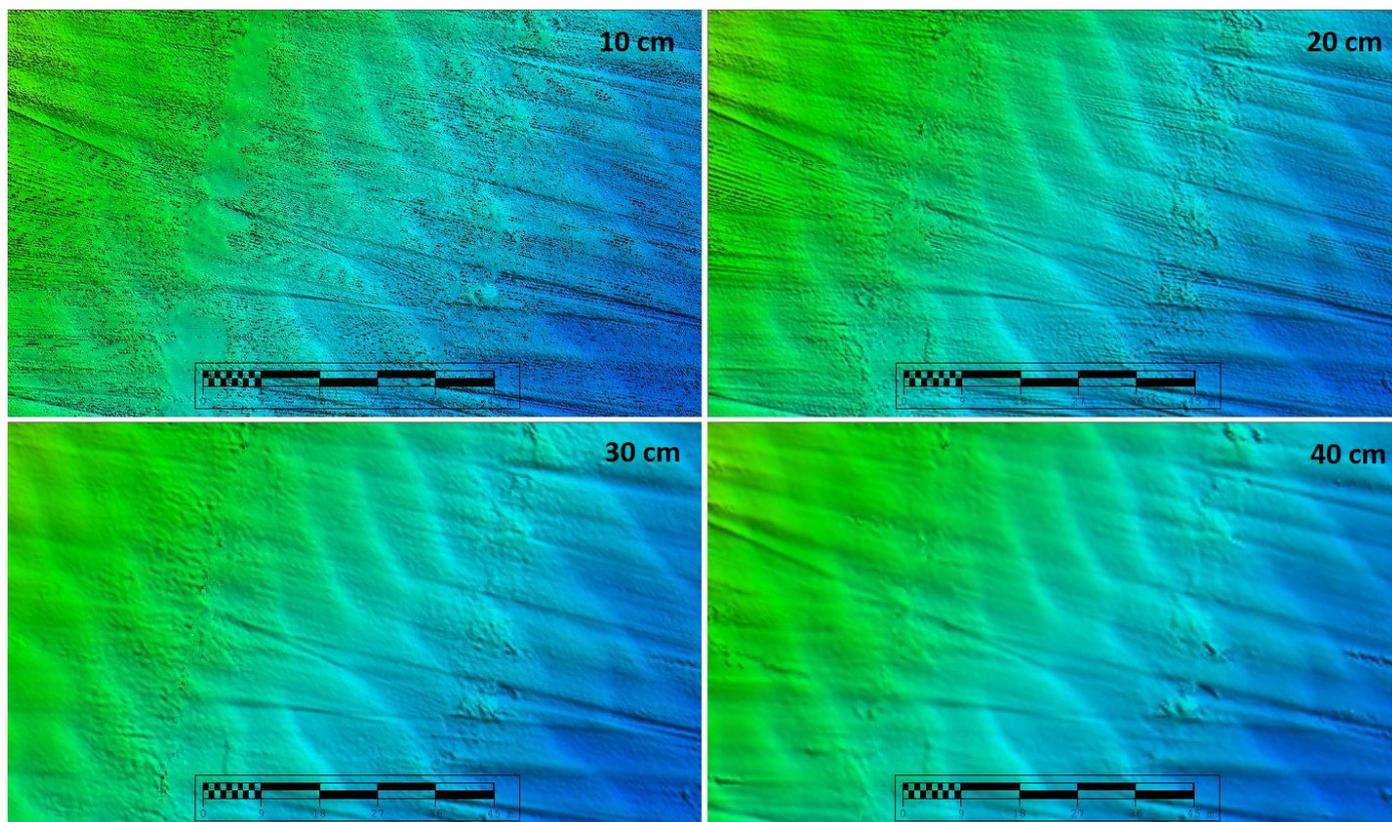


Figura 23 - superfícies batimétricas geradas com a ferramenta CUBE usando diferentes tamanhos de grids: 0,10m; 0,20m; 0,30m e 0,40m. Escala de distância de 45m.

6.2 – Lagoa da Conceição

6.2.1 - Identificação de alvos

Um dos principais alvos dentre os identificados pelo SDF nas rasas águas da Lagoa da Conceição foi uma canoa canadense de fibra naufragada (Figura 24). Ela estava localizada no extremo oeste da lagoa, entre as isobatas de 4 e 5m, próxima à entrada do canal de ligação com o setor sul da Lagoa da Conceição.



Figura 24 – fotografia da canoa canadense de fibra encontrada com o SDF e resgatada por mergulhadores.

A canoa foi resgatada por mergulhadores, reformada, e hoje é reutilizada para fins recreativos. Os próprios mergulhadores constataram no local do naufrágio que ela estava parcialmente soterrada devido à dinâmica sedimentar da lagoa. Podemos observar claramente na fotografia acima que a parte que ficou para fora do sedimento serviu de substrato onde micro-organismos se fixaram e desenvolveram.

Originalmente suas medidas de largura central é igual a 0,90 m, de comprimento é 4,12m e de altura é 0,50m (Fibras Caron, 2017). Medidas bem próximas das originais puderam ser estimadas através das imagens formadas pelo registro de intensidades acústicas. A Figura 25 apresenta as medidas: 0,98m de largura central (A); 4,05m de comprimento (B); e 0,55m de altura (C). Nas imagens o formato da canoa está bem delineado. Suas bordas verticais contribuem para que uma porção bem maior do sinal seja refletida de volta para os receptores. A rugosidade gerada pelos micro-organismos em sua superfície também contribui com o retroespalhamento do sinal acústico. Claramente podemos distinguir a espessura das bordas, entretanto, devido a sua pequena espessura ($<0,10\text{m}$), não foi possível mensurá-las no registro.

Apesar do formato estar bem delineado, não é possível distinguir visualmente os detalhes da proa e da popa da canoa na imagem. Na foto da Figura 24 podemos ver que a popa termina em um formato quadrado, enquanto que a proa termina em um formato pontiagudo. Apesar disso, na Figura 25,

ambas as extremidades da canoa terminam em um formato pontiagudo. Isto pode ter sido gerado pela angulação em que a canoa foi registrada em relação ao trajeto do SVL ou pelo “layover”.

Como um SVL não tem a capacidade de discriminar o ângulo de elevação, todos os retornos acústicos que apresentam a mesma distância são combinados. Deste modo, se a inclinação do fundo do mar na direção do corredor iluminado for mais acentuada do que a frente de onda em expansão, os retornos acústicos de dois ou mais pontos no fundo do mar serão manchados. Neste caso, o algoritmo de correção da distância inclinada (“slant range”) irá distorcer as características do fundo do mar para além do alvo. A importância do layover declina à medida que o alvo se afasta do sonar. Isso ocorre porque a frente de onda que se propaga, torna-se progressivamente mais plana, de modo que as inclinações inferiores são visualizadas corretamente. Este efeito é fortemente prejudicial no SDF, já que múltiplos ecos interferem ao mesmo tempo (Hughes Clarke 2013a).

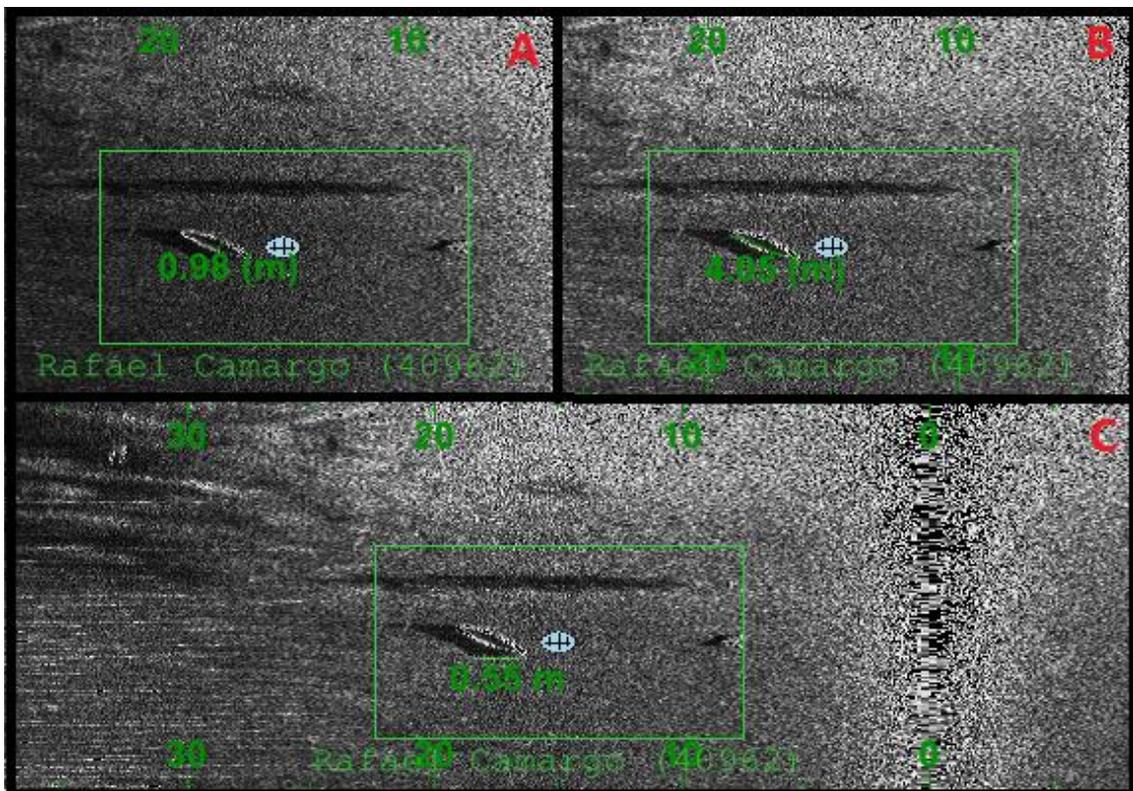


Figura 25 – Imagem do SVL evidenciando a canoa e suas medidas retiradas utilizando-se o software Caris. Quadro A: 0,98m de largura central. Quadro B: 4,05m de comprimento. Quadro C: 0,55m de altura.

O registro de amplitudes da Figura 26 mostra as reflexões das bordas da canoa. No decorrer do tempo de recepção, o primeiro pico de amplitude aparece quando a frente da onda emitida que toca na borda externa da canoa (seta verde) retorna para o receptor. Este é seguido por uma zona de baixa reflexão na parte interna da canoa, onde apenas ruídos são captados. Na sequência um segundo pico de amplitude aparece quando a frente da onda toca a borda interna da canoa (seta amarela), e logo em seguida aparece outra zona de baixa reflexão (linha branca) que dá origem a sombra da canoa na imagem. As reflexões sofrem um ligeiro aumento nas amplitudes quando a frente da onda, que é barrada pelas bordas da canoa, volta a tocar o fundo. Esta vantagem em produzir, simultaneamente, imagens de SVL com alta resolução agrega um valor inestimável ao SDF na detecção de objetos.

Os métodos de imageamento acústico frequentemente aumentam as chances da detecção de objetos, mais do que ecobatímetros utilizados sozinhos, uma vez que são capazes de delinear as sombras acústicas de maneira clara, indicando a presença de objetos sobre o fundo marinho. Além disso, eles propiciam a indicação de pequenos objetos que podem passar despercebidos por rotinas de detecção de fundo, utilizadas em MBES (Schmidt & Jerram 2015).

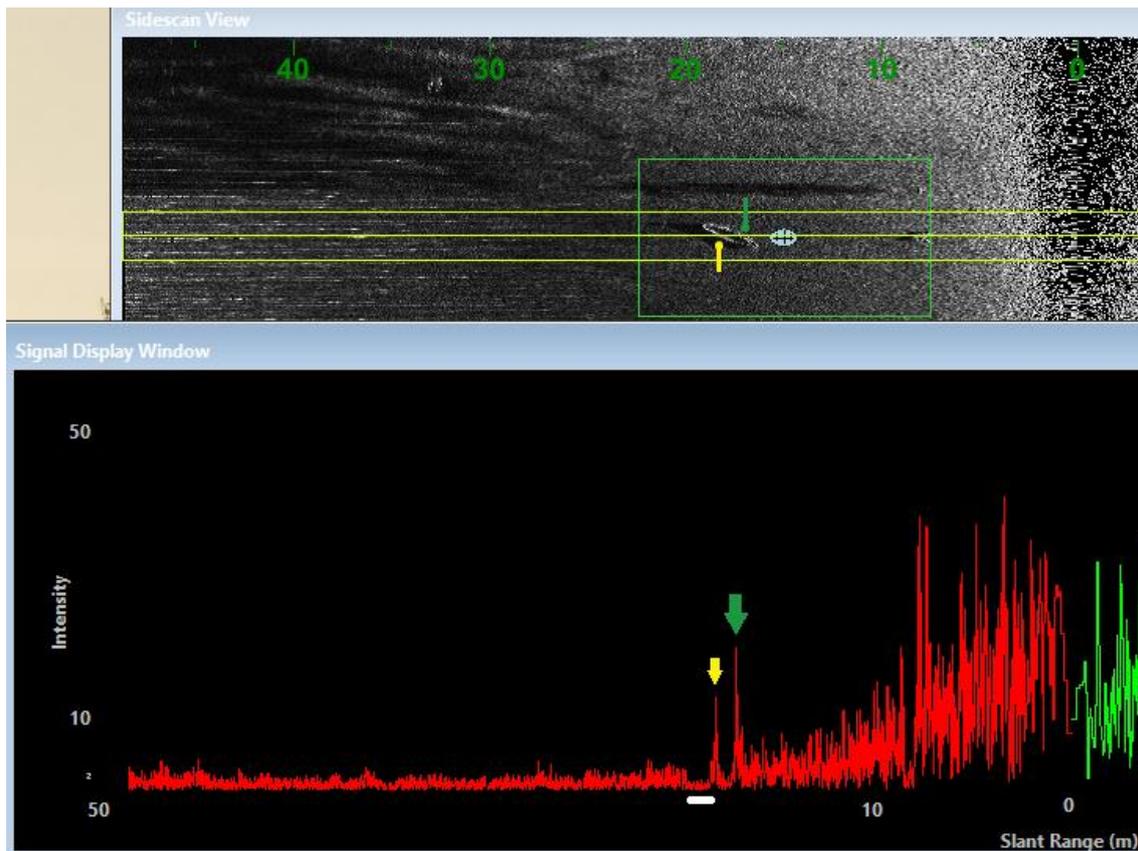


Figura 26 – Registro de amplitudes retirado com o software Caris, evidenciando a altas intensidades refletidas pelas bordas da canoa (setas verde e amarela), seguidas da zona de sombra acústica criada por elas (linha branca).

A Figura 27 divulga como a canoa apareceu nas varreduras batimétricas durante a aquisição de dados na linha 074. O trajeto da embarcação passa à cerca de 4m do alvo. Na imagem de SVL ao centro é possível identificá-la com clareza. Diferente da exemplificada na Figura 26, nesta a canoa está mais próxima do nadir. Como a composição da fibra de vidro é acusticamente diferente dos sedimentos que a circundam, a diferença de amplitudes recebidas pelo sistema permite que suas bordas sejam bem delineadas na imagem. A sombra, neste caso, é menor devido ao maior aspect ratio. Também é possível identificá-la nos dados batimétricos, mas não com tanta clareza quanto na imagem de SVL. Sua presença é perceptível (círculos amarelos), porém não podemos definir bem seus contornos ou bordas. Entretanto, um aspect ratio mais alto tende a aumentar a qualidade dos dados batimétricos. Além disso, ela se encontra na região em que a varredura sofre menor influência de ruídos.

Segundo Jerram & Schmidt (2015b), os SDF são capazes de estimar até cinco ângulos de retorno para sinais acústicos medidos em cada amostra de tempo. Entretanto, uma potencial ambiguidade no cálculo do ângulo pode acontecer devido à ampla gama de possíveis ângulos de retorno, à geometria do comprimento de onda e ao tamanho e espaçamento do arranjo de transdutores. A resolução destas medições angulares é da ordem de 0,01-0,1°. No entanto, a resolução angular não é equivalente à precisão da medição porque as estimativas dos ângulos SDF são degradadas por ruídos acústico e eletrônico.

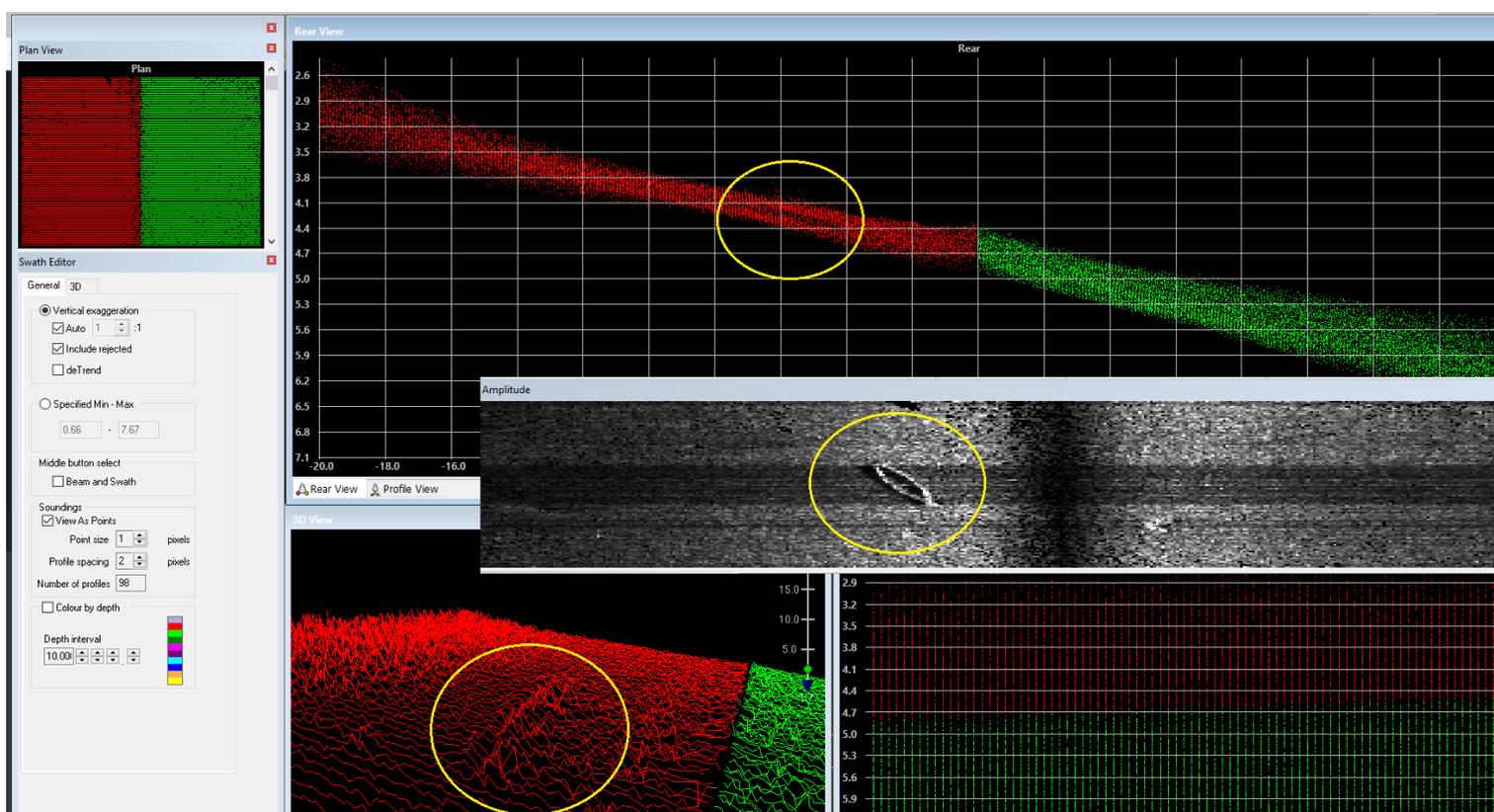


Figura 27 – Canoa representada pelas varreduras batimétrica da linha 074. A canoa está destacada pelos círculos amarelos. Quadro superior: pontos batimétricos das varreduras com visão traseira. Quadro central: Imagem do SVL. Quadro inferior: visualização 3D das varreduras exageradas verticalmente em 2 vezes.

Na linha exemplificada na Figura 27, o sistema foi capaz de calcular os ângulos de retorno para cada ponto da varredura sofrendo influências mínimas de ruídos, obtendo um detalhamento maior. Entretanto, os detalhes geométricos da proa e da popa também não puderam ser diferenciados.

A Figura 28 expõe a mesma canoa sondada em uma segunda linha (078, utilizada para medir a canoa e exemplificar as amplitudes), mais distante

que a primeira. Aqui ela aparece a 17m do nadir. Seus limites também estão bem definidos no registro de intensidades, porém, no registro batimétrico é impossível identificá-la. Como já citado, a diminuição do aspect ratio favorece sua identificação nas imagens de SVL, mas prejudica sua definição na superfície batimétrica. Apesar de aparecer mais alongada na imagem do que realmente é, sua sombra fica maior e auxilia em sua identificação e mensuração. Na varredura batimétrica ela desaparece na região onde o nível dos ruídos supera o seu retroespalhamento. Desta maneira, o sistema não foi capaz de definir os ângulos referentes às suas reflexões, mascarando-a entre a nuvem de pontos.

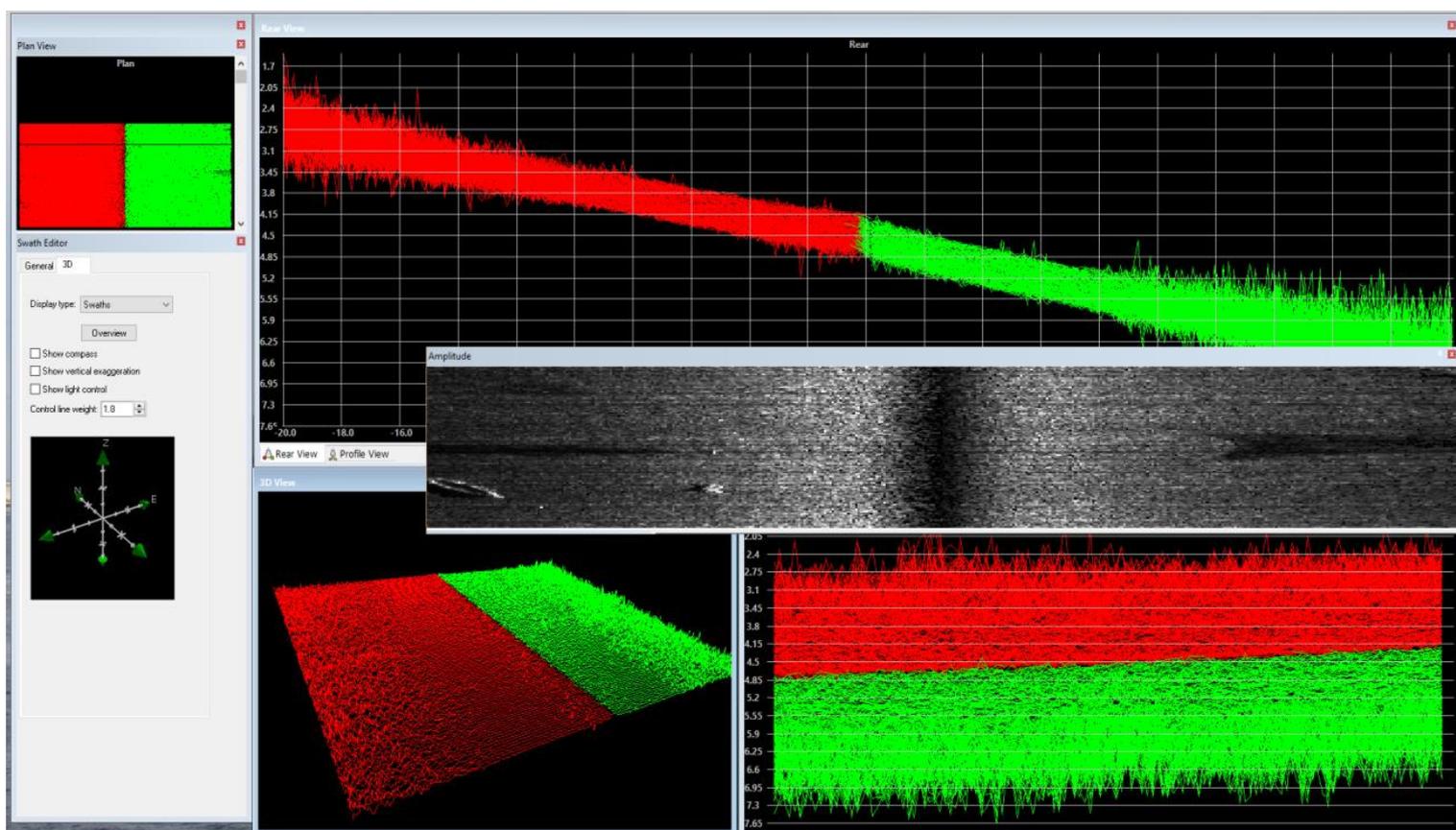


Figura 28 - Canoa representada pelas varreduras batimétrica da linha 078. Não é possível apontar onde a canoa aparece nos feixes externos. Quadro superior: varreduras batimétricas com visão traseira. Quadro central: Imagem do SVL. Quadro inferior: visualização 3D das varreduras exageradas verticalmente em 2 vezes.

Em águas rasas com até 20 m de profundidade, a geometria da varredura é geralmente um fator limitante. As varreduras mais longas proporcionadas pelos SDF e sistemas de MBES de emissor duplo são em grande parte frutos do aumento na razão sinal-ruído, que resulta da geometria de emissão de pulsos mais favorável às extremidades da varredura. No

entanto, para os SDF, como os erros na determinação dos ângulos de retorno são amplificados pelas distâncias cada vez maiores em uma longa varredura, a variância nas sondagens pode aumentar para além da capacidade de detectar objetos (Schmidt & Jerram 2015).

Nessa região da varredura, os cálculos realizados pelos SDF podem também sofrer severas degradações por efeitos de múltiplas acústicas ("multipath"). Esses efeitos começam a aparecer em regiões além dos 60° do nadir e dificultam ainda mais a detecção de objetos nos feixes mais externos da varredura. Além disso, quando operam com longas varreduras, todos os sonares são sensíveis a variações mal calculadas da velocidade de propagação do som, principalmente nas extremidades, que resultam em erros batimétricos gerados por refração (Schmidt & Jerram 2015).

Com a angulação total da varredura aproximando-se ou excedendo os 180°, a atenuação e a baixa amplitude do retroespalhamento, devido a ângulos de incidência rasante reduzidos, também se tornam fatores limitantes para que os cálculos nos feixes mais externos produzam dados batimétricos minimamente aceitáveis. O cálculo de pelo menos um ângulo para cada distância registrada não só aumenta a densidade de dados do SDF, em comparação com a dos MBES, como também aumenta o "ruído" aparente nas medições brutas dos SDF. Juntos, o aumento da densidade e da incerteza vertical dos dados brutos apresentam desafios para o processamento manual e avaliação da cobertura útil, ou eficaz, destes sistemas. Métodos para filtragem de dados baseados na binagem por distância ou ângulo tipicamente ajudam na redução da densidade de dados, remoção de outliers e redução da incerteza, mas essas etapas nem sempre são aplicadas de forma uniforme ou consistente por diferentes SDF (Jerram & Schmidt 2015b).

Os dados batimétricos coletados nessa área foram binados por distância. Uma varredura de 40 m foi formada por 400 pegadas de 0,10m. Como cada pegada é representado por um valor de profundidade, para cada 1 metro across-track temos 10 pontos batimétricos. Esses valores foram posteriormente usados pelo software para gerar superfícies com grids variados através da ferramenta estatística CUBE.

Os SDF que reduzem o volume de dados e a incerteza, binando e calculando as médias dos dados batimétricos para cada tiro, atingem com maior facilidade os requisitos mínimos estabelecidos pela OHI (Schmidt & Jerram 2015).

Apesar da sua comprovada eficiência, alguns cuidados devem ser tomados ao gerar superfícies com o CUBE, pois alguns alvos podem ser descaracterizados. Alguns dados batimétricos de SDF podem ter seus valores reduzidos pela metade. Parte deste efeito é devido a gridagem dos dados em uma célula maior que a metade do diâmetro do alvo (Gostnell et al. 2007; Nyquist 1928).

Podemos observar na Figura 29 a presença da canoa. A superfície batimétrica foi concebida em grids de 0,15 x 0,15m. Apenas os dados da linha 074 foram utilizados nesta superfície. Nitidamente o SDF foi capaz de resolver as angulações de suas reflexões acústicas e a canoa foi bem representada na superfície. Tanto sua resolução espacial quanto a vertical se mostraram suficientes.

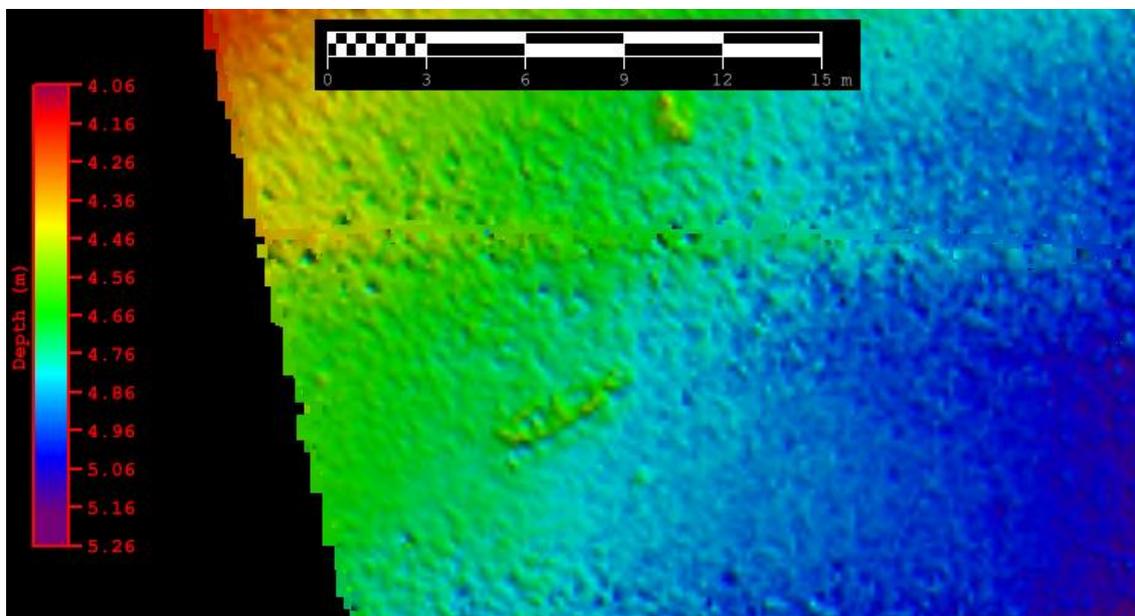


Figura 29 - superfície batimétrica foi gerada por grids de 0,15 x 0,15m, destacando a canoa. Apenas os dados da linha 074 foram utilizados nesta superfície. Escala de profundidade varia de 4,06m a 5,26m. Escala de distância de 15m.

O tamanho do grid utilizado se mostrou eficiente quanto ao balanço entre boa definição do alvo e supressão de ruídos.

Para a superfície exposta abaixo (Figura 30), apenas a linha 078 foi utilizada para gerar uma superfície batimétrica com o mesmo grid da figura anterior. O exemplo demonstrado na Figura 28, aqui aparece em uma superfície batimétrica. Devido à geometria da varredura, a resolução batimétrica e das imagens melhora gradativamente ao longo da varredura (across-track) com o aumento da distância, desde o nadir (baixa resolução) até os feixes externos (alta resolução) (Jerram & Schmidt 2015b).

Entretanto, a canoa, posicionada na parte externa das varreduras, some completamente em meio aos ruídos que nessa região são mais evidentes. Diminuir o tamanho dos grids ou gridar as menores profundidades (shoal) na tentativa de fazer com que a canoa reapareça apenas faz com que os ruídos sejam ainda mais ressaltados.

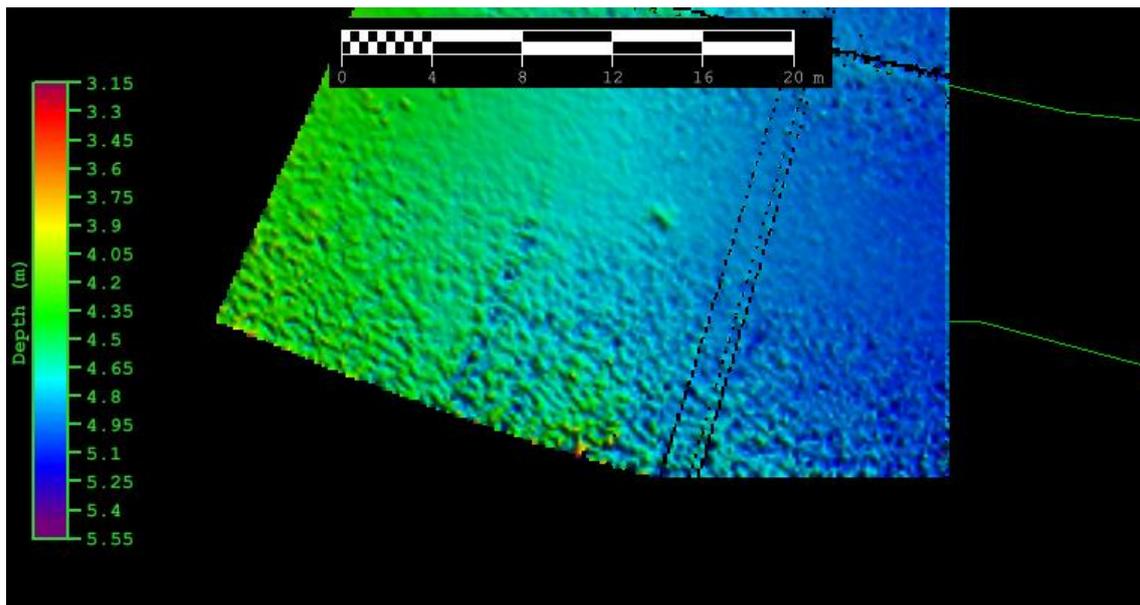


Figura 30 - superfície batimétrica foi gerada por grids de 0,15 x 0,15m. A canoa não pode ser identificada nos feixes externos. Apenas os dados da linha 078 foram utilizados nesta superfície. Escala de profundidade varia de 3,15m a 5,55m. Escala de distância de 20m.

Ao gerarmos um grid com os mesmos 0,15 x 0,15m da sobreposição entre as linhas 074 e 078, a canoa, que era muito bem visível em uma, acaba por sofrer severas degradações quando os dados são mesclados com a outra linha (Figura 31). Podemos determinar onde ela está posicionada, mas com dificuldade. Este fato ressalta a necessidade de se observar linhas separadas quando se tem como objetivo localizar pequenos objetos, uma vez que a

qualidade muda consideravelmente de uma linha para outra. Uma alternativa seria limitar o tamanho da varredura para que os ruídos causem o menor dos danos. No entanto isto geraria um aumento de tempo e custos na operação.

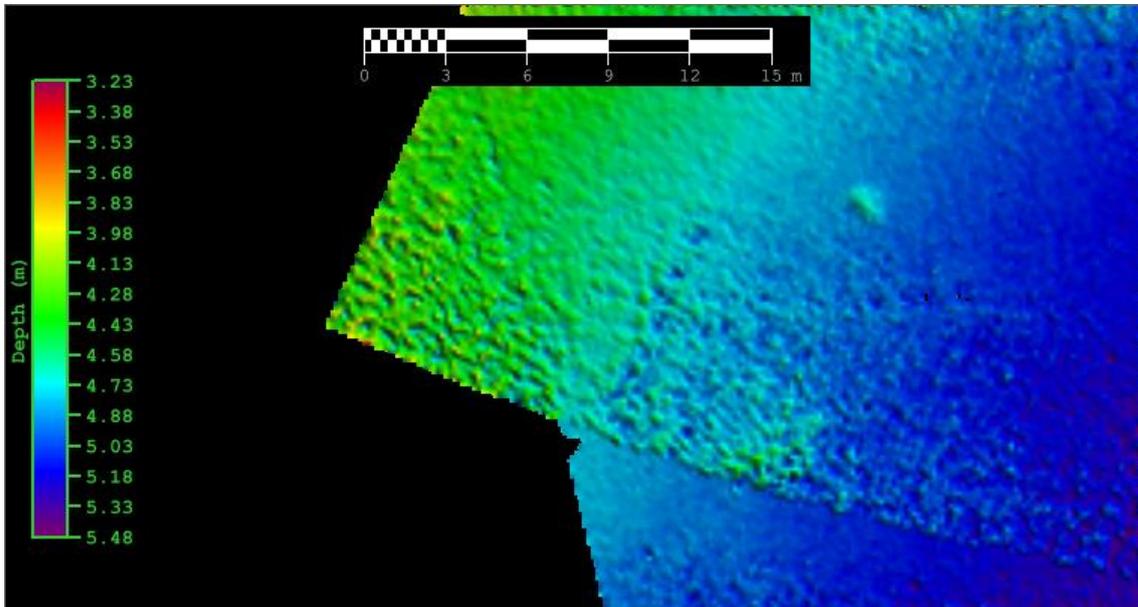


Figura 31 - superfície batimétrica gerada por grids de 0,15 x 0,15m, com os dados das linhas 074 e 078. Escala de profundidade varia de 3,23m a 5,48m. Escala de distância de 15m.

Quando várias varreduras são combinadas em uma única superfície, a combinação dos erros, especialmente nas sobreposições de áreas mais externas da varredura, pode dificultar significativamente a detecção de objetos. No entanto, em uma única linha observada separadamente, esses erros têm pouco efeito negativo na detecção de objetos (Schmidt & Jerram 2015).

Pockmarcks

As Pockmarcks são depressões no leito marinho formadas através da migração e expulsão de acumulações rasas de gás em sedimentos (Hovland & Judd 1988). Geralmente forma-se primeiro uma, posteriormente passando para um conjunto de pockmarcks, podendo evoluir para uma superfície totalmente perturbada (Harrington 1995). Porpilho et al. (2014) confirmou a presença de acumulações rasas de gás junto às pockmarcks encontradas na Lagoa da Conceição através do cruzamento de dados sísmicos e imagens de SVL. Segundo o autor, as feições apresentam diâmetros que variam de 0,5 a 1m, ocorrendo em profundidades entre 1–6m.

Na Figura 32 podemos visualizar em uma superfície batimétrica 3D a distribuição das pockmarcks pelo fundo da lagoa. A superfície foi construída com grids de 0,30 x 0,30m. Apesar de alguns ruídos estarem presentes, elas se destacam bem pela superfície. É possível evidenciar que, tanto o diâmetro quanto a profundidade das depressões variam. As maiores e mais profunda apresentam uma cor mais escura em sua depressão. As menores e menos profundas apresentam cores similares as da superfície, mas mesmo assim ainda são passíveis de ser visualmente identificadas.

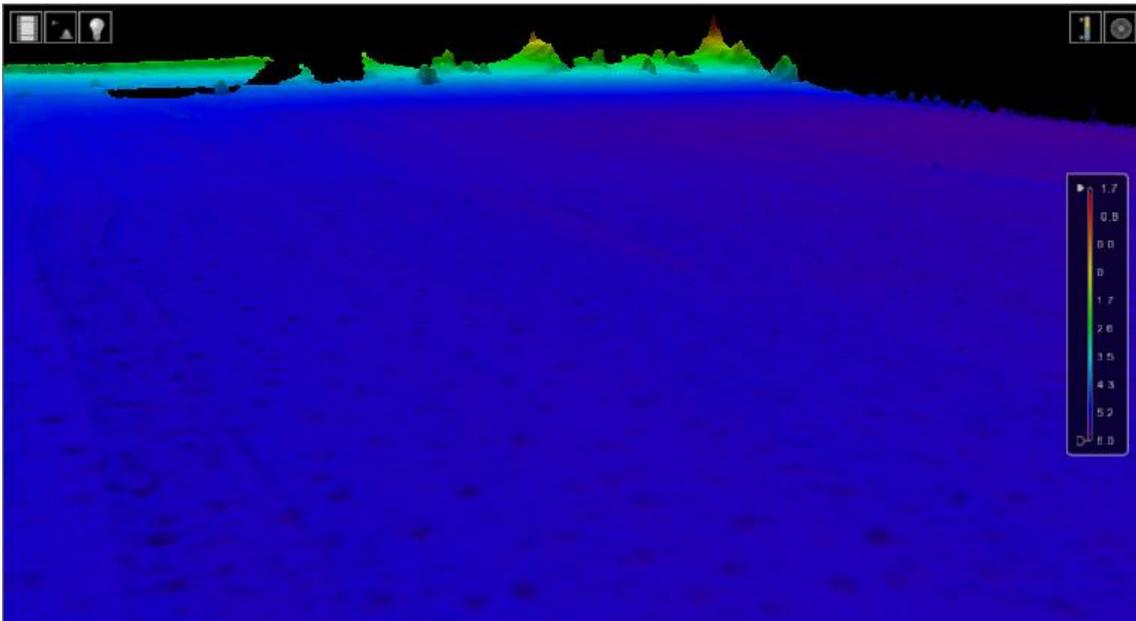


Figura 32 - superfície batimétrica 3D demonstrando a distribuição das pockmarcks pelo fundo da Lagoa da Conceição. A superfície foi construída com grids de 0,30 x 0,30m.

As menores pockmarcks visualmente perceptíveis somente foram identificadas por intermédio da coleta de dados simultâneas de SVL, enaltecendo ainda mais as vantagens que os SDF trazem para a identificação de objetos. A Figura 33 demonstra os locais onde as pockmarcks foram identificadas e mensuradas. Na parte de cima vemos dois perfis sobre as pockmarcks, registradas na superfície batimétrica, e na parte de baixo vemos os mesmos perfis sobre as pockmarcks registradas na imagem de SVL. A acentuação na declividade do fundo influenciou a escolha do local, pois esta variação altera o ângulo de incidência do sinal acústico e favorece a formação das sombras dentro das depressões, facilitando assim sua identificação.

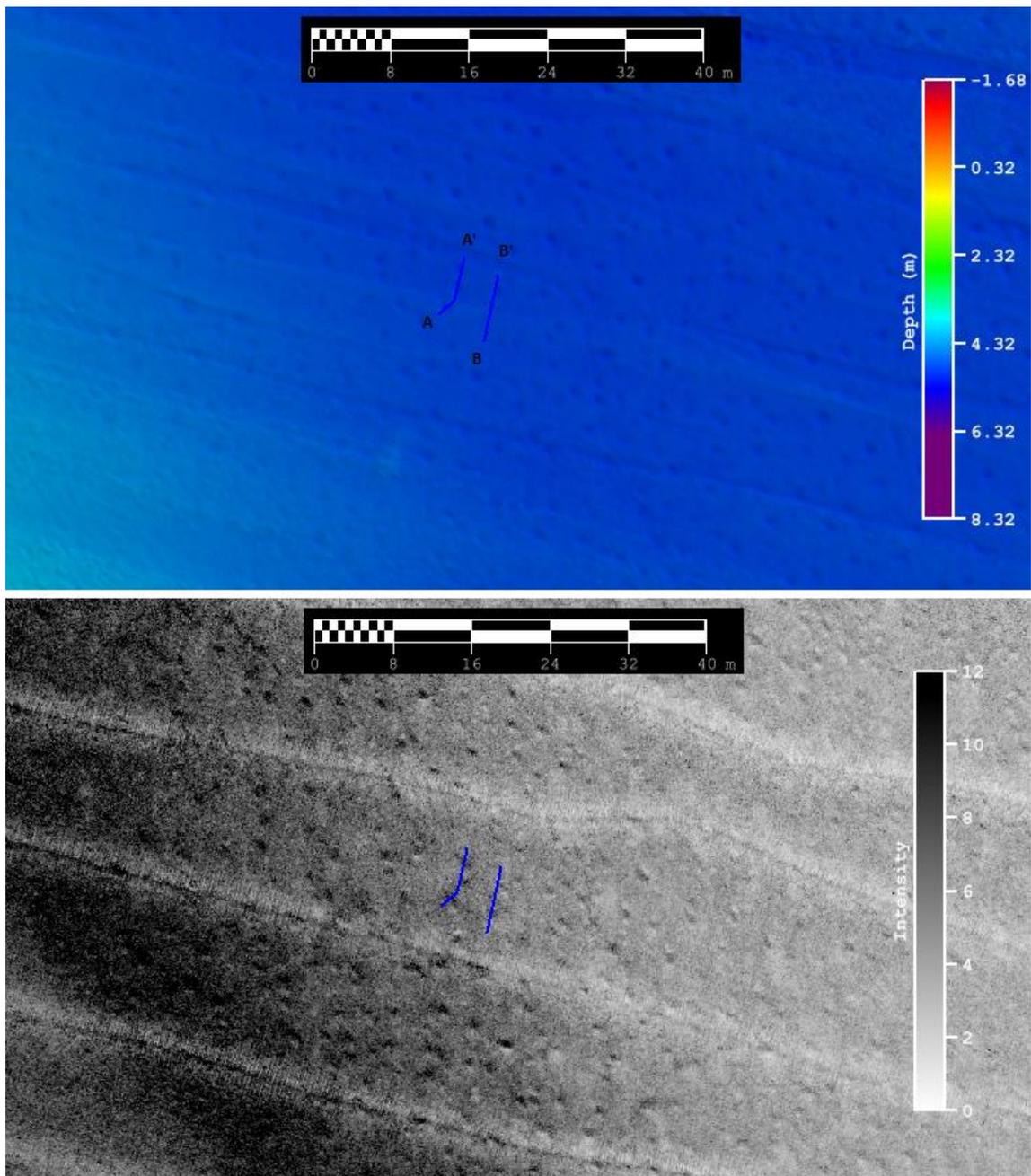


Figura 33 – Localização dos perfis AA' e BB' sobre as pockmarcks em uma superfície batimétrica (superior) e em um mosaico de intensidades. Escala de distância de 40m.

Os perfis retirados podem ser observados abaixo (Figura 34). As medidas corroboram com as citadas por Porpilho et al. (2014). No perfil “A” três pockmarcks foram mensuradas, apresentaram diâmetros variando entre 1 e 1,5m, enquanto que os desníveis verticais variaram entre 0,08 e 0,10m. No perfil “B” quatro pockmarcks foram mensuradas, os diâmetros variaram entre 0,5 e 1,5m, enquanto que os desníveis verticais variam entre 0,03 e 0,08m. A menor feição resolvida pelo SDF apresentou 0,50m de diâmetro e 0,03m de

desnível vertical (círculo vermelho). Este fato demonstra a capacidade do SDF em identificar pequenas feições (<1m³) como as observadas por Wright & Brisson (2011).

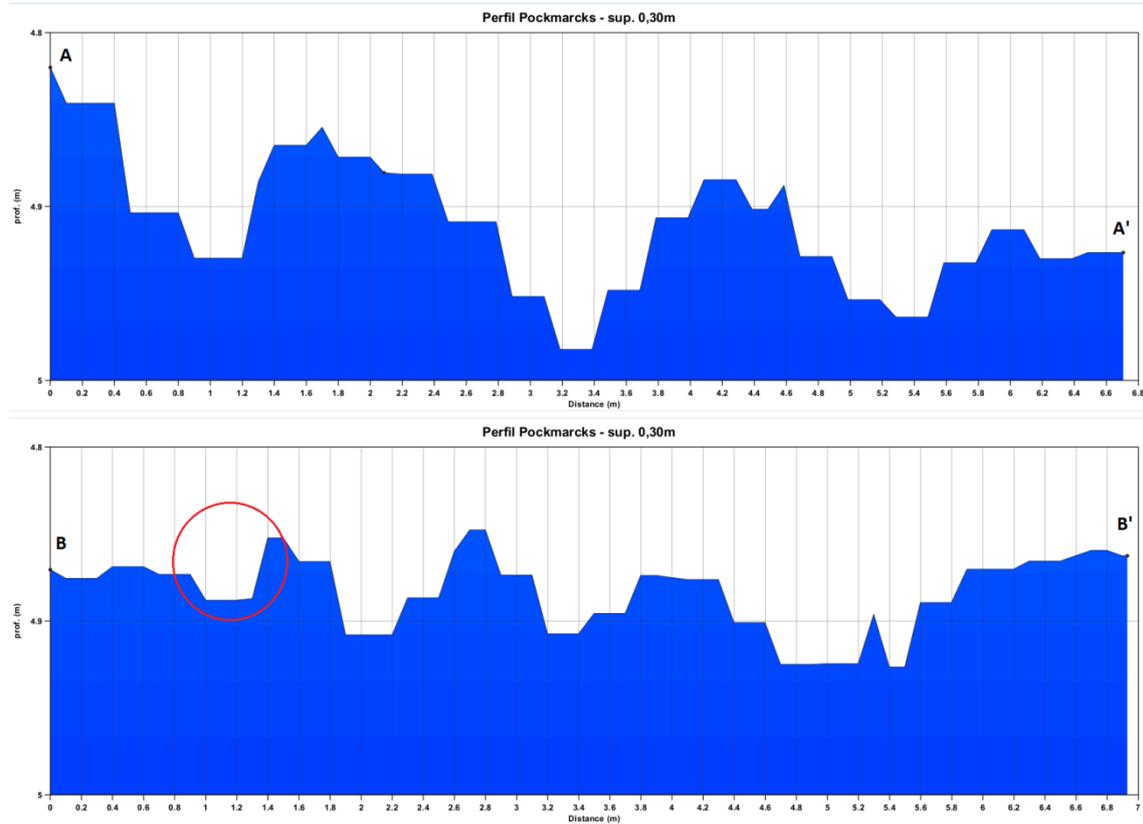


Figura 34 – Perfis AA' (superior) e BB' (inferior) mensurando algumas pockmarcks presentes na Lagoa da Conceição. Eixos profundidade x distância em metros. Circulo vermelho destaca a menor pockmarck encontrada.

6.2.2 - Limitações

A área sondada, como pode ser observado na Figura 7, localiza-se em frente à Avenida das Rendeiras. Dentro da área sondada existe um setor onde sedimentos são acumulados e, conseqüentemente, as menores profundidades aparecem. Neste setor o sistema sofreu deformações em suas varreduras, principalmente nos feixes mais externos. Devido à pequena distância entre o sensor e o fundo, e um ângulo de incidência rasante diminuto, a recepção do sinal enviado em uma direção quase horizontal para os feixes externos torna-se complexa. A razão sinal ruído elevada aliada a múltiplas reflexões do sinal na interface ar-água geraram resultados como o exemplificado no perfil da Figura 35.

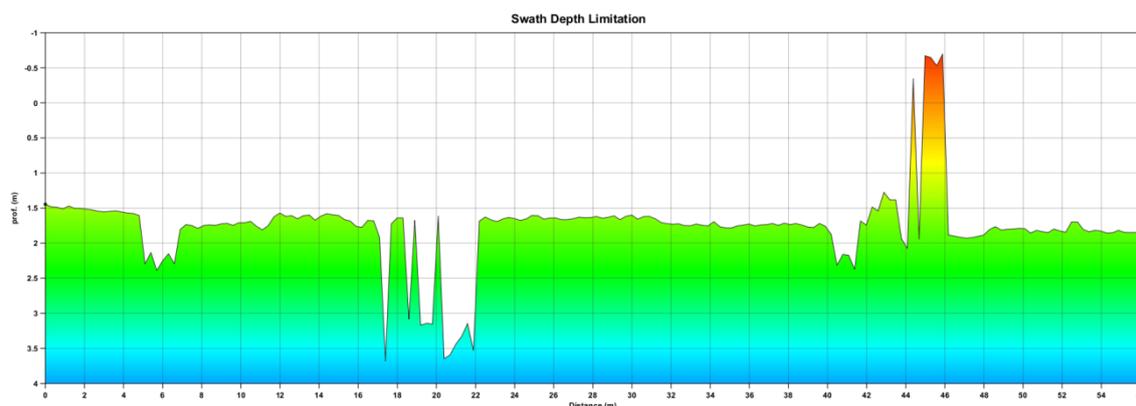


Figura 35 – Perfil que exemplifica as deformações dos feixes externos apresentadas pelas varreduras, durante o levantamento das áreas mais rasas da Lagoa da Conceição. Eixos profundidade x distância em metros.

O perfil foi retirado de uma superfície de grid 0,30 x 0,30 cm, em um dos pontos mais rasos. As extremidades da varredura sofrem severas elevações e depressões, que não são condizentes com a realidade do local. As elevações têm 2m de altura, chegando a ultrapassar o limite da superfície, o que evidencia sua inexistência. As depressões apresentaram as mesmas proporções que as elevações.

Essas alterações começam a aparecer em profundidades de 3m, e vão aumentando conforme a profundidade diminui. Na profundidade exemplificada no perfil, descontando-se o draft de 1m, o sensor trabalha a uma distância de

0,50m do fundo da lagoa. Com o tamanho total da varredura atingindo 40m, temos uma cobertura equivalente a 80 vezes a profundidade. Esta cobertura vai muito além da capacidade especificada pelo fabricante de até 12 vezes a profundidade. Mesmo com grande proximidade do fundo, existe um setor considerável da varredura que não sofre variações (em torno de 10m para cada lado), entre as extremidades, o que equivale a uma varredura de 40x a profundidade. Para situações tão extremas o SDF se saiu bem. Como os MBES operam normalmente com varreduras equivalentes a 4x a profundidade, em uma profundidade similar a observada, a 0,50m do fundo, coletaria dados em uma varredura de 2m. Em outros pontos da superfície que também sofreram anomalias nas extremidades da varredura, a gridagem feita pelo CUBE resolveu o problema, eliminando todos os outliers.

O problema a se enfrentar nessas situações está em manter uma varredura ampla, diminuindo o tempo de coleta e gastando bastante tempo processando os dados, ou diminuir consideravelmente a varredura e passar mais tempo coletando dados em campo e menos tempo processando. Segundo Hiller (2011), o grande gargalo dos SDF está na grande quantidade de tempo gasta no processamento devido à grande densidade de dados gerada pelo sistema. Os dados produzidos podem ser difíceis de manusear. As vantagens no campo são compensadas por problemas de processamento, especialmente quando se usam ferramentas de pós-processamento projetadas para MBES.

Na Figura 36, podemos observar em uma superfície batimétrica 3D o que as tais deformações causam na superfície. Elas persistem por toda a área de baixa profundidade e se orientam na mesma direção das linhas de navegação.

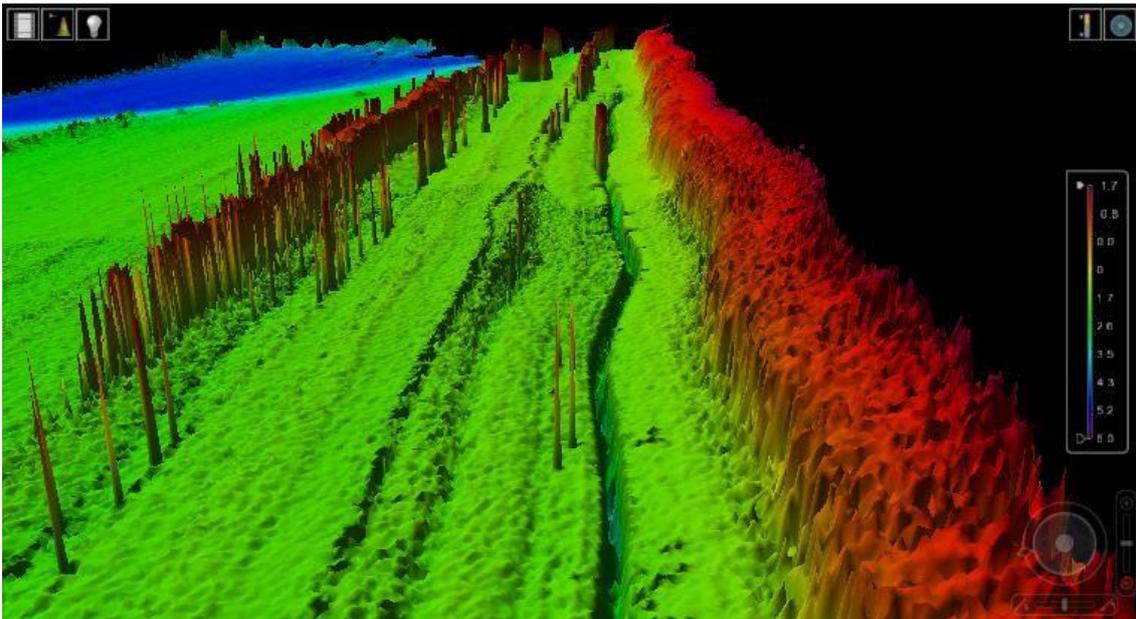


Figura 36 – Superfície batimétrica em 3D demonstrando como as deformações sofridas pelos feixes externos nas áreas mais rasas da Lagoa da Conceição distorcem a superfície batimétrica.

A Figura 37 representa uma parte dos registros batimétricos de uma linha de navegação que passa pelo local onde o perfil acima foi retirado. Cada varredura é composta por 400 pontos. Quando todos são vistos na mesma direção da linha de navegação (gráfico superior), é possível notar como suas extremidades sofrem modificações. A extremidade direita das varreduras eleva-se, enquanto que a extremidade esquerda declina-se. Segundo Hughes Clarke (2003), este efeito é causado pela refração em ambientes onde existe estratificação na coluna d'água e é sentido principalmente pelo feixes mais externos.

Os SDF produzem até uma ordem de magnitude a mais de pontos batimétricos sobre uma determinada distância no across-track, quando comparados com os MBES, não há controle sobre a distribuição angular ou densidade de pontos ao longo da varredura. A região nadir é de particular importância a este respeito, lembrando que o nadir também é deformado por ruídos. Ao contrário dos sistemas MBES, os SDF utilizam, originalmente, dois arranjos de transdutores separados, apontados para boreste e bombordo. A região do nadir está localizada entre os limites interiores da visão angular de cada arranjo. Este design, unido a geometria da interseção entre o espalhamento esférico da onda e o fundo plano próximo ao nadir, tipicamente

resulta em uma baixa densidade de pontos no across-track perto do nadir. A densidade de pontos perto do nadir deve ser levada em consideração quando se tenta aumentar a eficiência do levantamento aumentando o espaçamento entre linhas e diminuindo a sobreposição de varreduras para menos da metade.

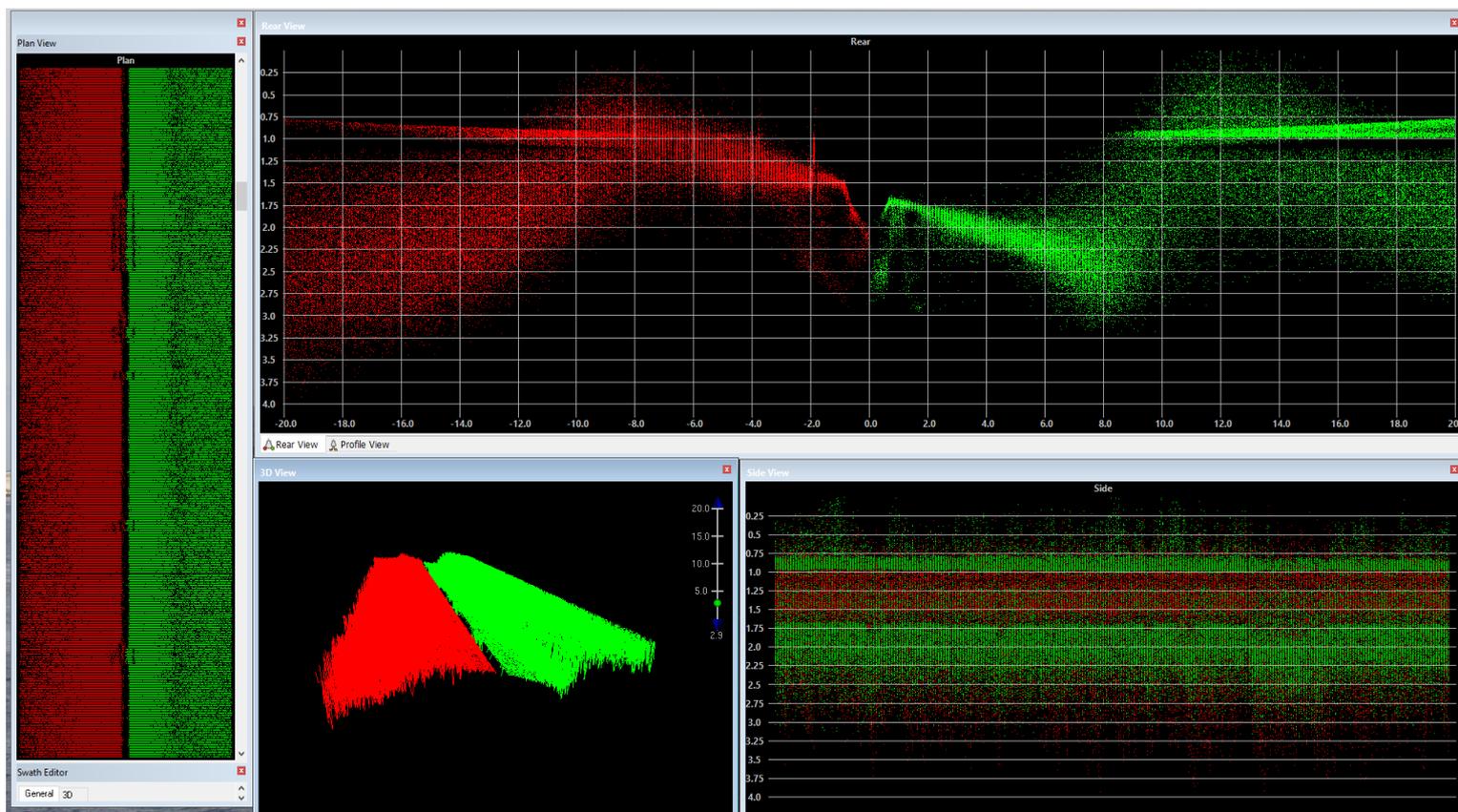


Figura 37 – Quadro superior: visão traseira da nuvem de pontos formada por um setor com diversas varreduras, destacando como suas extremidades são distorcidas. Quadro inferior: visualização 3D das varreduras com suas extremidades distorcidas, exagerada verticalmente em 2,9 vezes.

Como na Ponta das Aranhas, os ruídos também foram mensurados extraíndo perfis de uma superfície batimétrica com 100% de cobertura. A superfície foi gerada com o CUBE e gridada em 0,20m. Os perfis extraídos exibem uma informação a cada 0,05m. A escolha dos locais contempla duas profundidades diferentes e o tamanho de cada perfil foi determinado de modo a representar a região onde a metade interna (menos ruidosa) de um dos lados da varredura une-se a metade externa (mais ruidosa) de um dos lados da varredura pertencente a linha ao lado. A direção dos perfis foi escolhida de modo evitar a amostragem dos ruídos de menor frequência gerados pela

movimentação da embarcação (Figura 38).

O perfil 01, mais fundo, está localizado no campo de pockmarcks e na profundidade de 5m. Neste perfil, os ruídos variam pouco e não ultrapassam os 0,05m de altura. As maiores variações associam-se a seção de pockmarcks amostradas pelo perfil. É nessa região que os dados referentes às reflexões do nadir em uma linha mesclam-se com os dados referentes aos feixes externos da outra. Como as incertezas nessas regiões da varredura são maiores, os ruídos presentes ali também serão. Neste caso, sua pequena variância não trouxe problemas para a detecção de pequenos objetos.

O perfil 02 está localizado na porção mais rasa da área, sobre o banco de areia, em profundidades em torno de 2,30m. Diferentemente do perfil 01, uma porção bem maior dos ruídos passa de 0,05 m, variando bastante ao longo de todo o perfil. Neste caso, este aumento está relacionado com a grande proximidade do SDF com o fundo, que leva a um aumento significativo na razão sinal ruído e a uma redução na atenuação do pulso acústico.

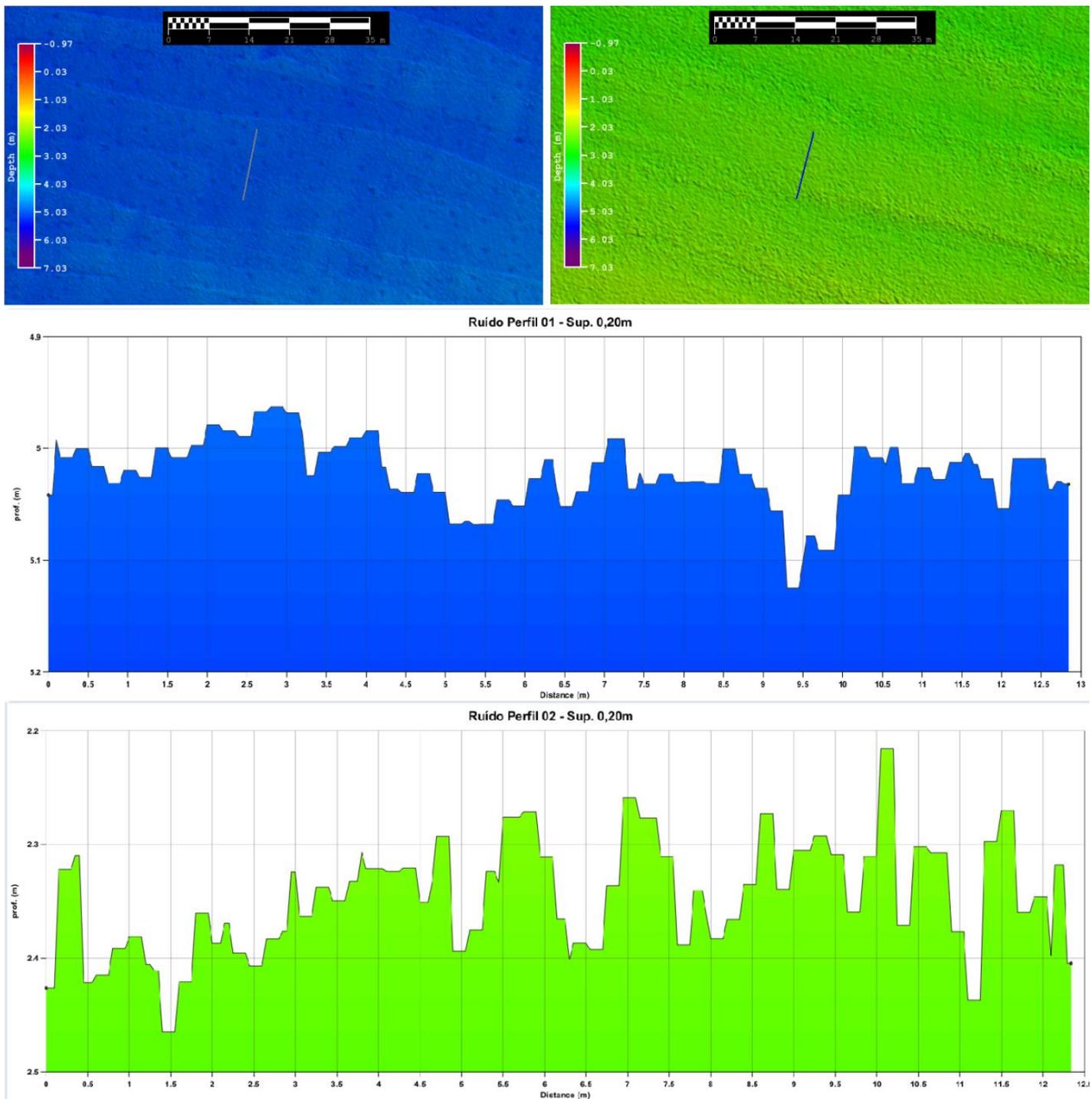


Figura 38 - Perfis de mensuração dos ruídos presentes na superfícies batimétricas. Quadro esquerdo: localização do perfil 01 (superior) sobre a superfície. Quadro direito: localização do perfil 02 (inferior) sobre a superfície. Escalas de profundidade variam de -0,97m a 7,03m. Escalas de distância de 35m. Eixos profundidade x distância em metros.

Na Figura 39 podemos observar o que acontece quando duas linhas paralelas da Lagoa da Conceição são gridadas juntas. Em “A” temos uma superfície batimétrica que vai das áreas mais profundas, repletas de

pockmarcks, às áreas mais rasa, sobre o banco de areia. Metade da varredura referente a cada uma das duas linhas de sondagem se sobrepuseram em 100% de cobertura na parte central da superfície. As varreduras têm tamanho total de 40m e as linhas de navegação estão separadas por 20m. Além do nadir, as extremidades da superfície (não sobrepostas) apresentam nítidos ruídos, que se intensificam com a diminuição da profundidade. Na parte central, apenas nas partes onde os feixes externos mesclam-se com o nadir, o ruído tornou-se mais aparente. Na Lagoa da Conceição, os efeitos gerados pelas movimentações da embarcação são mínimos e operam dentro da capacidade de detecção e correção do sensor de movimentos.

O quadro “B” demonstra a distribuição da densidade de dados batimétricos. Pode-se observar que, neste caso, as densidades estão uniformemente distribuídas ao longo de toda varredura. Onde os feixes se sobrepõem, elas apresentam uma densidade maior, porém com a mesma uniformidade apresentada pelos setores não sobrepostos. Apenas algumas diferenças na distribuição dos pontos são perceptíveis por causa das variações na direção da trajetória da embarcação. As densidades podem variar de uma medição para uma pegada à até 68 medições para uma pegada.

O quadro “C” demonstra os valores de desvio padrão para as medições batimétricas que compõem a superfície. Naturalmente seu valor aumenta com o aumento da distância do nadir. É possível observar com clareza essa característica nos setores onde não há sobreposição. No setor central, fica claro que a sobreposição gera um aumento nos valores de desvio padrão, principalmente onde as extremidades de cada varredura unem-se ao nadir, como foi observado anteriormente na região da Ponta das Aranhas.

No quadro “D” podemos observar a distribuição das incertezas. Elas apresentam comportamento similar ao desvio padrão, com seus valores aumentando com o aumento da distância do nadir, no entanto sua escala de variação é bem menor, variando de 0,10 a 0,11m. Seus valores apresentam também um ligeiro aumento no setor sobreposto.

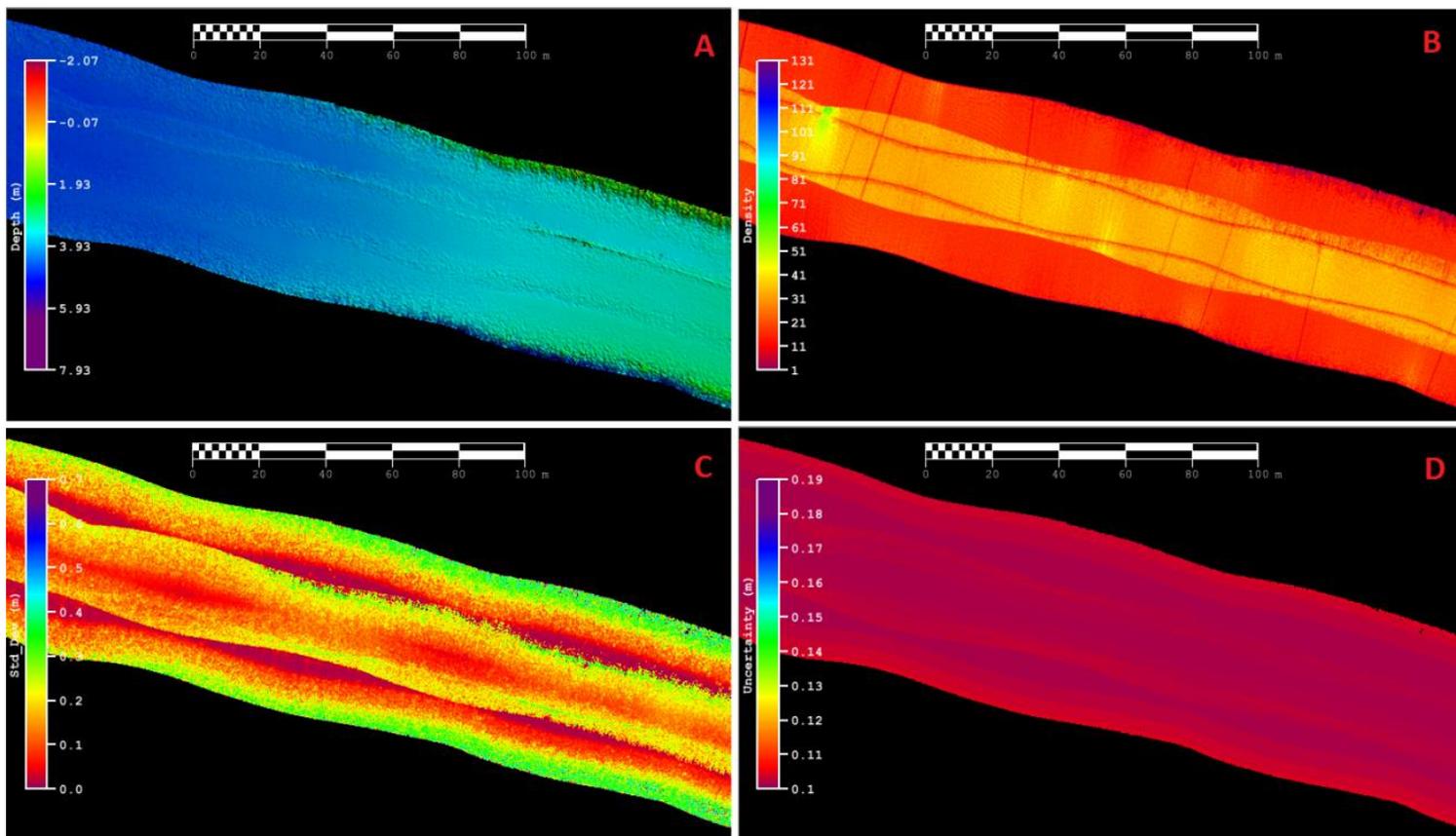


Figura 39 - Superfícies geradas pela união entre duas linhas da Lagoa da Conceição. Quadro A: superfície batimétrica (m). Quadro B: superfície de densidade. Quadro C: superfície de desvio padrão (m). Quadro D: superfície de incerteza (m). Escala de distância de 100m.

6.3 - Canal da Barra da Lagoa

6.3.1 - Identificação de Alvos

Por ser estreito, o Canal da Barra da Lagoa foi sondado apenas por duas linhas, navegadas para jusante e para montante. Por conta disso as linhas se sobrepuseram em quase todo o trecho. Apenas uma parte dos feixes externos não apresenta sobreposição. Os dados foram binados por distância, com 400 pegadas de 0,10m cada, gerando uma varredura de 40m.

Os menores alvos detectados pelo SDF foram rochas pequenas dispostas sobre o leito. Algumas fazem parte da estrutura dos molhes, enquanto outras foram depositadas por processos naturais. Todas podem ser

visualizadas na superfície batimétrica abaixo gridada em 0,20m (Figura 40). Em seguida temos os perfis com as dimensões de cada uma delas (Figura 41).

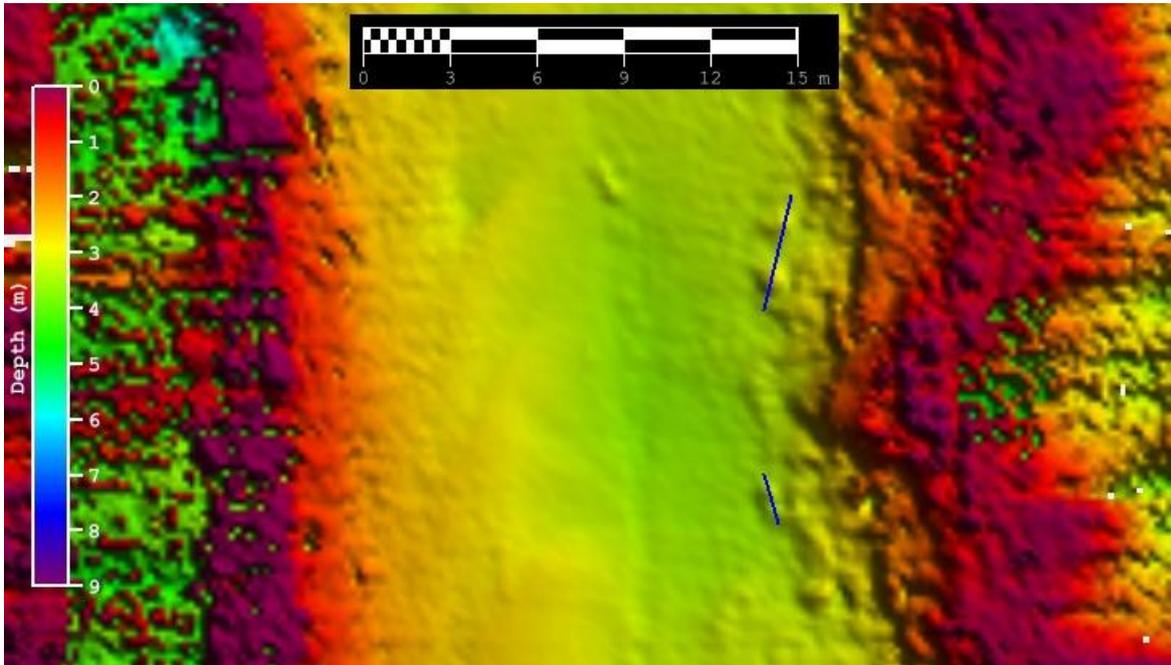
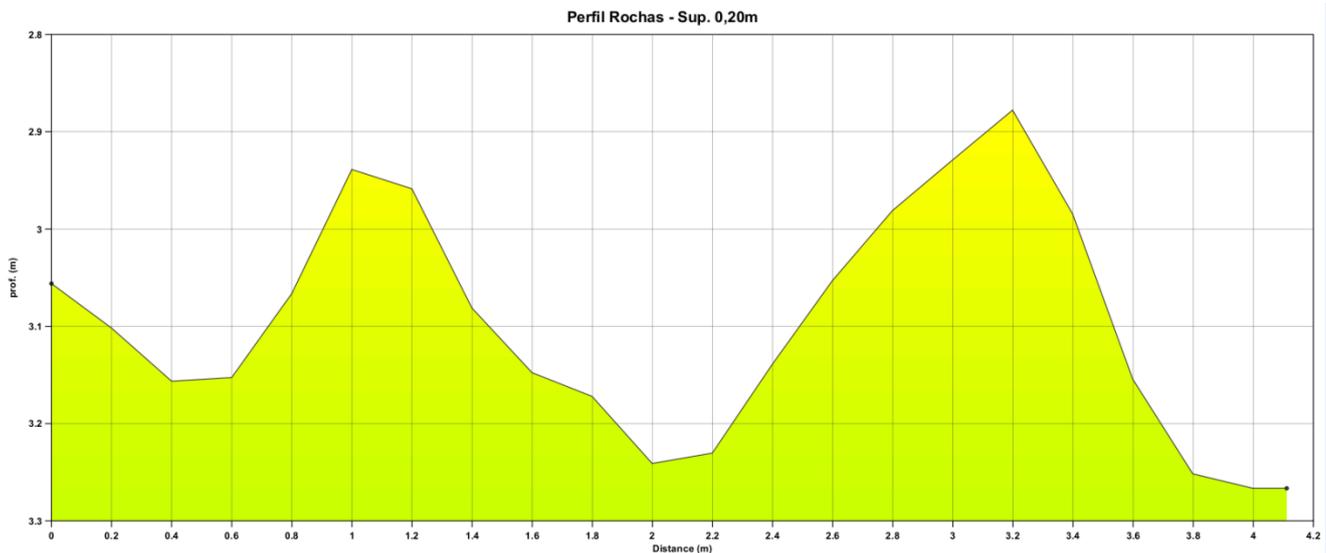


Figura 40 – Superfície batimétrica identificando os menores alvos detectados pelo SDF no Canal da Barra da Lagoa, assim como os perfis amostrados sobre os alvos. Escala de profundidades varia de 0m a 9m. Escala de distância de 15m.



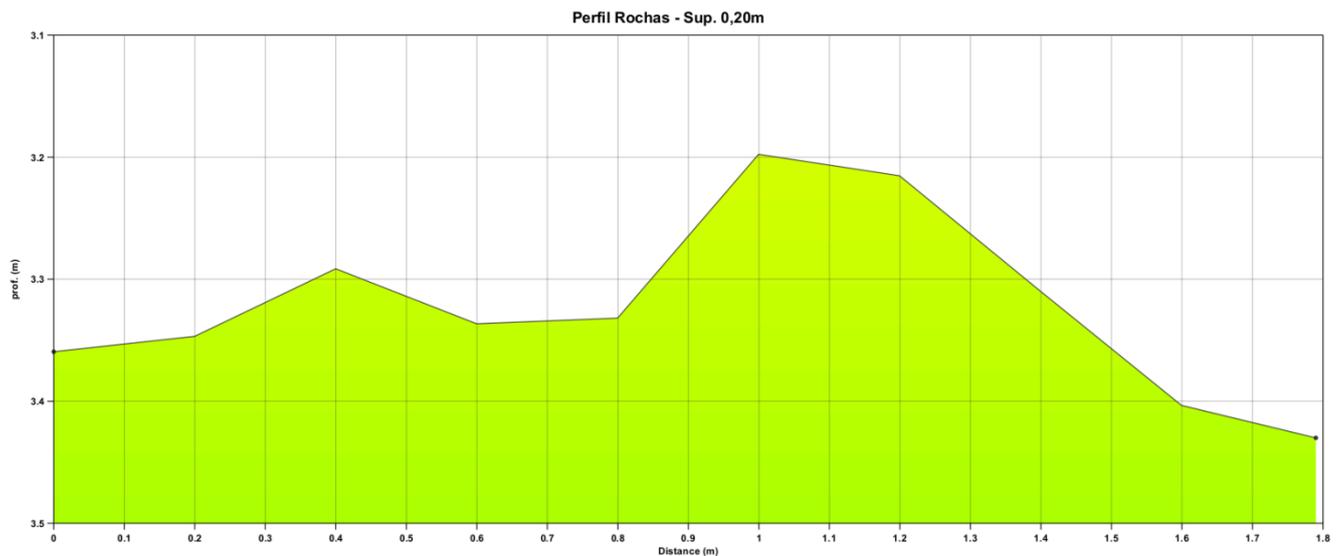


Figura 41 – Perfis superior e inferior amostrados na superfície batimétrica, mensurando os menores alvos encontrados no Canal da Barra da Lagoa. O perfil inferior destaca o menor alvo encontrado entre eles. Eixos profundidade e distância em metros.

Todas se encontram nas proximidades de 3m de profundidade, justamente no setor da varredura onde os ruídos não influenciam tanto no cálculo dos ângulos. A menor das duas rochas possui 1m de diâmetro e 0,20m de altura no perfil A e 0,40m de diâmetro e 0,05m de altura no perfil B.

O SDF só foi capaz de registrar essas rochas porque elas se encontram mais isoladas. No registro do SVL abaixo (Figura 42) podemos observar que, além das amostradas acima (círculos vermelhos), inúmeras rochas estão presentes. Os tamanhos variam e podemos observar claramente que rochas ainda menores também aparecem. Entretanto, o SDF não é capaz de diferenciá-las em um amontoado de tamanhos distintos. Os ruídos que são embutidos nos cálculos de fase geram uma nuvem de pontos com ângulos variados. Quando a superfície batimétrica é criada, as feições acabam se juntando em uma só de formato irregular.

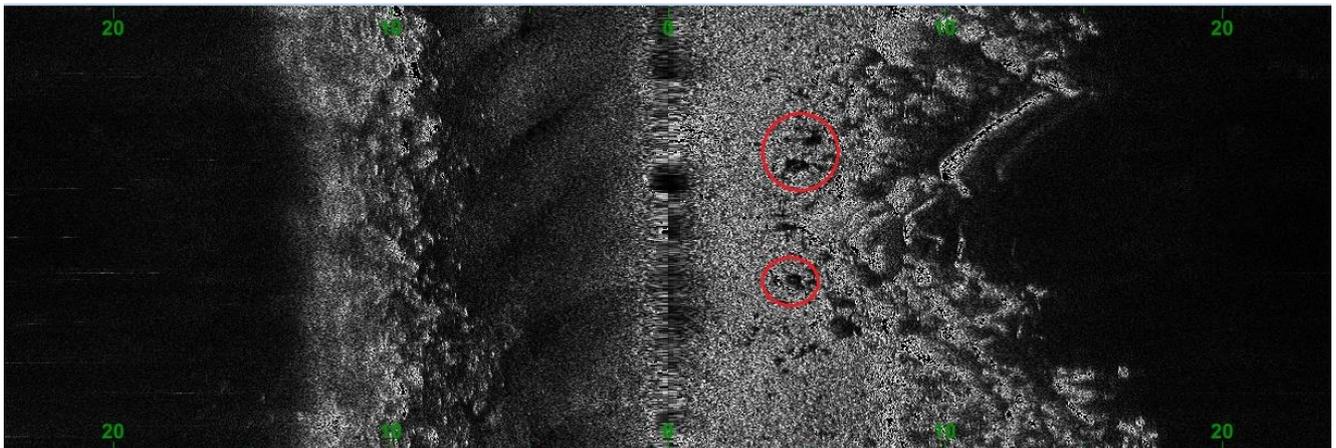


Figura 42 – imagem do SVL demonstrando as características do Canal, destacando os alvos encontrados na superfície batimétrica (círculos vermelho).

A Figura 43 mostra outro alvo identificado pelo SDF, tanto na superfície batimétrica, quanto na imagem de SVL. Ele foi localizado na entrada do canal e encontra-se levemente declinado sobre o leito. O que chama atenção é sua forma delgada (quadrado vermelho). Suas medidas foram retiradas através de perfis coletados na superfície batimétrica gridada em 0,20m. Seu comprimento é de 7,5m e sua largura é de 0,80m. A altura varia entre 0,30 e 0,40m.

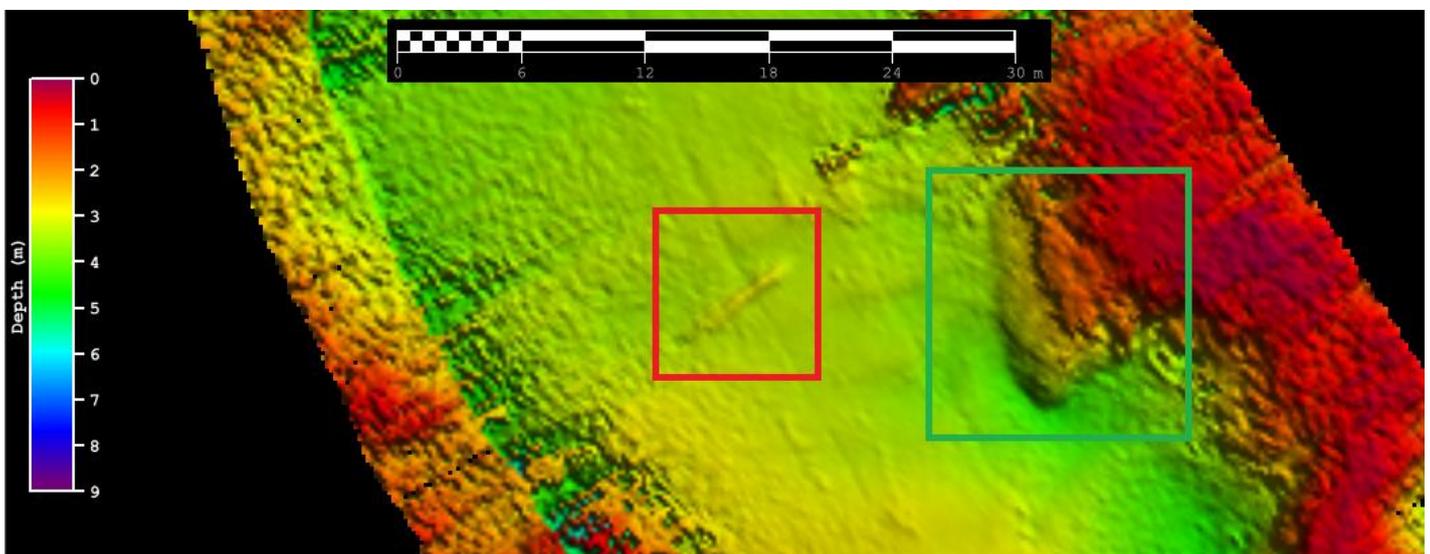


Figura 43 – Superfície batimétrica destacando outro alvo encontrado na entrada do Canal da Barra da Lagoa (quadrado vermelho). Escala de profundidade varia de 0m a 9m. Escala de distância de 30m.

Na imagem de SVL ela aparece de forma discreta, pois suas amplitudes são parecidas com as dos sedimentos no entorno. O que a destaca é sua pequena sombra, que apresenta o mesmo formato descrito pela batimetria. Comparando a superfície batimétrica com a Figura 44, ficam evidentes os

limites de resolução entre as duas. A imagem de SVL apresenta pequenas ripplemarks que não aparecem na batimetria, assim como as fraturas da rocha destacada no quadrado verde.



Figura 44 – Imagem de SVL caracterizando a entrada do Canal, destacando o alvo encontrado (quadro vermelho) e evidenciando as fraturas da rocha que não aparecem na superfície batimétrica (quadro verde).

Uma das grandes vantagens do SDF, quando utilizado no canal, é sua larga cobertura. Foi possível levantar o canal de margem a margem com apenas uma linha de navegação.

Os SDF possuem larguras angulares de até 220°, permitindo que os levantamentos do fundo marinho se estendam a intervalos limitados principalmente pela atenuação e pequenos ângulos de incidência rasante. Dentro deste intervalo angular, que se estendem para ou acima do plano da ecosonda, o largo campo de visão do sonar permite a formação de imagens de alvos que se encontram na superfície. Desta maneira, o limite angular representa uma vantagem amplamente reconhecida dos SDF sobre os MBES quando a geometria das varreduras é um fator limitante na cobertura total do fundo do mar. Esta capacidade ainda traz um benefício para a segurança, pois uma varredura com largura angular grande melhora a capacidade de se examinar regiões muito rasas ou objetos a partir de distâncias maiores (Jerram & Schmidt 2015b).

A Figura 45 exemplifica a grande capacidade da cobertura angular do SDF. Em uma seção do canal podemos ver reflexões das quilhas de embarcações que se encontravam atracadas em trapiches nas margens do canal, destacadas pelo quadro vermelho. Na parte de baixo temos uma imagem de satélite que mostra exatamente as embarcações e trapiches da mesma área exemplificada na imagem de SVL.



Figura 45 – Imagem de SVL destacando o registro das quilhas das embarcações que se encontram atracadas nos trapiches ao longo do Canal da Barra da Lagoa (quadro vermelho). Imagem de satélite retirada do software Google Earth Pro. Escala de distância de 37m.

6.3.2 - Limitações

Como observado na Lagoa da Conceição, o SDF também apresentou no Canal limitações relacionadas com a distância mínima de operação entre o sensor e o fundo. Sistemáticamente, as varreduras foram extremamente alteradas em profundidades menores que 2m. Descontando-se o draft de 1m, nessas profundidades o sensor operava a 1m do fundo, chegando a menos de meio metro em alguns setores. Na Figura 46 podemos observar, em uma seção do canal, como as varreduras sofreram com a proximidade do fundo. As partes que mais sofreram alterações foram o nadir, que geometricamente já é prejudicado, e os feixes mais externos. Os cálculos dos ângulos completamente alterados por ruídos geraram nuvens de pontos batimétricos esparsas. Apenas as partes entre 2 e 6m para cada lado da varredura sofreram menores alterações.

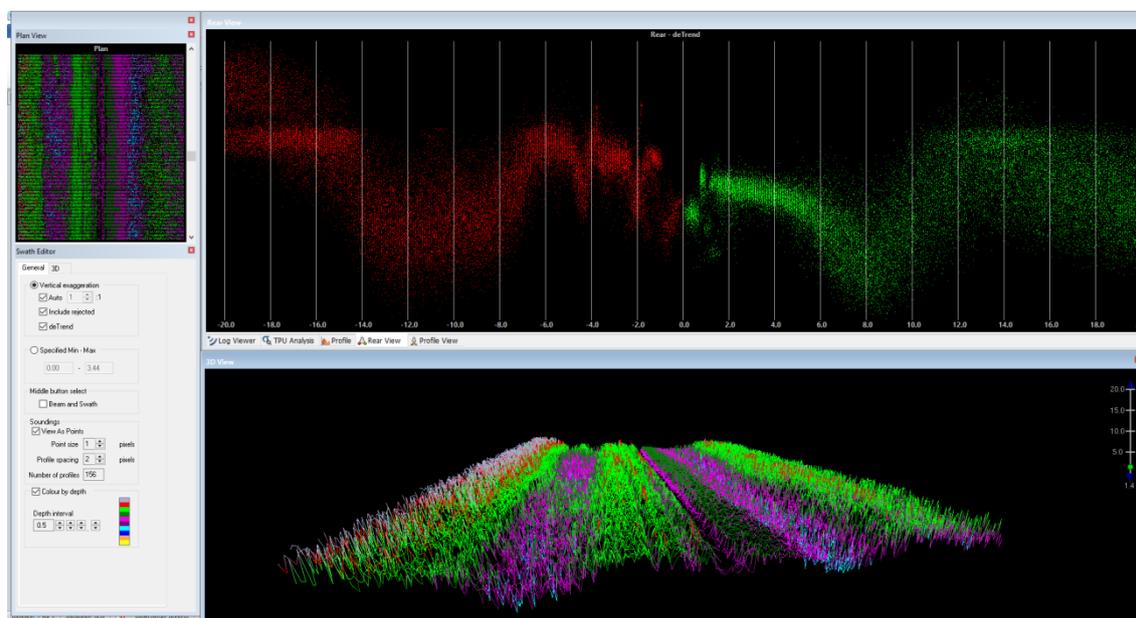


Figura 46 - Limitações relacionadas com a distância mínima de operação entre o sensor e o fundo. Quadro superior: nuvem de pontos gerada por varias varreduras, destacando as modificações sofridas. Quadro inferior: visão 3D das varreduras com exagero vertical de 1,4 vezes. Escala de profundidade variando em 0,50m.

Na Figura 47 pode ser observado um exemplo da mesma nuvem de pontos pertencentes a varredura exemplificada acima, depois de gridada com 0,30m, em uma superfície batimétrica. O perfil retirado da superfície ressalta quão alterado os dados batimétricos ficaram nesses setores. Nota-se que,

onde o canal faz a curva e as profundidades aumentam, a superfície aparece bem definida, livre dessas alterações. De fato, a pequena distância entre o sensor e o fundo, e as reflexões do sinal acústico, tanto nas margens íngremes do canal quanto na superfície d'água, ocasionaram severas alterações nos dados, impossibilitando a detecção de qualquer objeto.

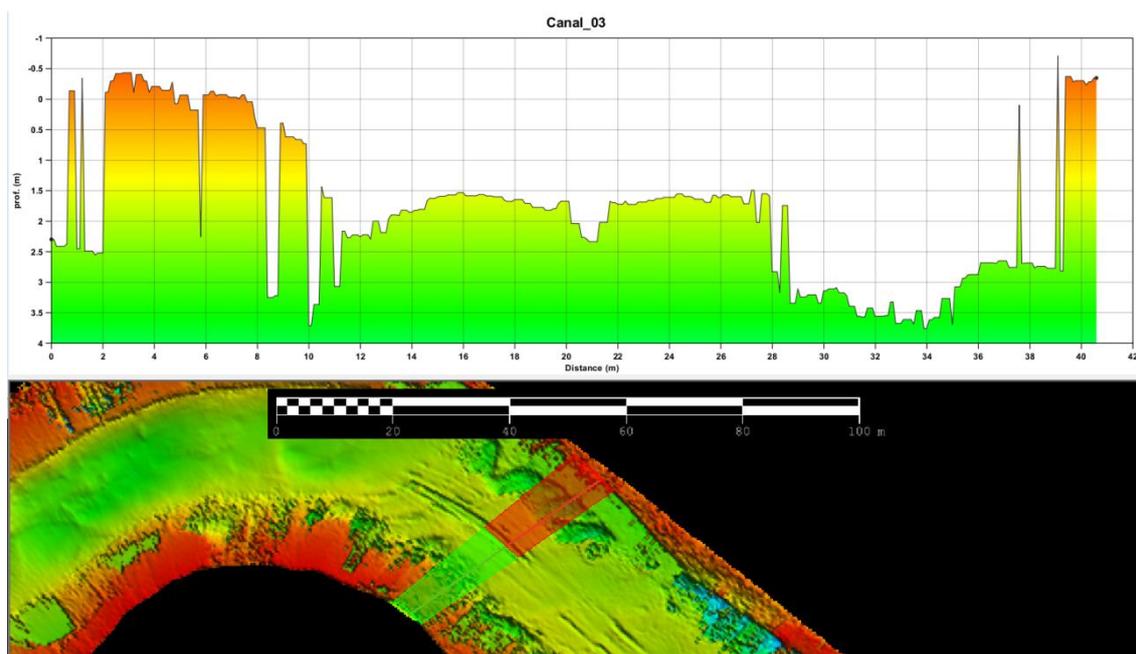


Figura 47 – Superfície batimétrica demonstrando a degradação da batimetria devido as limitações de o peração do SDF. Quadro superior: perfil batimétrico retirado da superfície batimétrica. Quadro inferior: superfície batimétrica detalhando as alterações sofridas no canal. Eixos profundidade x distância em metros. Escala de distância de 100m.

Segundo Gostnell et al. (2007), o SDF é totalmente capaz de resolver as inclinações íngremes até uma profundidade ligeiramente menor que o próprio instrumento, e, através de testes, demonstrou que o sonar pode registrar profundidades até a interface fundo-superfície d'água. Além disso, cita que caso o sistema fosse montado mais perto da superfície, certamente o mesmo traria dados batimétricos adicionais.

Para realizar a sondagem das três áreas desse trabalho, o SDF foi acoplado à extremidade de uma haste fixa na lateral da embarcação. Esta geometria pede maiores valores de draft para que o ângulo de abertura da varredura fique livre do calado da embarcação. Especificamente para o Canal e para as áreas mais rasas da Lagoa da Conceição, a melhor opção seria fixar o sistema junto à proa da embarcação. Assim, o draft poderia ser reduzido até

seu limite mínimo de operação e, concomitantemente, não haveria interferência do casco da embarcação na geometria da varredura. Isso possibilitaria a utilização do SDF em profundidades limitadas apenas pelo calado da embarcação, sem que os dados sofram alterações.

Binagem e Múltiplas Reflexões

Apesar de sua grande cobertura angular, os dados sondados no canal apontaram as dificuldades que o SDF apresentou para resolver as estruturas verticais e declividades muito acentuadas. As causas estão diretamente relacionadas às dificuldades em definir múltiplos ângulos de retorno ao mesmo tempo (mesma distancia) e à escolha do método de binagem.

Segundo Kraeutner & Bird (1999), quando os retornos do fundo do mar e de uma estrutura vertical chegam simultaneamente ao SDF, apenas um ângulo pode ser estimado. Assim, nem a estrutura nem o fundo podem ser resolvidos com precisão. Em vez disso, a interferência dos dois retornos produz uma estimativa de ângulo que varia de acordo com a relação da amplitude e fase das duas chegadas e pode, de fato, resultar em um ângulo completamente fora da realidade. No entanto, uma técnica denominada “Computed Angle of Arrival Transient Imaging (CAATI)”, utiliza um arranjo linear de transdutores com pequeno espaçamento entre si, e é capaz de resolver mais de um ângulo de retorno por distância.

Segundo Jerram & Schmidt (2015b), como o Edgetech 4600 utiliza oito receptores horizontalmente alinhados em cada um dos dois arranjos, ele é capaz de resolver múltiplos ângulos de chegada, como retornos simultâneos do fundo do mar e de uma grande estrutura vertical ou parede. Entretanto, como pode ser observado nas Figura 48 e Figura 49, isto não ocorreu de maneira eficiente para os dados sondados no Canal.

A Figura 48 exibe um setor sondado do canal em uma superfície batimétrica formada por grids de 0,20m e em uma imagem de SVL. Nota-se que na imagem do SVL, estruturas verticais cilíndricas, de grandes amplitudes,

igualmente espaçadas, estão presentes no registro. Estas são pilastras de concreto que sustentam um grande trapiche localizado na margem direita do canal. A margem esquerda também apresenta em menor quantidade algumas pilastras. Podemos observar também como as margens do canal estão bem definidas. Em contraste, nenhuma das estruturas verticais pode ser detectada na superfície batimétrica, nem mesmo os detalhes de delimitação das margens.

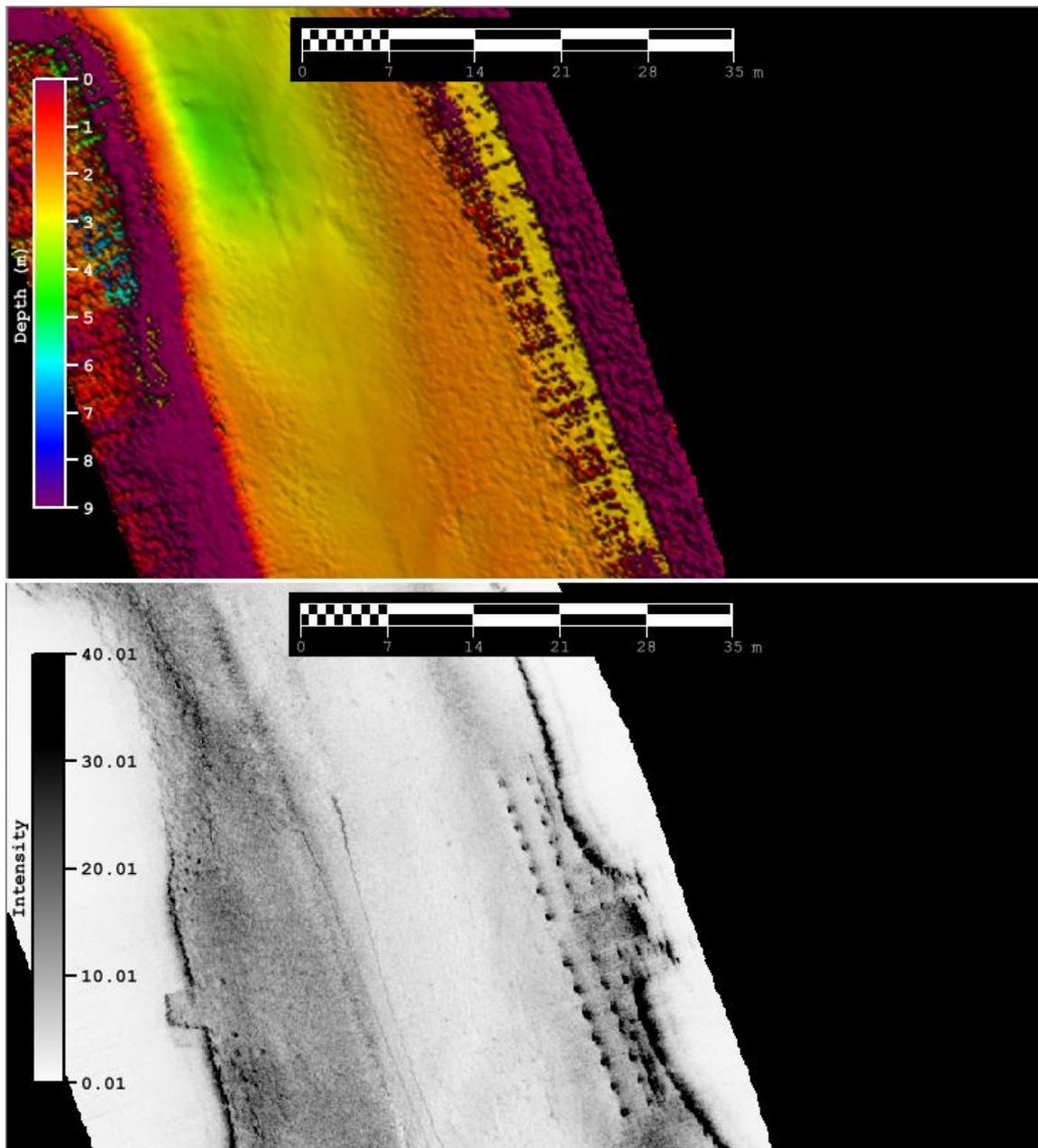


Figura 48 - Superfície batimétrica (superior) e mosaico de intensidade (inferior) destacando as estruturas verticais de um trapiche presentes em uma seção do canal, e que não são encontradas na superfície batimétrica. Escala de distância de 35m.

O mesmo pode ser observado na Figura 49. Neste outro setor do canal podemos claramente identificar na imagem de SVL, a presença de uma rampa

de concreto utilizada por uma marina. Além disso, ainda podemos observar algumas pilastras, os detalhes das margens e feições sedimentares no meio do canal. Da mesma forma, exceto as feições sedimentares que aparecem no meio do canal, nenhuma das outras estruturas é detectada na superfície batimétrica.

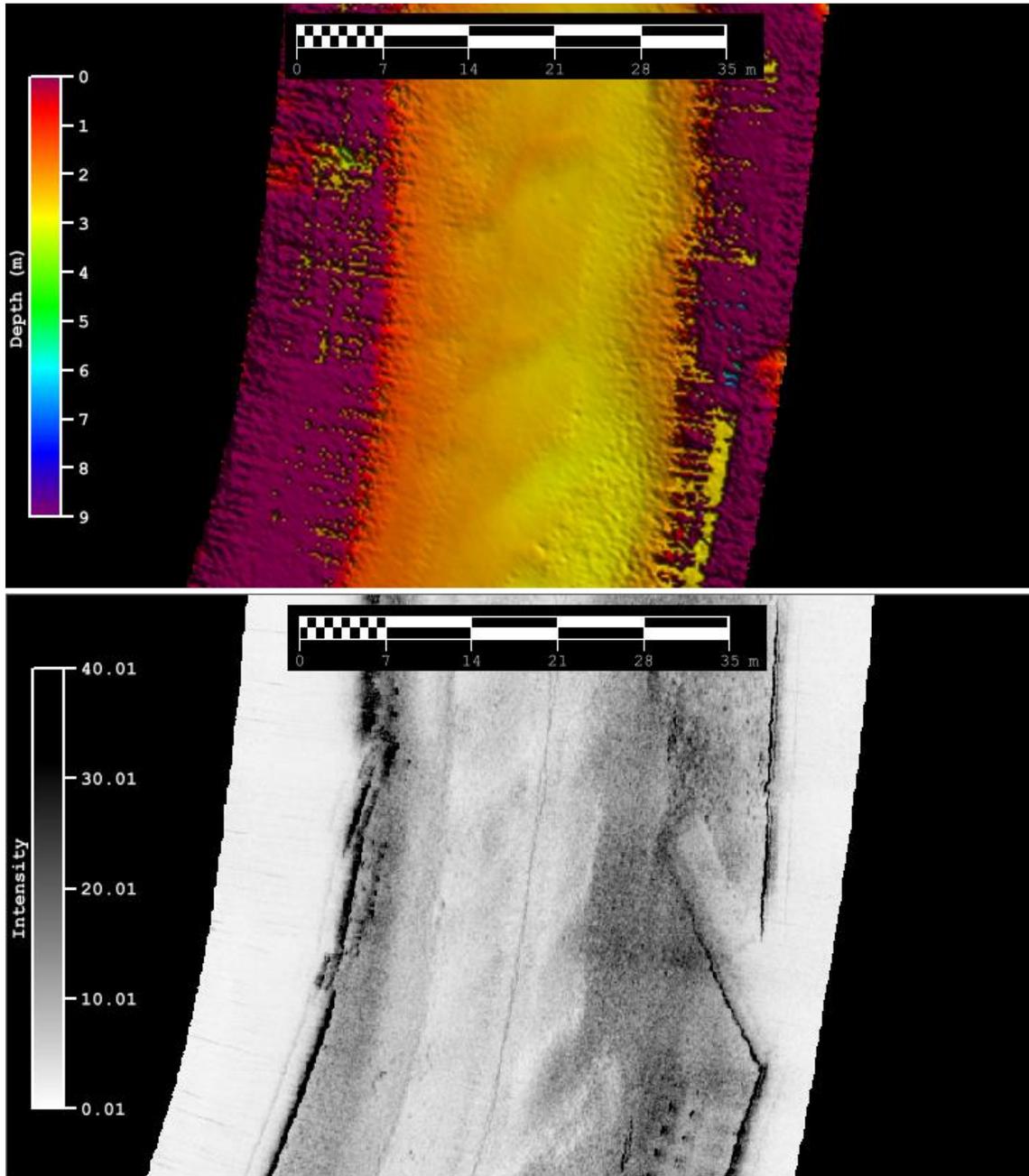


Figura 49 - Superfície batimétrica (superior) e mosaico de intensidade (inferior) destacando as estruturas verticais de uma rampa presente em uma seção do canal, e que não é encontrada na superfície batimétrica. Escala de distância de 35m.

Assim como a maioria dos SDF, o Edgetech 4600 emprega técnicas de

remoção de outliers durante a aquisição e, para isso, normalmente aplica métodos de binagem de dados brutos, por distância ou ângulo, que reduzem o volume de dados e ruídos nas sondagens resultantes. As estratégias do fabricante variam de forma a alcançar um equilíbrio entre resolução, volume de dados, incerteza e preservação de objetos (Jerram & Schmidt 2015a).

Uma consideração importante para esta etapa é a capacidade da binagem gerar estimativas de profundidade de superfícies que podem ser igualmente detectadas por apresentarem a mesma distância. Estas superfícies podem estar aparentes nos dados brutos (especialmente em ecosondas capazes de estimar múltiplos ângulos para alvos a cada distância), mas obscurecidas ou confundidas nos resultados gerados pela binagem por distância. Por exemplo, a sondagem de uma base submersa de uma parede de retenção pode incluir dados da superfície plana do fundo marinho e da parede vertical ao mesmo tempo. Mesmo se forem detectados separadamente nos dados brutos fornecidos pela ecobatímetro, a binagem por distância provavelmente levaria a estimativas de ângulo médio ou mediano errôneas para cada pegada que é composta por pontos de dados brutos do fundo e da parede, simultaneamente. Nesse caso, a binagem por ângulos seria preferível para preservar esse tipo de feição vertical, entretanto com a desvantagem de diminuir a resolução across-track nos feixes externos, principalmente em fundos planos (Schmidt & Jerram 2015).

7 – Conclusões

O Sistema Diferenciador de Fase Edgetech 4600 apresentou um bom desempenho na detecção de alvos de pequena escala (<1m³) nos três ambientes de estudo. Algumas vantagens e/ou limitações puderam ser apontadas através dos resultados gerados. A transformação dos dados binados em superfícies batimétricas provou ser confiável ao preservar os menores alvos detectados em cada região, além de ter fornecido bons subsídios para a indicação das limitações do SDF.

Tabela 3 – Resumo de alvos encontrados pelo SDF Edgetech 4600 para cada área de estudo.

Lugar	Alvos	Diâmetro (m)	Comprimento (m)	Largura (m)	Altura Z (m)	Profundidade local (m)
Ponta das Aranhas	Depressão	1,50	-	-	0,20	10,70
Lagoa da Conceição	Canoa	-	4,05	0,98	0,55	4,50
	Pockmarcks	0,50	-	-	0,03	4,90
Canal da Barra da Lagoa	Rocha	0,40	-	-	0,05	3,30
	Alvo Alongado	-	-	0,80	0,30	3,30

Na Ponta das Aranhas o menor alvo identificado foi uma depressão com 1,5m de diâmetro e 0,20m de desnível vertical, a 10,7m de profundidade. Também foi apontada a capacidade do SDF na detecção de grandes feições sedimentares, denominadas megaondulações catenárias, cujos detalhes permitiram indicar a direção do deslocamento de tais feições. As limitações apresentadas pelo SDF para a região visivelmente degradaram os dados e diminuíram a detectabilidade de pequenos alvos. Os responsáveis por essas limitações foram, principalmente, a ineficiência do compensador de movimentos e os ruídos gerados nos dados.

Na Lagoa da Conceição o menor alvo identificado foi uma canoa canadense naufragada, com 0,98m de largura central, 4,05m de comprimento e 0,55m de altura, a 4,5m de profundidade. Apesar de não conseguir mensurar a espessura de suas bordas, na superfície batimétrica elas foram bem delimitadas. Pockmarcks espalhadas por um imenso campo também foram

detectadas, com a menor delas medindo 0,50m de diâmetro e 0,03m de desnível vertical, a 4,9m de profundidade. Entretanto foram apresentadas as limitações que o SDF sofre para detectar feições diferentemente posicionadas ao longo do across-track. Além disso, fica claro como a sobreposição de linhas durante a produção da superfície podem degradar o objeto detectado. O SDF apresentou limitações em sondagens de profundidades muito reduzidas que degradaram os dados, principalmente nas extremidades das varreduras. Comparando os dados obtidos na Lagoa com os da Ponta das Aranhas, foi verificado que o equipamento entrega um ótimo resultado apenas em condições de mar extremamente calmo ou quando o trabalho é realizado em ambientes livres de ondulações.

No Canal da Barra da Lagoa o menor alvo identificado foram algumas rochas dispostas sobre o fundo, sendo que a menor delas apresentou 0,40m de diâmetro e 0,05m de altura, a 3,3m de profundidade. Um outro alvo de formato alongado apresentou largura de 0,80m e altura de 0,30m. Limitações na resolução dos alvos foram identificadas entre a batimetria e a imagem de SVL. O SDF apresentou uma grande capacidade de cobertura angular da varredura para a sondagem de canais estreitos. Entretanto, limitações entre a escolha do tipo de binagem influenciaram a definição de objetos verticais nas extremidades do canal. Assim como na Lagoa, o SDF também apresentou limitações relacionadas à profundidade de operação do sensor.

Considerando os resultados obtidos, o SDF Edgetech 4600 foi capaz de resolver alvos pequenos, principalmente nas áreas mais rasas. A produção simultânea de imagens de SVL foi um fator chave para a confirmação dos alvos. Suas limitações de operação foram expostas, sugerindo sua profundidade mínima de atuação. Os seus problemas com ruídos foram verificados e impõe limites no tamanho das feições que podem ser detectadas. Dependendo da classe hidrográfica que se pretende levantar é importante levar em conta as regiões da varredura que mais sofrem perturbações de forma a delimitar o espaçamento entre linhas de maneira mais eficiente. A binagem do dado bruto deve ser levada em consideração de acordo com o tipo de ambiente que pretendesse levantar.

Desta maneira, este estudo mostrou que o SDF Edgetech 4600 é uma ferramenta com plena capacidade de caracterizar bem alvos pequenos, trazendo segurança para a navegação em águas rasas e para população que habita regiões costeiras. Segundo as especificações de detecção de alvos determinadas pela IHO, e presentes na publicação S-44, as dimensões que o menor alvo detectável deve conter para a classe especial são de $>1\text{m}^3$. Segundo a IHO (2008), em determinadas circunstâncias, poderá ser considerado necessário que os Serviços Hidrográficos detectem feições menores, com a finalidade de minimizar a possibilidade de perigos não detectados à navegação de superfície. Como foi observado na Tabela 3, os alvos detectados pelo SDF apresentam dimensões consideravelmente menores que as especificadas para a ordem especial da S-44.

8 – Referências Bibliográficas

- Ashley, G.M., 1990. Classification of Large-Scale Subaqueous Bedforms: A New Look at an Old Problem. In *SEPM Bedforms and Bedding Structures Symposium*. Austin – TX, p. 13.
- Atherton, M.W., 2011. *Echoes and images: The encyclopedia of side-scan and scanning sonar operations* First Ed., OysterInk Publications.
- Blondel, P.H., 2000. Automatic mine detection by textural analysis of COTS sidescan sonar imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 21(16), pp.3115–3128. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/01431160050144983>.
- Blondel, P.H., 2009. *The Handbook of Sidescan Sonar* 1st ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Available at: <http://books.google.fi/books?id=-kKbinyZAQYC>.
- Blondel, P.H. & Murton, B.J., 1997. *Handbook of Seafloor Sonar Imagery*, Chichester: Praxis Publishing.
- Bresciani, L.F. V., 1998. *Avaliação da composição orgânica dos sedimentos de fundo da Lagoa da Conceição – Ilha de Santa Catarina – SC*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Brissette, M.B., 2006. Mine Detection Using Swath Bathymetric Sonars : Tools and Techniques. In *UDT-Pacific*. p. 14.
- Brissette, M.B., 1997. *The application of multibeam sonars in route survey*. University of New Brunswick.
- Brisson, L., Wolfe, D. & Staley, M., 2014. Interferometric swath bathymetry for large scale shallow water hydrographic surveys. In *Proceedings of Canadian hydrographic conference*. p. 18.
- Caris, 2015. User Guide.
- Cloet, R.L., 1988. Implications of Using a Wide Swathe Sounding System. In *Oceans '88 Conference Proceedings*. p. 1636.
- Cobra, D.T., 1992. Geometric Distortions in Side-Scan Sonar Images: A Procedure for Their Estimation and Correction. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 17(3), pp.252–268.
- Collier, J.S. & Brown, C.J., 2005. Correlation of sidescan backscatter with grain size distribution of surficial seabed sediments. *Marine Geology*, 214(4),

- pp.431–449.
- Dodd, David (Hydrographic Science Research Center, U., 2013. Uncertainty Evaluation of the EdgeTech 4600 Swath Bathymetry System. , p.16.
- EdgeTech, 2011. Product Description - EdgeTech 4600. , p.33.
- Fibras Caron, 2017. <http://www.fibrascar.com.br/produto/ver/20/canoa-canadense-022013-verde>
- Fonseca, L. & Calder, B., 2005. Geocoder: An Efficient Backscatter Map Constructor. In *U.S. Hydro 2005 Conference*. p. 9.
- Gostnell, C., 2005. Efficacy of an Interferometric Sonar for Hydrographic Surveying: Do Interferometers Warrant An In-depth Examination? , (118), pp.17–24.
- Gostnell, C., Yoos, J. & Brodet, S., 2007. NOAA test and evaluation of interferometric sonar technology. *Hydrographic Journal*, (123), pp.3–8.
- Griffiths, H.D. et al., 1997. Interferometric synthetic aperture sonar for high-resolution 3-D mapping of the seabed. *IEE PROCEEDINGS-RADAR SONAR AND NAVIGATION*, 144(2), pp.96–103.
- Hare, R., 1995. Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding. *International Hydrographic Review*, (March), pp.37–69.
- Harrington, P.K., 1995. Formation of pockmarks by pore-water escape. *Geo-Marine Letters*, 5(3), pp.193–197. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02281638>.
- Hiller, T., 2011. Solving the interferometric processing bottleneck. *International Ocean Systems*, 15(5).
- Hiller, T., Brisson, L.N. & Wright, S., 2012. Measuring Bathymetric Uncertainty of the EdgeTech 4600 Sonar. *Hydro 12*, pp.1–6.
- Hiller, T. & Hogarth, P., 2005. The Use of Phase Measuring (Interferometric) Sonars : Choosing Appropriate Data Processing Methodologies. *International hydrographic review*, 6(1), p.13.
- Hiller, T. & Lewis, K., 2004. Getting the Most out of High Resolution Wide Swath Sonar Data. In *Proceedings of the 14th International Symposium of the Hydrographic Society*. The Hydrographic Society Special Publication Number 53, Paper 8.
- Hovland, M. & Judd, A.G., 1988. *Seabed pockmarks and seepages: impact on geology, biology and the marine environment*, London: Graham and

- Trotman.
- Hughes Clarke, J.E., 2003. Dynamic Motion Residuals in Swath Sonar Data : Ironing out the Creases. *International Hydrographic Review*, 4(March 2003), pp.6–23.
- Hughes Clarke, J.E., 2013a. Sidescan Sonar Methods. , p.56.
- Hughes Clarke, J.E. et al., 1998. The limits of spatial resolution achievable using a 30kHz multibeam sonar : model predictions and field results . In *Oceans '98 Mts/lee*. p. 5.
- Hughes Clarke, J.E., 2013b. Underwater Acoustics B. , p.56.
- Hughes Clarke, J.E., Mayer, L.A. & Wells, D.E., 1996. Shallow-water imaging multibeam sonars: A new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf. *Marine Geophysical Researches*, 18(6), pp.607–629. Available at:
<http://link.springer.com/10.1007/BF00313877>.
- IHO, 2005. Depth Determination. In *Manual on Hydrography*. INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC BUREAU, pp. 119–197.
- IHO, 2008. *Especificações da OHI para Levantamentos Hidrográficos 4^a*, Mônaco: Bureau Hidrográfico Internacional.
- Jerram, K. & Schmidt, V., 2015a. Object Detection with Phase-Measuring Bathymetric Sidescan Sonar Depth Data. , pp.1–16.
- Jerram, K. & Schmidt, V., 2015b. Storm Response Surveying with Phase-Measuring Bathymetric Sidescan Sonar. , pp.1–20.
- Kjerfve, B., 1986. Comparative oceanography of coastal lagoons. In D. . Wolfe, ed. *Estuarine variability*. New York: Academic Press, pp. 63–81.
- Kolouch, D., 1984. Interferometric Side-Scan Sonar a Topographic Sea-Floor Mapping System. , (July).
- Kraeutner, P.H. & Bird, J.S., 1999. Beyond interferometry, resolving multiple angles-of-arrival in swath bathymetric imaging. *Oceans '99 Mts/lee*, pp.37–45.
- Lurton, X., 2010. *An Introduction to Underwater Acoustics* 2nd ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- de Moustier, C., 1993. Signal Processing for Swath Bathymetry and Concurrent Seafloor Acoustic Imaging. In J. M. F. Moura & I. M. G. Lourtie, eds. *Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration*. Dordrecht: Springer

- Netherlands, pp. 329–354. Available at: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-1604-6_33.
- de Moustier, C., 1988. State of the art in swath bathymetry survey systems. *International hydrographic review*, 65(2), pp.25–54.
- Muehe, D. & Caruso Jr., F., 1989. Batimetria e algumas considerações sobre a evolução geológica da Lagoa da Conceição - Ilha de Santa Catarina. *Geosul*, (7), pp.32–45.
- Nyquist, H., 1928. Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. *AIEE Transactions*, pp.617–644.
- Parker, D. & Mallace, D., 2005. A Direct Comparison of the Motion Sensors' Performance from the 2005 Common Dataset. , p.16.
- Pereira, M.L.M., 2004. *Estudo da dinâmica das águas do canal da Barra – Barra da Lagoa – Florianópolis, SC*. Universidade Federal Santa Catarina.
- Pereira, M.L.M., Porto Filho, E. & Bonetti Filho, J., 2001. Estudo hidrodinâmico do Canal da Barra – Florianópolis/SC: resultados preliminares. In *XIV Semana Nacional de Oceanografia – Rio Grande, 7 a 13 de outubro de 2001*. In *CDRom do evento*.
- PGGM – Programa de Geologia e Geofísica Marinha, 2010. Lavantamento Geológico e Sísmico da Plataforma Continental Interna dos Estados do RS, SC e PR com ênfase nos Depósitos Granulados (Siliciclásticos, Bioclásticos e Minerais Pesados): Plataforma Continental Interna Adjacente à Ilha de Santa Catarina. , p.31.
- Porpilho, D. et al., 2014. Cruzamento de dados geoacústicos para identificação de feições indicativas de gás na Lagoa da Conceição – Florianópolis , Santa. In *VI Simpósio Brasileiro de Geofísica*. SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica, p. 3.
- Porpilho, D., 2015. *Padrão Morfológico e Sonográfico da Plataforma Continental Interna Adjacente ao Setor Leste da Ilha de Santa Catarina*. Universidade Federal de Santa Catarina.
- Raineault, N.A. et al., 2013. Interannual changes in seafloor surficial geology at an artificial reef site on the inner continental shelf. *Continental Shelf Research*, 58(April), pp.67–78. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.03.008>.
- Schmidt, V. & Jerram, K., 2015. *Effective Object Detection with Bathymetric*

- Sonar Systems for Post-Storm Response*, Durham, New Hampshire.
- Short, A.D., 1999. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Sierra de Ledo, B. & Soriano-Sierra, E., 1999. Atributos e processos condicionantes da hidrodinâmica na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina. In *O ecossistema da Lagoa da Conceição*. Florianópolis: UFSC, CCB, NEMAR, pp. 89–100.
- Souza, L.A.P. de, 2006. *Revisão Crítica da Aplicabilidade dos Métodos Geofísicos na Investigação de Áreas Submersas Rasas*. Universidade de São Paulo.
- Tian, W.-M., 2008. Integrated method for the detection and location of underwater pipelines. *Appl. Acoustics*, 69, p.5p. 387-398.
- Tian, W.-M., 2011. Side-scan sonar techniques for the characterization of physical properties of artificial benthic habitats. *Brazilian Journal of Oceanography*, 59, pp.77–90. Available at: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1679-87592011000500010&script=sci_arttext.
- Urick, R., 1975. *Principles of Underwater Sound*, New York: McGraw-Hill.
- Wilby, A.D., 1999. The advantages, challenges and practical implementation of an interferometric swath bathymetry system. In *OCEANS '99 MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century*. pp. 23–29 vol.1.
- Wright, S. & Brisson, L.N., 2011. Shallow water assessment of an interferometric phase differencing sonar.