

Daniel Carazzai

**SONOGRAFIA E BATIMETRIA DE VARREDURA DO CANAL DA BARRA DA  
LAGOA**

Florianópolis  
2015

Daniel Carazzai

**SONOGRAFIA E BATIMETRIA DE VARREDURA DO CANAL DA BARRA DA  
LAGOA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Geociências da Universidade Federal  
de Santa Catarina como requisito  
parcial para obtenção do grau de  
Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Henrique  
da Fontoura Klein

Florianópolis  
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

**SONOGRAFIA E BATIMETRIA DE VARREDURA DO CANAL DA BARRA DA  
LAGOA**

Daniel Carazzai

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de  
Geociências da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial  
para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia

Julgado em     /     /

**Banca Examinadora:**

---

**Orientador - ANTONIO HENRIQUE DA FONTOU KLEIN**  
(Orientador – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC/SC)

---

**JARBAS BONETTI FILHO**  
(Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC /SC)

---

**JORGE DE SOUZA**  
(Chicago Bridge & Iron Company – CB&I)

## Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>5</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	<b>7</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>8</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>10</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
3.1 PROPAGAÇÃO DO SOM NO MEIO MARINHO.....	15
3.2 IMPEDÂNCIA ACÚSTICA E COEFICIENTE DE REFLEXÃO .....	18
3.3 RETROESPALHAMENTO ( <i>BACKSCATTERING</i> ).....	20
3.4 BATIMETRIA DE VARREDURA.....	23
3.5 SONOGRAFIA.....	27
3.6 FORMAS DE LEITO.....	29
<b>4 ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>34</b>
4.1 DESCRIÇÃO FISIAGRÁFICA.....	34
4.2 DADOS HIDRODINÂMICOS .....	36
4.3 USOS E OCUPAÇÃO.....	37
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
5.1 LEVANTAMENTO GEOFÍSICO ACÚSTICO .....	38
5.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	39
5.3 INSTALAÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS .....	41
5.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS BATIMÉTRICOS .....	42
5.5 PROCESSAMENTO DA SONOGRAFIA .....	45
5.6 CORREÇÃO DA MARÉ .....	46
5.7 GERAÇÃO DO MAPA BATIMÉTRICO.....	48
5.8 CARACTERIZAÇÃO SONOGRÁFICA .....	48
5.9 REGISTRO FOTOGRÁFICO .....	49
5.10 ANÁLISE DAS FORMAS DE LEITO .....	50
5.11 ANÁLISE DE SEDIMENTOS .....	50
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>51</b>
6.1 BATIMETRIA.....	51
6.2 SONOGRAFIA.....	57
6.3 FORMAS DE LEITO.....	68
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	<b>75</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>77</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>86</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Classificações de Lagunas Costeiras segundo Kjerfve (1986). Adaptado de Miranda et al (2002).....	12
<b>Figura 2</b> Reflexão especular, espalhamento e retroespalhamento de uma onda incidente sobre uma superfície rugosa.....	21
<b>Figura 3</b> Os três fatores de influência sobre o retroespalhamento do leito marinho (de cima para baixo): geometria local de ensonificação, rugosidade da superfície, propriedades intrínsecas do fundo (e.g. influência de rochas na camada de subsuperfície de sedimentos sobre o retroespalhamento). Adaptado de Blondel (2009).....	22
<b>Figura 4</b> Representação dos sistemas de batimetria de varredura. Ângulo $\theta$ denota a abertura angular do feixe e $R(t)$ a distancia em função do tempo de ida e volta do sinal. Adaptado de Lurton (2003).....	24
<b>Figura 5</b> Os dois sistemas de batimetria de varredura BSSS e MBES. As plataformas dos sonares navegam ao longo de uma linha com uma velocidade $V$ . A área ensonificada apresenta uma resolução espacial $\Delta R$ , sendo no caso do MBES dada pela intersecção das faixas de recepção e transmissão. Adaptado de Volberg & Meurling, 2007.....	25
<b>Figura 6</b> Geometria do sistema de aquisição do sonar de varredura lateral. (Souza, 1988).....	27
<b>Figura 7</b> Tipos distintos de formas de leito em função do regime de escoamento. Texto de (Rubin & McCulloch, 1980). ....	31
<b>Figura 8.</b> Classificação de dunas submersas por descritores de primeira, segunda e terceira ordem propostos por Ashley (1990).....	32
<b>Figura 9.</b> Atributos básicos de uma duna .....	32
<b>Figura 10</b> Relação logarítmica entre altura e espaçamento de dunas submersas. Adaptado de Flemming (1988). ....	33
<b>Figura 11</b> Relação das feições de leito em função da velocidade de fluxo, tamanho de grão e profundidade sobre os dois regimes de escoamento. Adaptado de Rubin & McCulloch (1980). ....	34
<b>Figura 12.</b> Representação geográfica da área de estudo.....	35
<b>Figura 13.</b> Simulação da preservação da orla do Canal da Barra da Lagoa e a ocupação atual. Fonte: Quick Bird fusão multiespectral + pancromática, 2002. Cedida pelo Laboratório de Oceanografia Costeira, UFSC, apud Bittencourt (2005).....	38
<b>Figura 14.</b> Imagem da central de controle da batimetria, sonografia e navegação (à esquerda) e do sonar Edgetech 4600 instalado na lateral da embarcação através de uma estrutura fixa (à direita). ....	41
<b>Figura 15.</b> Fluxograma do processamento de dados batimétricos. Adaptado de HYPACK 2013 TRAINNING NOTES.....	43
<b>Figura 16.</b> Perfis de velocidade do som aquisitadas na porção mais profunda do Canal da Barra da Lagoa (quadro 1 da figura 20). ....	44
<b>Figura 17</b> Edição da batimetria e remoção dos dados espúrios.....	44

<b>Figura 18.</b> Edição da batimetria e remoção dos dados espúrios.....	46
<b>Figura 19.</b> Local de instalação do marégrafo utilizado na porção interior do Canal da Barra da Lagoa. ....	47
<b>Figura 20.</b> Caiaque e sonar Humminbird 398 Ci Si utilizados na localização dos alvos selecionados para registro fotográfico. ....	50
<b>Figura 21.</b> Local da amostragem de sedimentos indicado em vermelho no mapa. ....	51
<b>Figura 22.</b> Mapa batimétrico da Barra da Lagoa. ....	53
<b>Figura 23.</b> Representação dos caminhos múltiplos do eco: (a) Transdutor-backscatter da superfície da água-receptor; (b) Transdutor-espalhamento do fundo- backscatter da superfície da água-receptor; (c) Transdutor-backscatter do fundo-espalhamento da superfície da água-receptor; (d) Transdutor-espalhamento da superfície da água-backscatter do fundo-receptor; (e) Transdutor-backscatter da superfície da água-espalhamento do fundo-receptor. Denbigh (1989). ....	55
<b>Figura 24</b> Marcas abaixo da linha de navegação atribuídas ao erro multipath	56
<b>Figura 25.</b> Perfil do canal na área de omissão dos trens de dunas 2 e 3. ....	66
<b>Figura 26.</b> Perfil do fundo do canal paralelo à linha de navegação no local onde houve falha de aquisição dos dados na região do nadir. ....	68
<b>Figura 28.</b> Locais dos trens de dunas identificados.....	69
<b>Figura 29.</b> Trem de dunas submersas da área 1.....	70
<b>Figura 30.</b> Trem de dunas submersas da área 2.....	71
<b>Figura 31.</b> Trem de dunas submersas da área 3.....	72
<b>Figura 32.</b> Trem de dunas submersas da área 4.....	72
<b>Figura 33.</b> Trem de dunas da área 5. ....	73
<b>Figura 34.</b> Trem de dunas da área 6 .....	74

## Lista de Quadros

<b>Quadro 1.</b> Características geoacústicas de sedimentos. Usando escala de Wentworth e valores de velocidade do som e densidade, no meio de referência, de 1500 m/s e 1000kg/m <sup>3</sup> , respectivamente. Adaptado de APL, 1994. ....	20
<b>Quadro 2.</b> Caracterização sonográfica do Canal da Barra da Lagoa. ....	58
<b>Quadro 3.</b> Erros de aquisição dos dados sonográficos. ....	66

## Lista de abreviaturas

MBES - *Multibeam Echo Sounders*

BSSS - *Bathymetric Side Scan Sonar*

MRU - *Motion Reference Unit*

DGPS - *Differential Global Positioning System*

AGC - *Automatic Gain Control*

SDS – Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável

## Agradecimentos

Primeiramente agradeço aos meus pais, Acir e Marilisa, por todo amor, dedicação e cuidado. Obrigado pela minha formação, os valores sólidos que me transmitiram é o meu bem mais precioso. Amo vocês imensamente.

Agradeço ao meu irmão Ricardo, meu parceiro, meu escudo, meu protetor, minha referência. Obrigado por todos os nossos momentos juntos e pela sua presença constante na minha vida. Mesmo longe sua força está sempre comigo. Te amo negão!

À minha noiva, Cleciane, que acompanhou todo o processo desde os meus primeiros anos na faculdade até esta etapa final...meu anjo, obrigado por todo seu apoio e sua paciência, pela motivação que me traz em querer buscar o melhor para nós dois, me sinto honrado por tudo que já vivemos e iremos viver juntos. Te amo polaquinha.

Ao meu orientador, professor Antônio Klein, agradeço enormemente por toda inspiração que me passou não somente neste período da monografia, mas em todas disciplinas que ministrou durante minha formação. Obrigado por todo tipo de conhecimento que dedica aos seus alunos e orientandos e pela seriedade que encara a nobre profissão de professor.

Obrigado ao professor Jarbas Bonetti, por seu papel em meu amadurecimento como Oceanógrafo no estágio durante o curso, pela maneira que sempre me recebeu com abertura e prontidão para ajudar, e pelas dicas musicais do bom e velho Rock n' Roll. Keep Rockin' professor!

Ao professor Antônio Fetter deixo meu agradecimento pelo breve período que trabalhei ao seu lado e pelas lições que tirei neste período. Obrigado professor pela oportunidade que me deu e por todo conhecimento que me passou. Podes ter certeza que seus conselhos foram de grande valor nesta minha caminhada final do curso. Um forte abraço!

Agradeço ao Jorge da CB&I por todas as formas que contribuiu na minha experiência como estagiário na empresa, através das conversas e toques sobre o meio profissional da nossa profissão. Obrigado pela sua amizade e pelos ensinamentos.

Ao Silvio e ao Henrique da empresa Spectrah que me deram a oportunidade de participar de levantamentos batimétricos, me motivando na vivência prática da atividade de campo.

Aos colegas do LOC, um abraço a todos e sucesso na caminhada de vocês. Obrigado pela companhia e trocas de experiências nesse período.

Agradeço especialmente ao Arthur pelo enorme esforço em me ajudar durante este ano. Aprendi muita coisa contigo meu velho, podes contar sempre comigo!

A todos os colegas de curso na UFSC e da UNIVALI, Marixco, Jão, Zé, Baiana, Pachequera da baêa (valeu pela ajuda nos mergulhos!) Renatão, Lageano...valeu moçada, foi bom enquanto durou! Sucesso a todos vocês!

E por fim, a todos meus amigos do peito que sabem quem são. Valeu cambada...comemoremos!

## Resumo

No presente estudo foi realizado o levantamento batimétrico e sonográfico do Canal da Barra da Lagoa através de um sonar interferométrico. Um mapa batimétrico de alta resolução foi gerado e a caracterização sonográfica do leito foi dada através da análise dos padrões de retroespalhamento e sua correlação com os diferentes tipos de substratos amostrados *in situ* via registro fotográfico. As feições de leito identificadas nos dados acústicos foram analisadas através de perfis transversais, apontando as respectivas configurações hidrodinâmicas em função de suas características. O mapa batimétrico apresentou boa resolução, sendo capaz de identificar feições pequenas na ordem de 30 centímetros. A sonografia detectou a diversidade de substratos do fundo do canal, e o registro fotográfico corroborou a interpretação dos alvos selecionados nos sonogramas. As feições de leito identificadas foram dunas submersas pequenas e médias com orientações na direção de maré vazante e enchente em diferentes pontos ao longo do canal. A geração simultânea de dados batimétricos e sonográficos pelo sonar interferométrico mostrou-se uma eficiente forma de se realizar o mapeamento do fundo e sua caracterização acústica. Os dados se complementam, garantindo uma interpretação mais acurada dos dados. As dunas submersas médias identificadas, em função de sua dimensão, representam a corrente dominante no local em uma escala de baixa frequência.

**Palavras-chave:** Batimetria de varredura. Sonografia. Retroespalhamento. Feições de leito.

## 1 Introdução

O ambiente marinho costeiro constitui-se de uma região altamente complexa e de grande importância para o homem e a biota, visto que representa fisicamente uma interface tripla entre oceano, atmosfera e o continente. A zona costeira conta com menos de 10% da área oceânica global, no entanto abriga 90% de todas as espécies marinhas (Miller, 2011). Além deste fato, mais de 50% da população humana mundial está concentrada entre 60 quilômetros da costa (Post et al., 1996). O limitado conhecimento sobre as respostas da natureza frente à crescente pressão antrópica vigente sobre esta região justifica o esforço da comunidade científica à compreensão efetiva dos aspectos e processos geológicos, físicos, químicos e biológicos promovidos pela interação entre a interface dos três compartimentos.

Dentre os diversos ecossistemas costeiros, os estuários são amplamente reconhecidos como um dos sistemas naturais mais produtivos e dinâmicos. Esse ambiente transicional desempenha uma série de serviços ecossistêmicos e ambientais, servindo como local de desova, alimentação e habitats para comunidades biológicas, efetuando a ciclagem biogeoquímica e circulação de nutrientes, protegendo a linha de costa, e atuando muitas vezes como um filtro a materiais particulados e dissolvidos no fluxo sentido ao mar, (Schubel & Carter, 1984) executando uma função determinante no transporte e distribuição de propriedades (D'aquino, 2011).

As definições de estuários são extensivamente discutidas na literatura. Kjerfve (1986) propôs uma classificação de corpos de água interiores

conectados ao oceano baseada nas suas estruturas geomorfológicas, dando ênfase no estudo das lagunas costeiras, as quais define como “*corpos de água interiores, normalmente orientados paralelos à linha de costa, separados do oceano por uma barreira e conectados a este por um ou mais canais, com profundidades raramente excedendo a cota dos 20 metros.*” O autor discriminou os diferentes tipos de lagunas costeiras de acordo com as características dos canais de abertura ao oceano adjacente, forjando três classes de lagunas costeiras: sufocadas, restritas e abertas (figura 1).

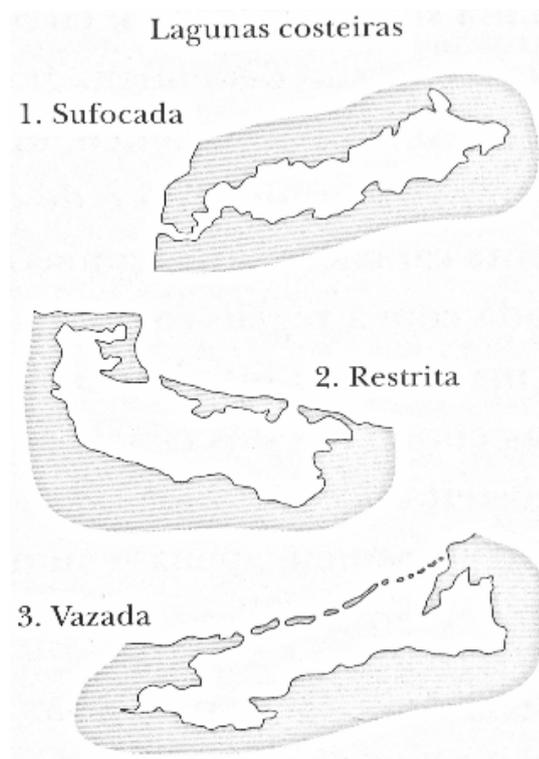


Figura 1. Classificações de Lagunas Costeiras segundo Kjerfve (1986). Adaptado de Miranda et al (2002).

As lagunas costeiras sufocadas apresentam-se na forma de células elípticas paralelas à linha de costa, conectadas ao oceano por um único canal longo e estreito e são associadas às regiões costeiras com moderada a alta energia de ondas, deriva litorânea significativa, e regime de micro a mesomaré 12

Sua hidrodinâmica interior é normalmente dominada pela força do vento, e pela ação das marés ao longo do canal de conexão ao oceano. Embora as lagoas sofram variações no nível devido à co-oscilação da maré do oceano adjacente, o canal de entrada atua como um filtro dinâmico, atenuando as velocidades de corrente de maré e flutuações do nível em direção a desembocadura lagunar (Kjerfve, 1986). Portanto a troca de volume e massa entre a lagoa e o oceano, e os aspectos e processos morfosedimentares do canal de acesso, serão governados primordialmente pelas suas características hidrodinâmicas.

O uso de métodos indiretos de sensoriamento remoto do ambiente marinho foi razão do grande avanço no conhecimento científico de áreas inacessíveis à amostragem direta. O advento tecnológico garantiu a evolução dos equipamentos e sensores de modo que a aplicabilidade desta ferramenta vem sendo largamente difundida e aprimorada aos diversos tipos de estudos.

A demanda por estudos de investigação da superfície e subsuperfície do fundo marinho em regiões costeiras é comumente atendida pelo emprego de métodos geofísicos acústicos. A medição da profundidade da coluna d'água, o imageamento do fundo marinho, sua topografia e caracterização do material que o compõe, são essencialmente relacionados ao uso de fontes acústicas de alta frequência (> 30 kHz).

A sonografia tem por objetivo o imageamento da superfície do fundo de áreas submersas, e seu princípio de funcionamento baseia-se na emissão de um sinal acústico de alta frequência, em intervalos de tempo regulares, por dois transdutores (emissores e receptores) que apontam para ambos os lados da

superfície do fundo em relação ao rumo da navegação. O padrão do feixe acústico emitido tem como característica ser estreito na direção de navegação (raramente excedendo  $2^{\circ}$ ), o que garante uma alta resolução, e largo na direção perpendicular à rota de navegação (ordem de  $40-50^{\circ}$ ), permitindo uma expressiva cobertura de varredura (Blondel, 2009; Souza, 2006). Sistemas sonares modernos podem integrar a sonografia com a batimetria de varredura no mesmo equipamento. Paralelo ao registro de dados de sonar de varredura lateral, o método de processamento de sinal chamado interferometria garante a geração da batimetria de alta precisão através da diferenciação de fase do sinal recebido entre os receptores.

Importantes evidências e apontamentos a respeito da hidrodinâmica de ambientes aquáticos podem ser realizados através da investigação das formas do fundo sedimentar inconsolidado. Esse estudo direcionado mostrou-se como uma ferramenta útil na estimativa e avaliação dos agentes físicos que deram origem a essas feições (Bouma et al, 1980; Wewetzer, 1999; Kenyon & Belderson, 1973).

O presente estudo apresenta um mapa batimétrico de alta resolução do Canal da Barra da Lagoa, bem como a sua caracterização sonográfica, identificando os diversos tipos de substratos que compõem o seu leito em função das suas assinaturas acústicas. Em paralelo, as formas de leito identificadas pela interpretação dos dados acústicos e suas relações com a hidrodinâmica do canal são discutidas.

## 2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é a confecção de um mapa batimétrico do Canal da Barra da Lagoa e sua caracterização sonográfica através de dados levantados pelo sonar interferométrico Edgetech 4600, visando um registro geofísico de alta resolução do local, bem como a avaliação do dado gerado pelo equipamento utilizado.

Como objetivos específicos:

- Analisar os diferentes padrões de retroespalhamento do imageamento;
- Fazer correlação dos padrões de retroespalhamento com o respectivo tipo de substrato amostrado *in situ* via registro fotográfico;
- Identificação dos erros e suas fontes para a batimetria de varredura e a sonografia;
- Caracterizar as feições de leito e apontar a respectiva configuração hidrodinâmica do canal em função dessas características.

## 3 Referencial teórico

### 3.1 Propagação do som no meio marinho

Grande parte do conhecimento adquirido sobre a Terra e do avanço tecnológico na transmissão de informação e na comunicação deve-se às ondas eletromagnéticas. Como essas ondas podem se propagar no vácuo e na atmosfera, seu domínio de aplicações se diversificou desde a ascensão do homem ao espaço, em especial em relação ao uso

generalizado das telecomunicações e ao sensoriamento remoto do planeta por satélites orbitais. Porém o ambiente submerso, que compõe mais de 70% da superfície da Terra, permanece inacessível a este tipo de onda, devido à propriedade altamente dissipativa deste meio e a consequente rápida atenuação das ondas eletromagnéticas (Lurton, 2002).

A exploração dos ambientes submersos, portanto, foi designada ao uso das ondas acústicas. Segundo Medwin & Clay (1997), o início da oceanografia acústica deu-se após o naufrágio do navio *Titanic* em 1912, buscando segurança na navegação e o uso do som para detecção de obstáculos, sendo registrada a primeira patente de um sonar em 1914. Além deste evento, a perda de navios aliados por ataques de submarinos durante a Primeira Guerra Mundial determinou por definitivo a necessidade de avanço tecnológico desta ferramenta (D'amico & Pittenger, 2006).

Uma onda acústica é originada a partir de uma perturbação mecânica gerada por uma fonte. Compressões e dilatações locais são propagadas adiante a partir desta fonte em função das propriedades elásticas do meio, e neste sentido também são chamadas de ondas compressionais ou longitudinais, cuja direção de deslocamento dos elementos de massa do meio é dada no mesmo sentido de propagação. A distância física entre as frentes de pressão de uma onda acústica é definida como comprimento de onda ( $\lambda$ ) e o número destas frentes que passam por um determinado ponto estacionário por unidade de tempo é definido como frequência ( $f$ ).

A velocidade de propagação de ondas acústicas em um meio é função de suas constantes elásticas, as quais variam de acordo com o material. Para as ondas compressoriais ou ondas P, considerando meios homogêneos e isotrópicos a velocidade da onda é expressa pela equação (Schon, 1996):

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

Onde:

(k) é o módulo de compressão;

( $\mu$ ) é o módulo de rigidez;

( $\rho$ ) é a densidade do meio.

O módulo de compressão representa a deformação de volume sujeito à pressão hidrostática, enquanto o módulo de rigidez correlaciona a deformação cisalhante causada por uma tensão tangencial.

Na água do mar a velocidade de propagação das ondas acústicas apresenta um valor em torno de 1500 m/s, a qual é influenciada pela temperatura, pressão e primordialmente pela salinidade. Já no leito marinho, segundo (Ayres, 2001), a velocidade das ondas compressoriais podem variar de 800 m/s em sedimentos saturados com gás à 4000 m/s em rochas sedimentares.

## 3.2 Impedância acústica e coeficiente de reflexão

O conceito de impedância acústica ( $Z$ ) é definido como o produto entre a velocidade da onda acústica e a densidade do meio, e representa a resistência que este meio oferece à propagação da onda. Este parâmetro acústico depende dos módulos de compressibilidade, rigidez e densidade e tem implicação direta nos fenômenos de reflexão e transmissão da onda compressional emitida na interface entre dois ou mais meios (Marques, 2011).

Nos métodos geofísicos acústicos de investigação submarina, a interação com o fundo da respectiva energia emitida terá como resultado os fenômenos de reflexão e transmissão. A reflexão especular ocorre quando o ângulo de incidência de uma onda é igual ao ângulo refletido, e denomina-se espalhamento (*scattering*) a reflexão em direções difusas. Já a transmissão é a parte da energia que é refratada para o outro meio. A quantidade de energia que será refletida ou transmitida depende da diferença de impedância entre os meios, o ângulo de incidência do pulso sonoro, da rugosidade da superfície do fundo e de suas características físicas (composição, compactação, porosidade, teor de água intersticial, etc.) (Simões, 2007; Tian, 2007).

O coeficiente de reflexão é função da diferença de impedância acústica entre dois ou mais meios. Quanto maior esta diferença, maior será a energia do eco refletido. Na formulação mais simples considerando a incidência da onda acústica na direção normal à superfície do fundo, o coeficiente de reflexão ( $R$ ) é dado por (Ayres, 2013):

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

Onde os subscritos 2 e 1, denotam os dois meios elásticos. Os valores encontrados para a gama de materiais que compõem o fundo marinho são utilizados na determinação indireta de suas propriedades físicas e seus respectivos parâmetros geoacústicos, como no caso dos classificadores automáticos de fundo ou AGDS (*Acoustic Ground Discrimination Systems*) (Hamilton, 1970; Penrose *et. al.*, 2005). O quadro 1 exemplifica a relação entre esses fatores: para um aumento do tamanho de grão e densidade, ocorre um aumento da velocidade de propagação da onda acústica no meio, gerando uma maior impedância acústica e contraste com o meio de referência e uma maior refletividade da energia emitida.

A variação da impedância acústica e do coeficiente de reflexão para os diferentes substratos é justamente o que permite a aplicação dos métodos acústicos de investigação de áreas submersas (Ayres, 2001). Estes parâmetros têm grande importância na acústica submarina, servindo como base para o desenvolvimento de modelos de propagação de ondas acústicas e sua interação com o leito marinho e camadas subjacentes (Sternlicht, 1999; Isakson *et. al.* 2004, Camin & Isakson, 2006).

	Argila	Silte muito fino	Silte fino	Silte médio	Silte grosso	Areia muito fina	Areia fina	Areia média	Areia grossa
Tamanho de grão ( $\phi$ )	> 8	7-8	6-7	5-6	4-5	3-4	2-3	1-2	0-1
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1145	1147	1148	1149	1195	1268	1451	1845	2231
Velocidade (m/s)	1470	1476	1479	1482	1523	1585	1661	1767	1875
R (0°)(dB)	0.058	0.060	0.062	0.063	0.096	0.145	0.233	0.370	0.472

Quadro 1. Características geoacústicas de sedimentos. Usando escala de Wentworth e valores de velocidade do som e densidade, no meio de referência, de 1500 m/s e 1000kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Adaptado de APL, 1994.

### 3.3 Retroespalhamento (*Backscattering*)

Nos métodos acústicos usados em levantamentos sonográficos e batimétricos, são basicamente dois processos primários que permitem que o som emitido pelo sonar retorne ao transdutor: a reflexão especular e o retroespalhamento (*backscatter*)(Souza, 2006). A reflexão especular, conforme definida em 2.,2, será dominante nas regiões próximas ao nadir onde o ângulo de incidência da onda acústica se aproxima da direção normal ao fundo (Nishimura, 1997). O segundo processo, chamado de retroespalhamento, diz respeito à fração da energia do pulso acústico emitido, proveniente do seu espalhamento (*scattering*) ao interagir com o fundo, que irá retornar ao transdutor, conforme ilustrado na figura 2.

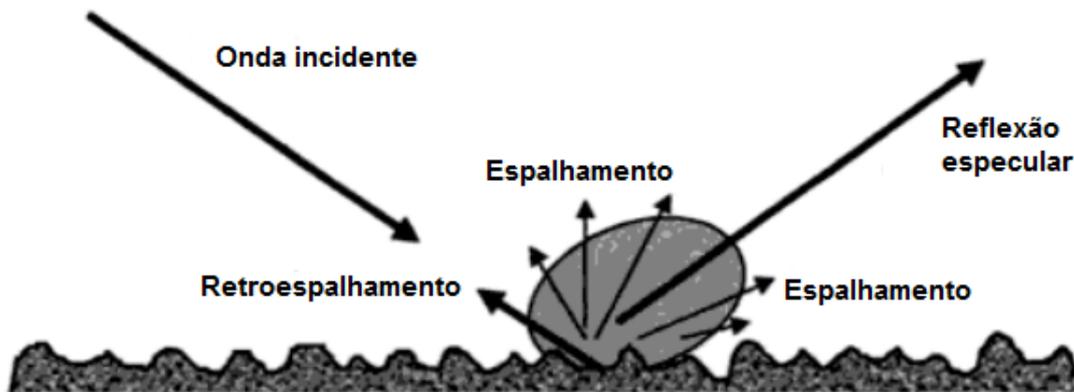


Figura 2 Reflexão especular, espalhamento e retroespalhamento de uma onda incidente sobre uma superfície rugosa.

Segundo Blondel (2009), o retroespalhamento é afetado em ordem decrescente de importância (figura 3):

- (1) *Pela geometria entre o transdutor do sonar e a superfície ensonificada (angulação relativa de incidência do feixe acústico);*
- (2) *Pelas características físicas da superfície (e.g. rugosidade em microescala comparável ao comprimento de onda do sonar);*
- (3) *Pela natureza intrínseca da superfície (composição, densidade, impedância acústica, importância relativa entre espalhamento de superfície e de volume para a frequência utilizada).*

Considerando todos estes fatores de influência, o emprego do retroespalhamento na geofísica aplicada está vinculado à sua capacidade de caracterização do fundo marinho a partir das fácies acústicas representadas pelas suas medidas. As fácies acústicas ou ecofácies podem ser definidas como a organização espacial de fragmentos do fundo marinho com respostas acústicas comuns e as características mensuráveis desta resposta (Lurton *et.al.*, 2015).

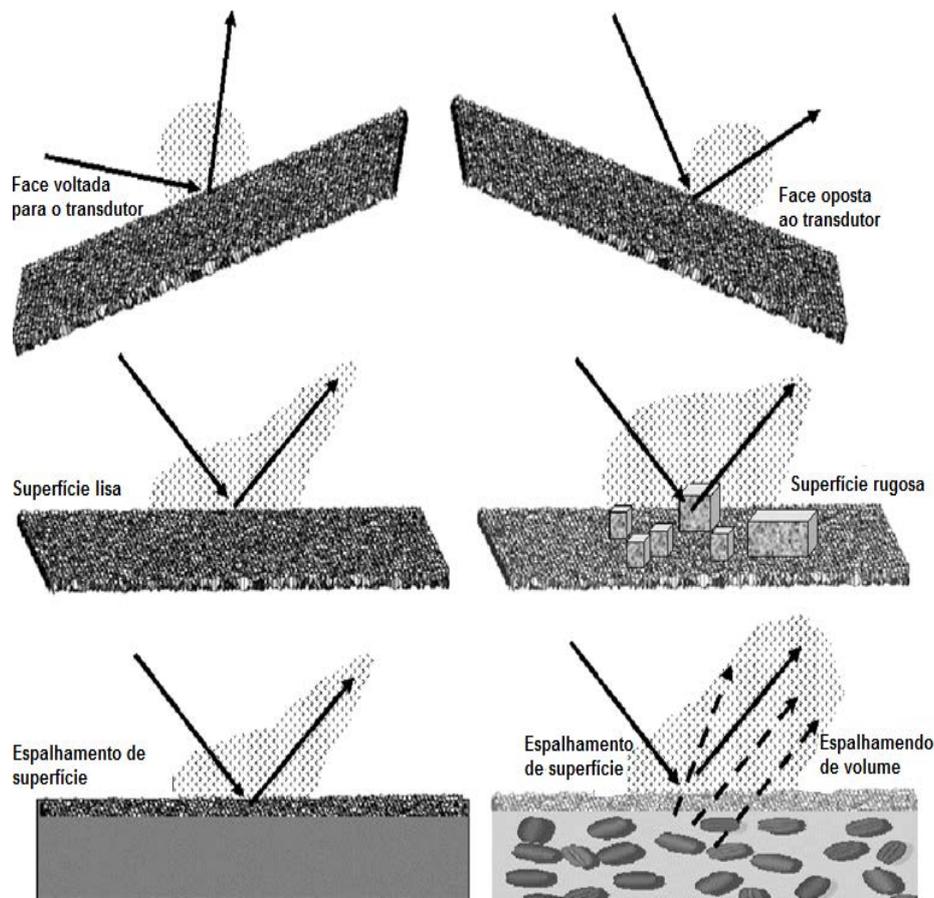


Figura 3 Os três fatores de influência sobre o retroespalhamento do leito marinho (de cima para baixo): geometria local de ensonificação, rugosidade da superfície, propriedades intrínsecas do fundo (e.g. influência de rochas na camada de subsuperfície de sedimentos sobre o retroespalhamento). Adaptado de Blondel (2009).

O retroespalhamento apresenta relação direta com o tamanho de grão dos sedimentos e a rugosidade da superfície do fundo. Esta prerrogativa permite sua aplicação na provisão de informações qualitativas e quantitativas a respeito da composição e natureza do substrato, servindo como *proxy* na caracterização do fundo marinho e habitats bentônicos (Jackson & Briggs, 1992; Cochrane & Lafferty, 2002; Anderson *et. al.*, 2002; Brown & Blondel, 2009).

### 3.4 Batimetria de varredura

Os sistemas de batimetria de varredura (*"Swath Bathymetry"*) foram desenvolvidos para suprir as principais limitações dos convencionais sonares monofeixe: a área de cobertura do fundo e o tempo/custo de execução do levantamento. Os dois sistemas mais utilizados atualmente são os sonares multi-feixe (*Multibeam Echo Sounders - MBES*) e os chamados Sonares Batimétricos de Varredura Lateral (*"Bathymetric Side Scan Sonar"- BSSS*).

Segundo Volberg & Meurling (2007) *um sistema sonar genérico é estruturado por cinco componentes básicos: (1) transmissor; (2) projetor; (3) hidrofone; (4) interface de processamento do sinal e (5) interface de visualização e armazenamento do dado.* A sequência de operação é dada primeiramente pela emissão de um sinal elétrico do transmissor o qual é recebido pelo projetor e transformado em um sinal acústico correspondente por meio de uma perturbação mecânica de pastilhas piezoelétricas ou por magnetostrição. . Essa energia acústica é propagada no meio e após interagir com algum obstáculo de impedância acústica diferente é retroespalhada ou refletida de volta ao sonar. Finalmente os hidrofones transformam essa energia acústica em energia elétrica a qual é captada pela interface de processamento do sinal para então o dado ser visualizado e armazenado.

A batimetria de varredura tem como objetivo as medições de profundidade e a amplitude do sinal acústico de retorno do leito ao longo de uma linha que se estende para fora a partir do transdutor do sonar, perpendicularmente ao sentido de movimento do mesmo (Geen and Cunningham, 1998 *apud* Bates & 23

Byham, 2001). À medida que a plataforma do sonar avança ao longo de uma linha de navegação, perfis em forma de faixas de medições de profundidade são gerados conforme ilustrado na figura 4.

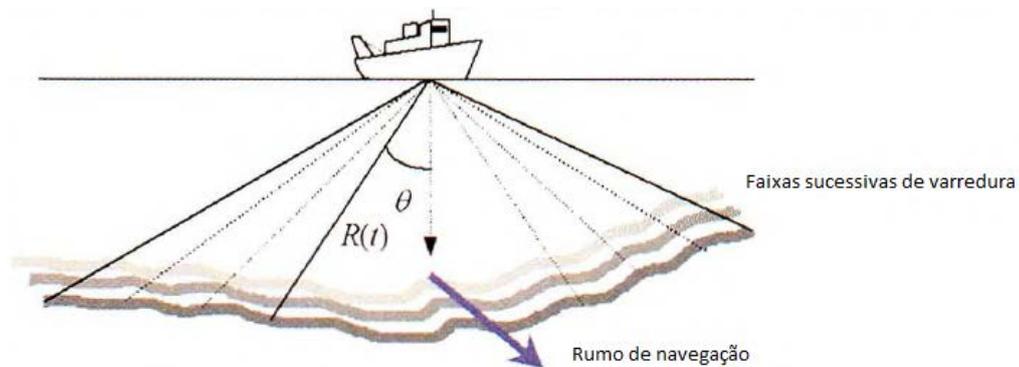


Figura 4 Representação dos sistemas de batimetria de varredura. Ângulo  $\theta$  denota a abertura angular do feixe e  $R(t)$  a distância em função do tempo de ida e volta do sinal. Adaptado de Lurton (2003)

Em ambos os sistemas, MBES e BSSS, o dado bruto coletado é o backscatter acústico do fundo em função de seu tempo e ângulo de recepção pelo transdutor (De Moustier & Matsumoto, 1993). A diferença entre os sistemas está na maneira como a faixa de varredura é gerada e na determinação da localização de cada ponto da mesma. O sonar multi-feixe apresenta um arranjo de projetores e receptores dos sinais acústicos dispostos na chamada configuração *Mills Crossing* (figura 5), transversais entre si. Quando os transmissores emitem o pulso de energia acústica, uma faixa perpendicular ao eixo de navegação da embarcação é ensonificada por uma série de feixes acústicos estreitos. Após a interação com o fundo o eco é detectado na intersecção desta área com o feixe de captação dos hidrofones conforme ilustrado na figura 4. Através de uma técnica de processamento de

sinal chamada de *beam forming*, o eco é dividido em uma série de canais acústicos definidos pela direção de captação em relação ao receptor. O tempo de ida e volta e a orientação de cada feixe acústico emitido permite a localização dos pontos da faixa adquirida (Mesh, 2005; Rønhovde, 1999).

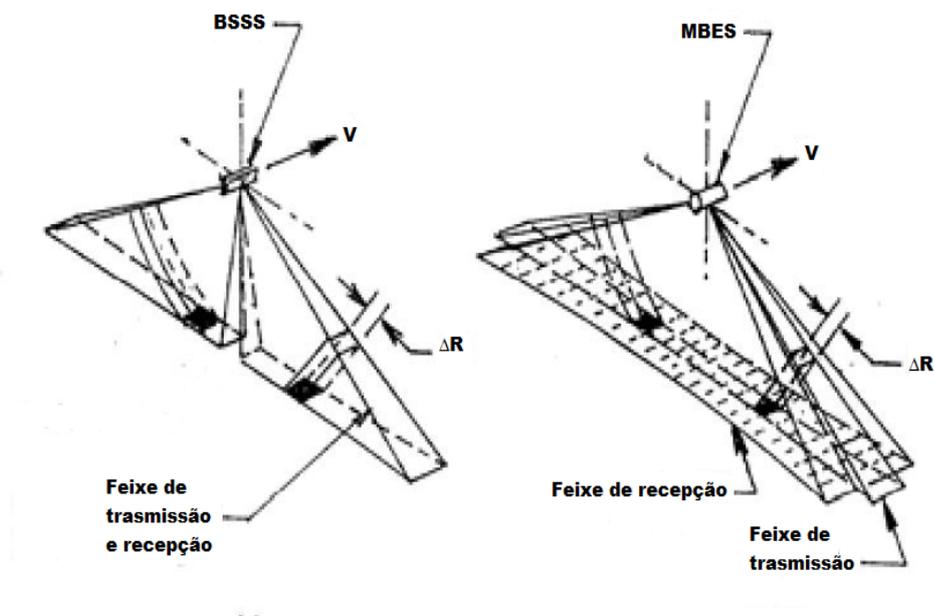


Figura 5 Os dois sistemas de batimetria de varredura BSSS e MBES. As plataformas dos sonares navegam ao longo de uma linha com uma velocidade  $V$ . A área ensonificada apresenta uma resolução espacial  $\Delta R$ , sendo no caso do MBES dada pela intersecção das faixas de recepção e transmissão. Adaptado de Volberg & Meurling, 2007.

Os Sonares Batimétricos de Varredura Lateral, por sua vez, foram desenvolvidos baseados na técnica dos sonares de varredura lateral convencionais e da interferometria (Xu, 1998). Esses equipamentos são compostos por um arranjo de dois transdutores (figura 5), cada um direcionado para um lado, perpendicular o rumo de navegação, e compostos por um transmissor e dois ou mais receptores posicionados muito próximos e paralelamente ao transmissor, com pequenas diferenças de inclinação. Desta forma, o sinal recebido entre cada receptor terá uma diferença temporal e de

25

fase, garantindo o cálculo do ângulo entre este sinal e o transmissor bem como a distância de ida e volta do mesmo ao transdutor (figura 5). Combinando as duas informações, tem-se a localização de cada ponto registrado (Blondel, 2009).

Devido à expansão esférica dos feixes acústicos estreitos dos sonares MBES, a área ensonificada apresenta dependência da profundidade da área de levantamento, podendo acarretar em um aumento de custo da operação em águas rasas em função do menor espaçamento necessário entre as linhas de navegação para se obter 100% de cobertura da área de sondagem. Os Sonares Batimétricos de Varredura Lateral realizam o imageamento do fundo pelos valores de retroespalhamento sincronicamente à batimetria, apresentando sonogramas com resolução e qualidade equivalentes aos sonares de varredura lateral específicos a este propósito. No amadurecimento da tecnologia os dados provenientes dos sistemas BSSS foram questionados em relação a problemas recorrentes como a ambiguidade de profundidades registradas, a qualidade do dado nas extremidades do feixe e a menor densidade de dados na região do nadir (Brisson et. al.,2014; MESH, 2005; Gotsnell, 2005; Geen, 1996, De Moustier, 1988).

Na atualidade, as tecnologias de processamento do sinal por interferometria e *beamforming* vêm sendo empregadas em ambos os sistemas sonares para suprir suas respectivas limitações, a exemplo do sonar interferométrico Edgetech 4600, usado nos levantamentos do presente estudo, o qual utiliza a técnica *beamforming* para minimizar os efeitos de ambiguidades de profundidade e garantir uma maior cobertura na região do nadir. No trabalho

de Pujol et. al. (2006) um novo algoritmo foi proposto para otimização da resolução espacial de sistemas MBES usando a técnica da interferometria.

### 3.5 Sonografia

O princípio da sonografia está baseado na emissão de um sinal acústico de alta frequência, em intervalos de tempo regulares, por dois transdutores (emissores e receptores) submersos, que apontam para ambos os lados da superfície do fundo em relação ao rumo da navegação (figura 6) (Souza,2006). O feixe acústico transmitido pelo sistema é propagado com ângulo de espalhamento aproximado de  $30^\circ$  no sentido transversal ao rumo de navegação, sendo estreito, normalmente com  $2^\circ$ , no sentido paralelo ao rumo de navegação (Blondel & Murton, 1997).

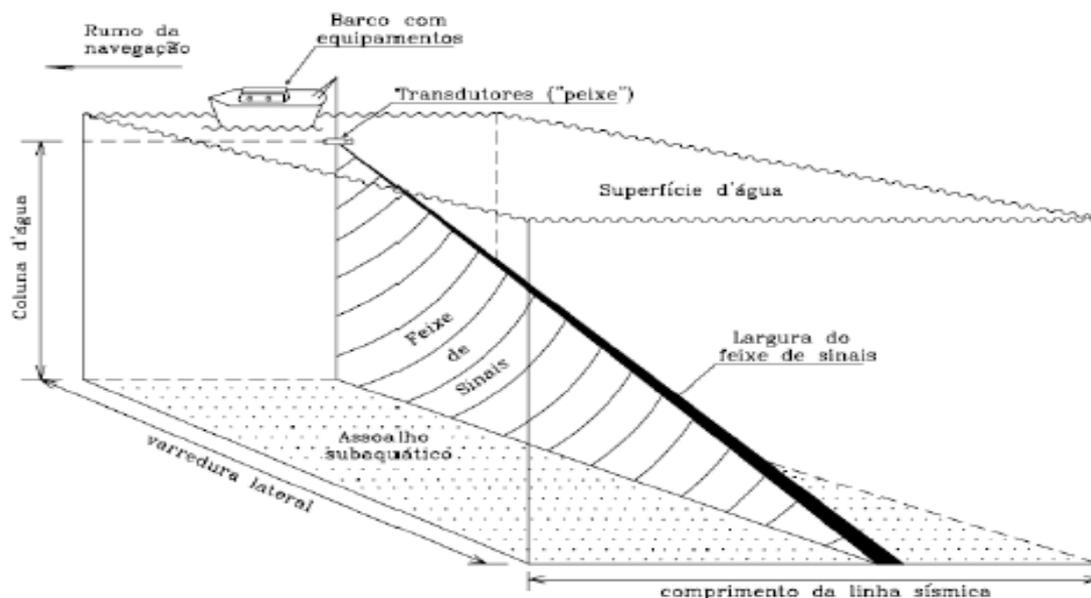


Figura 6 Geometria do sistema de aquisição do sonar de varredura lateral. (Souza, 1988).

As imagens produzidas pelo sonar de varredura lateral consistem em diferentes intensidades do retorno do sinal (retroespalhamento) que são apresentadas em escalas de cores ou padrões de cinza. Essas intensidades distintas estão relacionadas com as propriedades dos tipos de sedimentos de fundo, como a granulometria, a textura, o ângulo de incidência do sinal, a micromorfologia do fundo e a atenuação das ondas acústicas (Ayres, 2000; Quaresma et al., 2000). Rocha e cascalho são melhores refletores que areia ou lama e se mostrarão mais claros no registro final. A topografia do fundo também influencia na intensidade da energia refletida que chega ao sonar. Faces de estruturas voltadas para o sonar com inclinação acentuada são melhores refletores do que aquelas com declive suave devido ao baixo ângulo de incidência do pulso do sonar e também aparecerá mais claro no registro (Fish & Carr, 1990).

As frequências comumente usadas em sonares de varredura lateral no mapeamento de áreas costeiras variam entre 100 à 1600 kHz. Embora frequências altas garantam uma resolução máxima na ordem de centímetros, o alcance do sinal é significativamente mais limitado em relação à frequências mais baixas. Em 100 kHz, o alcance máximo pode chegar até 300 metros para cada transdutor, formando uma área de varredura de 600 metros, com resolução de 0.15 metros. Por outro lado, utilizando uma alta frequência de, por exemplo, 500 kHz, o alcance seria reduzido para 75 metros por transdutor, porém com uma resolução superior. A escolha da frequência está associada com o planejamento e propósito do levantamento (Penrose *et. al*, 2005).

As aplicações do sonar de varredura lateral são diversas como na arqueologia submarina para a identificação de artefatos em áreas inacessíveis, na área biológica para identificação e caracterização de habitats bentônicos, na engenharia oceânica e costeira para monitoramento de dutos ou busca de jazidas para alimentação de praias, em estudos geológicos e morfodinâmicos de ambientes submersos, dentre outros.

### 3.6 Formas de leito

As formas de leito são feições desenvolvidas no fundo sedimentar não coesivo de um ambiente submerso através da interação deste leito móvel com as tensões geradas pelo movimento do fluido sobrejacente. Essas formas são onipresentes em praticamente todos ambientes sedimentares, tendo efeito direto sobre a rugosidade do fundo, as condições de escoamento, e conseqüentemente, no transporte de sedimentos (Whitmeyer & Fitzgerald, 2008).

Segundo Dalrymple & Rhodes (1995) *o processo de formação de uma feição de leito ocorre a partir de uma imperfeição na topografia do fundo a qual causará uma perturbação do fluxo na região a jusante deste local. Esse efeito é ponderado em toda a camada do fluxo, gerando um máximo local do atrito do fundo a certa distância após a imperfeição no sentido do fluxo. A diminuição na taxa de transporte de sedimentos a jusante deste máximo local de atrito irá provocar a deposição do sedimento e a geração de uma segunda imperfeição no fundo a partir da qual o processo se repete gerando um campo de dunas.*

Observações em ambiente controlado e na natureza demonstraram que um fundo arenoso no qual há movimento dos sedimentos podem exibir cinco tipos distintos de feições de leito (figura 7): fundo plano de fluxo inferior, *ripples*, dunas, fundo plano de fluxo superior e antidunas (Southard & Boguchwal, 1990; Rubin & McCulloch, 1980; Dalrymple *et. al.* 1978; *apud* Dalrymple & Rhodes, 1995). Fluxo inferior e superior diz respeito ao regime do fluxo, dado em função do número de Froude ( $F$ ) que determina as contribuições das forças inerciais e gravitacionais sobre o escoamento. As três primeiras fases são correspondentes a fluxos de regime inferior ( $F < 1$ ) e as duas seguintes a fluxos superiores ( $F > 1$ ).

As marcas onduladas (*ripples*) e dunas são feições que trazem importantes informações em suas características a respeito dos agentes hidrodinâmicos responsáveis por sua formação. As primeiras imprimem em suas formas movimentos de maior frequência, havendo mudanças na escala de horas (e.g. um ciclo de maré). As dunas, no entanto, apresentam um *lag* na alteração de sua morfologia que é dependente da taxa de mudança das condições do fluxo, da taxa de transporte de sedimentos em cada ponto no tempo e de seu tamanho (Allen & Friend, 1976).

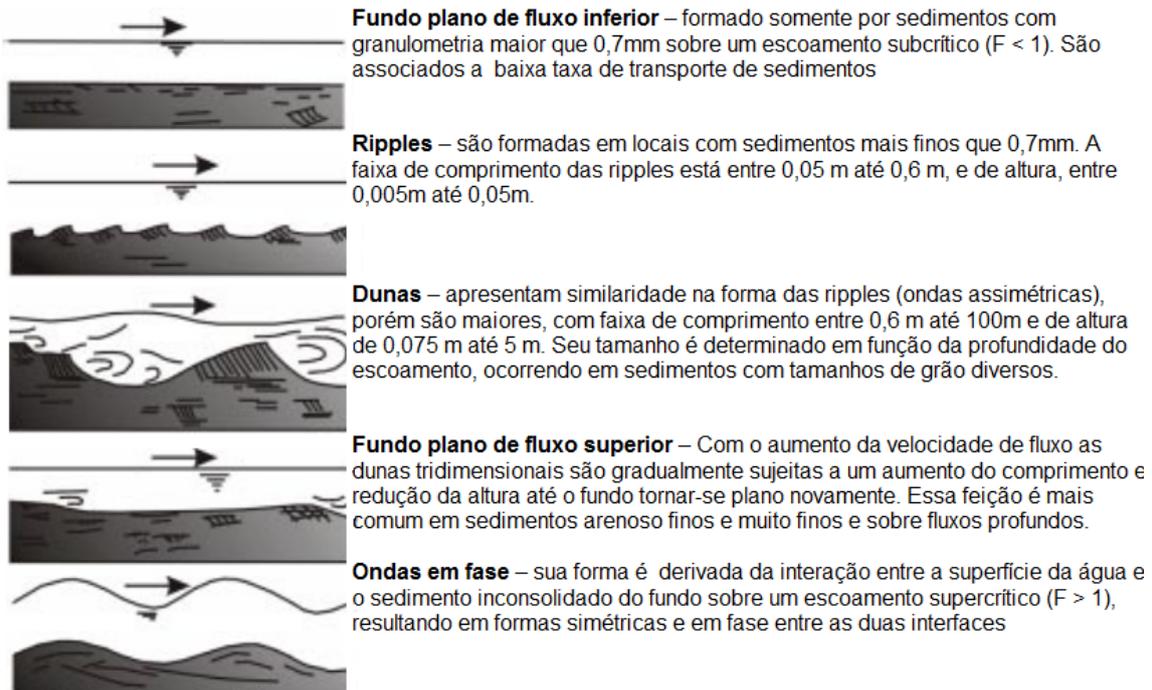


Figura 7 Tipos distintos de formas de leito em função do regime de escoamento. Texto de (Rubin & McCulloch, 1980).

As diferentes terminologias para classificação de feições de tamanhos distintos foi tema de grande discussão ao longo dos anos, e um esquema proposto no simpósio SEPM (*Bedforms and Bedding Structures Research Symposium*, 1987), resumido por Ashley (1990), é adotado como o consenso a este propósito (figura 8). As classes de tamanho dadas pelos descritores de primeira ordem foram resultado de 1491 medições de formas de fundo marinhas sumersas, sobre influencia de escoamentos uni e bidirecionais, desde regiões rasas (<1 m) a mais profundas (<50 m), chegando à relação entre altura e espaçamento mostrada na figura 10.

Dunas submersas					
Descrições de primeira ordem (necessárias)					
Tamanho (m)	Espaçamento =	Pequena 0,6-5,0	Média 5-10	Grande 10-100	Muito grande > 100
	Altura =	0,075-0,4	0,4-0,75	0,75-5	> 5
Forma	Bidimensional (2D)				
	Tridimensional (3D)				
Descrições de segunda ordem (importantes)					
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Superposição: simples ou composta (tamanhos e orientação relativa)</li> <li>- Características do sedimento (tamanho, grau de seleção)</li> </ul>					
Descrições de terceira ordem (usuais)					
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perfil da forma de fundo (Comprimentos e ângulos de inclinação dos lados suave e íngreme)</li> <li>- Fração do fundo coberta por formas de fundo</li> <li>- Estrutura do escoamento (características temporais da velocidade)</li> <li>- Intensidades relativas dos escoamentos opostos</li> <li>- Comportamento e história de migração da duna (acrecção vertical e horizontal)</li> </ul>					

Figura 8. Classificação de dunas submersas por descritores de primeira, segunda e terceira ordem propostos por Ashley (1990).

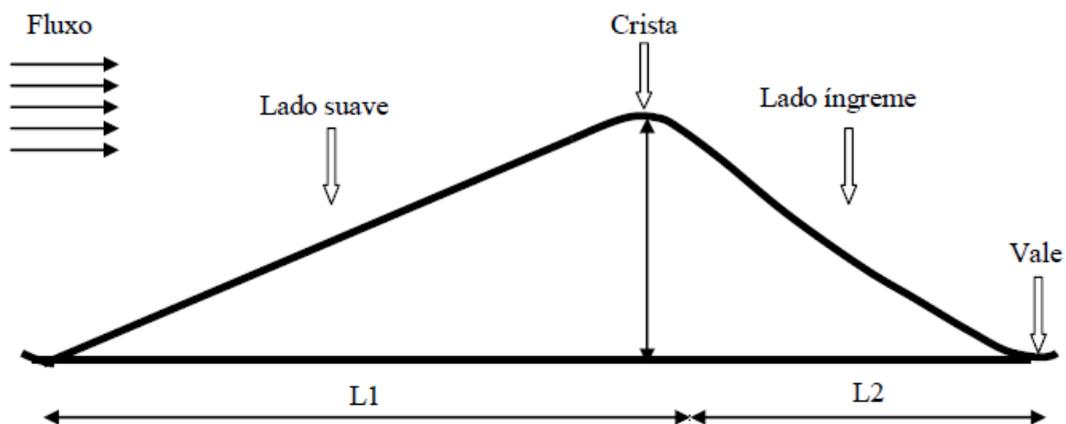


Figura 9. Atributos básicos de uma duna

Os atributos básicos de caracterização de uma duna submersa são a sua altura, seu espaçamento e sua forma (figura 9). A forma da duna está

relacionada a orientação das suas cristas, sendo bidimensionais quando retas e paralelas, e tridimensionais com orientação mais complexa. Outro aspecto da forma de uma duna diz respeito ao grau de simetria, que é dada pela razão do comprimento entre a sua face suave e a face íngreme.

O tamanho das dunas é uma complexa função de diferentes variáveis, sendo as mais determinantes: (1) profundidade; (2) velocidade da corrente; (3) tamanho de grão e suprimento de sedimentos (Dalrymple & Rhodes,1995). Rubin & McCulloch (1980) propuseram um diagrama tridimensional relacionando essas variáveis com o tipo feição para os diferente regimes de escoamento (figura 11).

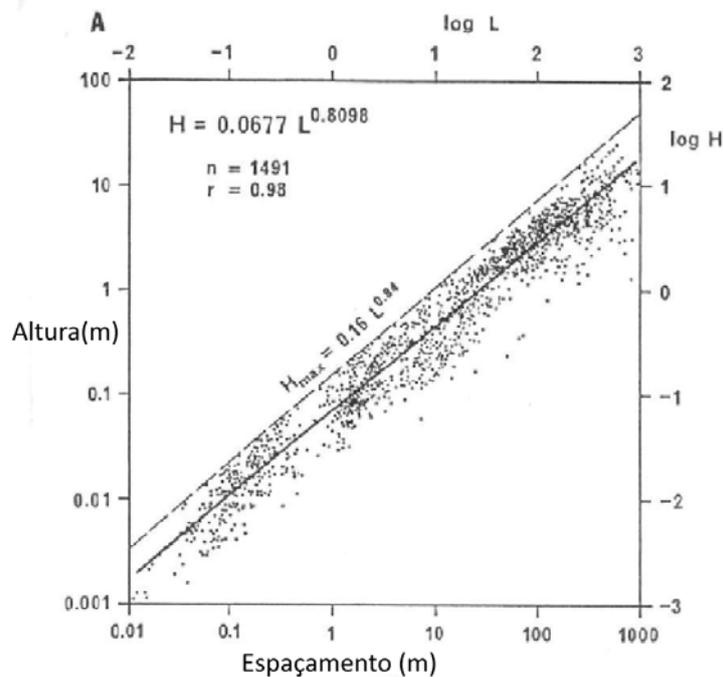


Figura 10 Relação logarítmica entre altura e espaçamento de dunas submersas. Adaptado de Flemming (1988).

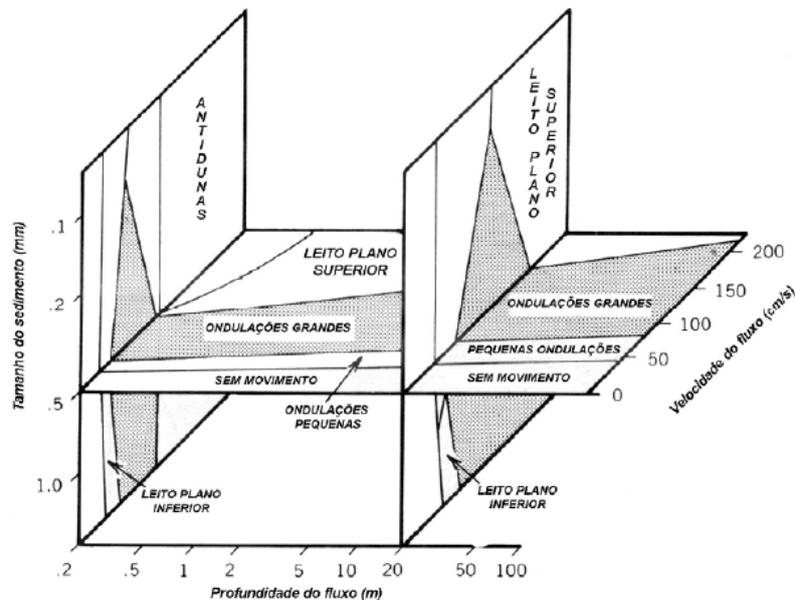


Figura 11 Relação das feições de leito em função da velocidade de fluxo, tamanho de grão e profundidade sobre os dois regimes de escoamento. Adaptado de Rubin & McCulloch (1980).

## 4 Área de estudo

### 4.1 Descrição fisiográfica

A área de estudo (figura 12) pertence ao sistema lagunar da Lagoa da Conceição, situada na porção leste da Ilha de Santa Catarina, litoral central do estado de Santa Catarina. O Canal da Barra da Lagoa é a única ligação com o oceano, caracterizando o sistema lagunar como do tipo sufocado. Possui 2,8km de extensão (Pereira et. al, 2001) com presença de meandros, uma largura média de 25m e profundidade média de 2,5m (Sierra de Ledo; Soriano-Sierra, 1999).

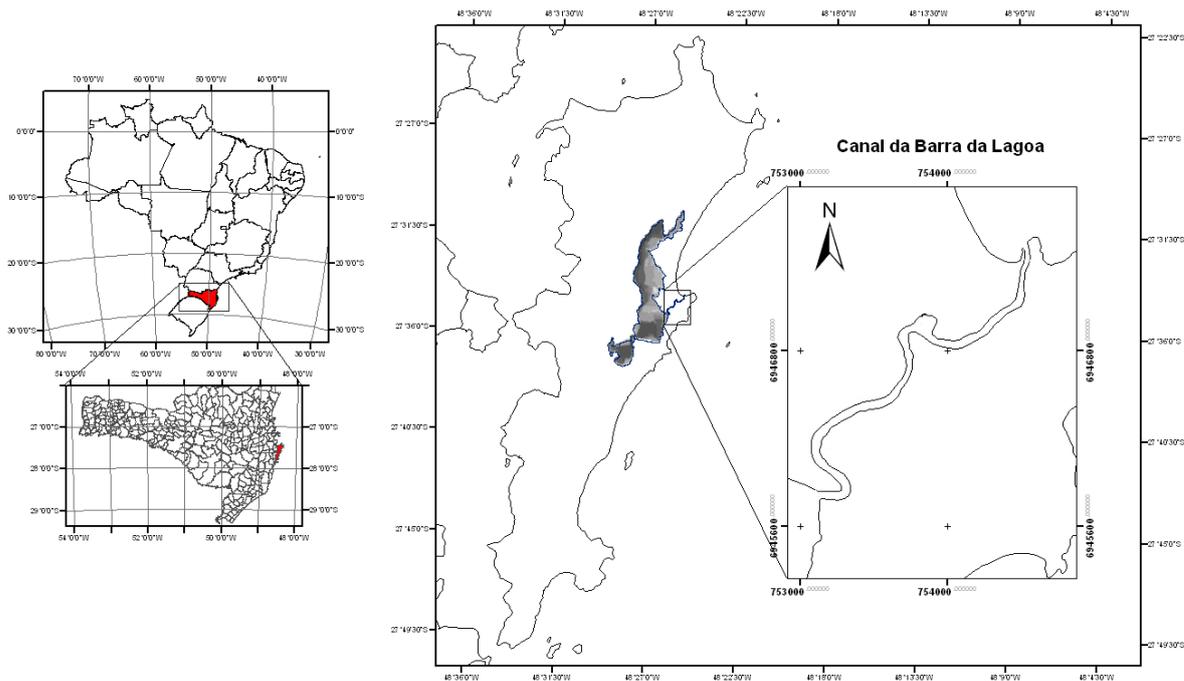


Figura 12. Representação geográfica da área de estudo.

Historicamente o canal apresenta comportamentos morfodinâmicos distintos em função das alterações antrópicas sobre o local. Sua conexão externa era periodicamente bloqueada pela deposição de sedimentos provenientes de processos sedimentares na porção sul da praia da Barra da Lagoa. Este fenômeno trazia diversos problemas socioeconômicos para a comunidade local, além de causar uma estagnação e confinamento das águas da Lagoa da Conceição, acarretando na degradação das condições de manutenção da biota (Sierra de Ledo & Soriano-Sierra, 1999).

Dragagens foram realizadas nos anos de 1954, 1955 e 1968 (as duas primeiras pelo Departamento Nacional de Portos e Vias Navegáveis e a última pelo Departamento Nacional de Obras e Saneamentos), sendo a efetiva estabilização do canal dada pela construção do molhe na desembocadura e

uma última dragagem realizada em 1985 (Pereira, 2004). Desde então o canal permanece estável quanto sua seção transversal e posição.

## 4.2 Dados hidrodinâmicos

A circulação da água no Canal da Barra é dominada pela forçante da maré, diferente da Lagoa da Conceição a qual é dominada pela ação do vento (Sierra de Ledo & Soriano-Sierra, 1999; Andrade 2001). A região está sujeita a um regime de micromarés, e no canal, segundo o estudo realizado por Godoy et. al. (2008), a maré local foi classificada como mista com predominância semi-diurna, porém com diferentes valores do número de forma para a desembocadura marinha e lagunar (0,47 e 0,75, respectivamente), demonstrando a importância dos constituintes diurnos na porção interna.

Diversos trabalhos relatam o caráter atenuador do canal da Barra da Lagoa sobre a maré ao longo de seu trecho interno (Rosman, 1996; Porto Filho & Bonetti, 1997; Andrade, 2001; Pereira, 2004; Rocha, 2007; Godoy et. al. 2008, Godoy, 2009). Os valores percentuais de amortecimento na amplitude da maré variam de 84 à 95% entre a desembocadura externa e a Lagoa da Conceição, com uma defasagem de 3,5 horas para preamar e de 1,5 para baixamar. Segundo Andrade (2001), os períodos de enchente são menores que os períodos de maré vazante. Esse comportamento é típico de ambientes estuarinos e canais de maré, sendo efeito de processos não lineares advectivos e friccionais do canal e da interação da maré com a geometria do mesmo (Lincoln & Fitzgerald, 1988). Para manter o balanço de massa,

entretanto, espera-se uma maior velocidade das correntes de maré enchente, o que é corroborado nas observações de maré realizadas por Pereira (2004).

### 4.3 Usos e ocupação

As margens do Canal da Barra da Lagoa são historicamente ocupadas de maneira desordenada pela comunidade da Barra da Lagoa e da Fortaleza da Barra da Lagoa. Segundo Bittencourt (2005) as seguintes leis são desrespeitadas quanto à ocupação da orla do canal:

- Código de Águas : define os terrenos para passagem com 15 metros livres para circulação em relação à margem;
- Lei 7.803/89 – Código Florestal de 89: define como Áreas de Preservação Permanente a faixa de 50 metros da margem de cursos de água com larguras de 10 a 50 metros de largura;
- *Os terrenos de marinha são bens públicos dominiais pertencentes à União. Todavia conforme a Lei 9.636/98 no art. 11 e parágrafo 4o determina que seja obrigação do Poder Público federal, estadual e municipal, zelar pela manutenção das áreas de preservação ambiental, das necessárias à proteção dos ecossistemas naturais;*
- *Plano Diretor dos Balneários Lei Municipal nº 2.193/85: estabelece 15 metros da orla do canal para ser usado como faixa sanitária para a desobstrução e limpeza das águas do canal, para circulação de pessoas, para a pesca, navegação e recreação, não sendo permitida construções dentro desta área.*

A figura 13 apresenta os panoramas da situação real e de um estado em conformidade às leis restritivas de ocupação.



*Figura 13. Simulação da preservação da orla do Canal da Barra da Lagoa e a ocupação atual. Fonte: Quick Bird fusão multiespectral + pancromática, 2002. Cedida pelo Laboratório de Oceanografia Costeira, UFSC, apud Bittencourt (2005).*

O mesmo autor afirma que os principais usos e conflitos do Canal da Barra da Lagoa estão relacionados à pesca, ao comércio (bares, pousadas e restaurantes), às construções privadas (residências, trapiches, muros e cercas), ao lazer náutico e recreativo, e aos órgãos gestores.

## 5 Materiais e Métodos

### 5.1 Levantamento geofísico acústico

A campanha de aquisição de dados geofísicos do Canal da Barra da Lagoa foi realizado no dia 11/12/2013, fazendo parte de uma série de

levantamentos do Projeto MMA-Riscos financiado pelo Ministério do Meio Ambiente e de responsabilidade do Laboratório de Oceanografia Costeira (LOC), UFSC. A fase de planejamento das campanhas consistiu no reconhecimento prévio da área de estudo através de cartas náuticas, análise da maré e de condições do tempo, e do traçado das linhas de aquisição dos dados segundo as especificações propostas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação publicadas na NORMAM-25, garantindo 100% de cobertura do fundo para um levantamento de classe B. Dada a geometria do canal, sendo estreito e com talvegue para navegação restrito, duas linhas foram suficientes, partindo da Lagoa da Conceição e voltando novamente da desembocadura externa ao ponto de partida no começo do canal.

## 5.2 Equipamentos utilizados

- *Edgetech 4600*: sistema interferométrico que coleta simultaneamente dados de batimetria de varredura e imagens de sonar de varredura lateral. A frequência de trabalho é de 540kHz e o feixe de varredura trabalha com aberturas de até 12 vezes a profundidade. A resolução de alcance (*range resolution*) é definida como o mínimo espaçamento entre dois refletores que podem ser separados e detectados por dois ecos distintos. Para a batimetria a resolução de alcance é de 3cm e do sonar de varredura lateral de 1,5cm com uma resolução ao longo da linha de navegação dada pelo produto da distância do transmissor e o alvo do local e a abertura do feixe acústico (0,5°).

- MRU (*Motion Reference Unit*) SMC IMU-108: responsável por registrar e corrigir os movimentos da embarcação (*heave*), laterais (*roll*) e Proa/Popa (*pitch*), detém as seguintes características: acurácia angular estática de  $0.002^\circ$  rms; acurácia angular dinâmica de  $0.03^\circ$  rms; resolução angular de  $0.001^\circ$ ; resolução de *heave* de 0.01m; ângulo de alcance do *pitch/roll* de  $\pm 30^\circ$ ; alcance do *heave* de  $\pm 10$ m; precisão do *heave* de 5cm ou 5%; acurácia dos acelerômetros de  $0.01 \text{ m/s}^2$  rms.
- DGPS Novatel FlexPak6: foi empregado na coleta da posição geográfica da embarcação quando em deslocamento e da orientação em relação ao norte verdadeiro (Heading). Possui as seguintes especificações: banda dupla L1/L2 com coleta de Heading; assinatura Omnistar XP com acurácia no posicionamento de 0.15m.
- SVP Odom Digibar S: trata-se de um perfilador de velocidade do som é utilizado durante os levantamentos com a finalidade de mensurar as velocidades ao longo da coluna d'água e posteriormente utilizá-las no processamento dos dados batimétricos adquiridos, corrigindo o tempo de ida e volta do sinal acústico enviado pela Interferômetro Edgetech 4600. O alcance da velocidade é de 1400-1700 m/s; a resolução da velocidade é de 0.1m/s; a acurácia da velocidade é de  $\pm 0.05 \text{ m/s}$  rms. A memória pode estocar até 250 perfis e dados de temperatura e pressão também são coletados.

### 5.3 Instalação e calibração dos equipamentos

A instalação do interferômetro foi feita a bordo da embarcação através de uma estrutura fixa, ou *pole* (figura 14). Feita a instalação foram determinados os valores dos *offsets*, que são as medidas existentes entre o ponto de origem xyz (0,0,0) em relação aos equipamentos utilizados no levantamento hidrográfico. O centro de origem foi definido como o compensador de movimentos (MRU), posicionado o mais próximo possível do centro de massa da embarcação. A partir deste ponto foram definidas as distâncias dos transdutores e da antena do sistema DGPS. A medida dos equipamentos em relação à linha d'água também foi realizada. Todos os dados foram inseridos no módulo de aquisição de dados do programa Hypack, Hysweep Survey



Figura 14. Imagem da central de controle da batimetria, sonografia e navegação (à esquerda) e do sonar Edgetech 4600 instalado na lateral da embarcação através de uma estrutura fixa (à direita).

Para a calibração dos equipamentos a abordagem chamada de *patch test* foi realizada em campo. O propósito do *patch test* é a correção de erros

sistemáticos provenientes do posicionamento e ângulos de montagem dos diferentes sensores, partindo do princípio da repetibilidade onde um alvo posicionado em um ponto sobre o fundo deve parecer o mesmo, qualquer que seja o azimute, a velocidade ou a movimentação da embarcação quando for sondado. Os parâmetros avaliados são a latência, *pitch*, *roll* e *yaw*. A latência está relacionada com o atraso de transmissão de dados de posicionamento e profundidade, e os outros três parâmetros estão relacionados ao ângulo de montagem do sonar e alinhamento com a horizontal e eixo do rumo, sendo avaliados nos testes os deslocamentos entre alvos no sentido da navegação (latência, *pitch*, *yaw*) e no seu sentido transversal (*roll*). Os valores do teste são calculados e inseridos no software para correta aquisição dos dados.

O sistema geodésico de referência utilizado na aquisição dos dados foi o datum WGS84. O padrão de abertura de feixe batimétrico definido para o projeto foi de 400 feixes com 0,20m de diâmetro, totalizando 80m de varredura. Para o sonar de varredura lateral uma cobertura de 50m para cada lado (100m no total) foi estabelecida.

#### 5.4 Processamento dos dados batimétricos

O processamento da batimetria foi realizado no módulo HYSWEEP do software HYPACK® 2013, sendo concluído em três estágios (figura 15).

No primeiro estágio foram inseridos os perfis da velocidade do som (figura 16) os quais foram adquiridos duas vezes durante a campanha pelo perfilador *SVP Odom Digibar S*, lançando o equipamento até o fundo para registro das velocidades do som ao longo da coluna d'água, e assim todas as

linhas sondadas foram corrigidas de acordo com a respectiva hora, visando aumentar a precisão da velocidade de propagação do som na água e a acuraria da medida vertical da profundidade em função da mesma.

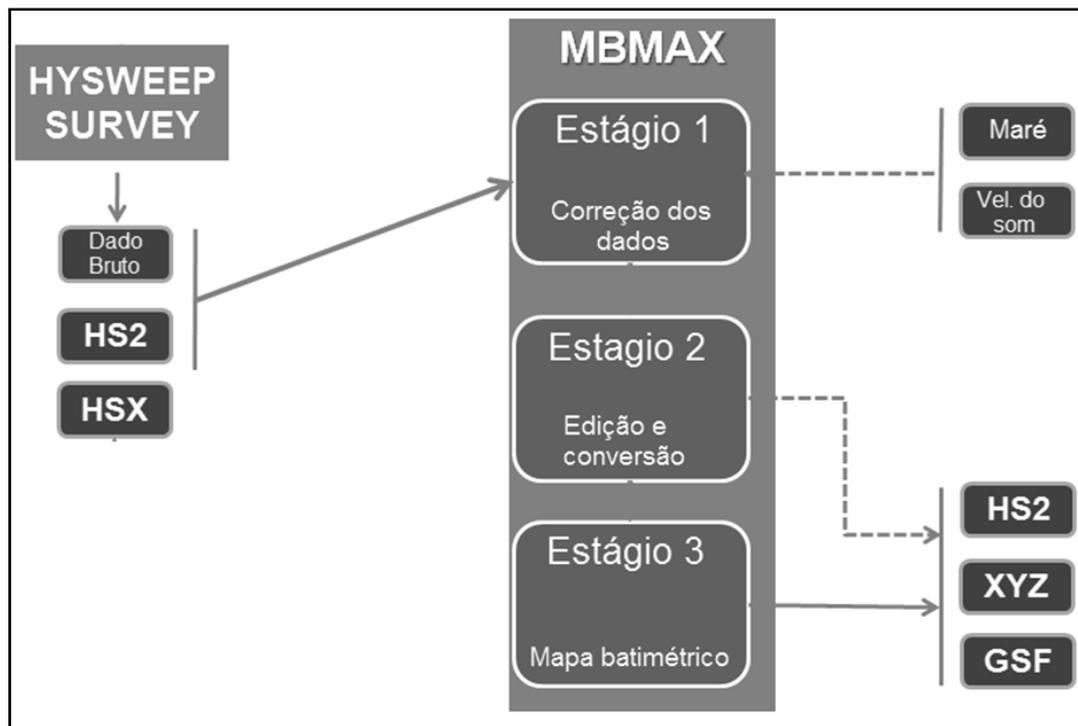


Figura 15. Fluxograma do processamento de dados batimétricos. Adaptado de HYPACK 2013 TRAINING NOTES.

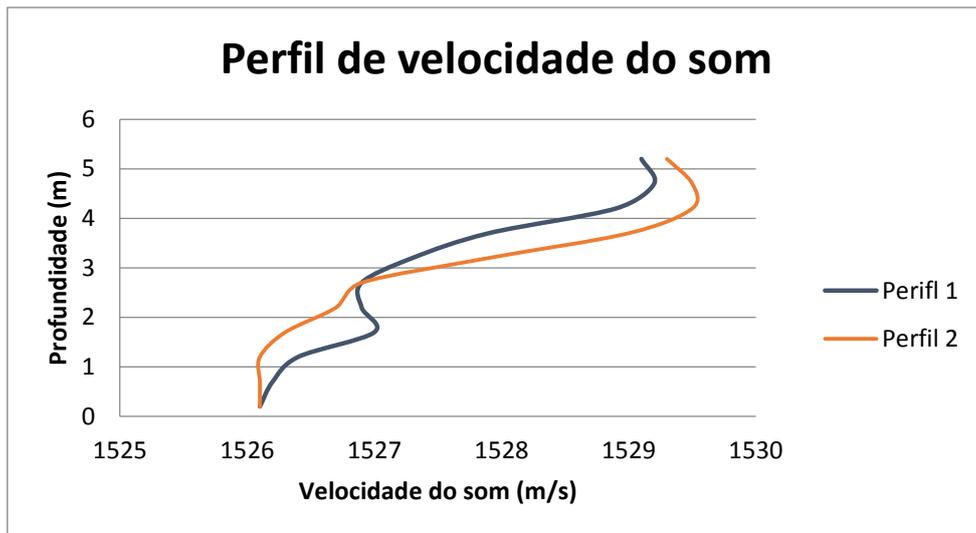


Figura 16. Perfis de velocidade do som adquiridas na porção mais profunda do Canal da Barra da Lagoa (quadro 1 da figura 20).

No segundo estágio os dados foram editados através de perfis perpendiculares às linhas adquiridas para remoção manual dos dados espúrios (figura 17).

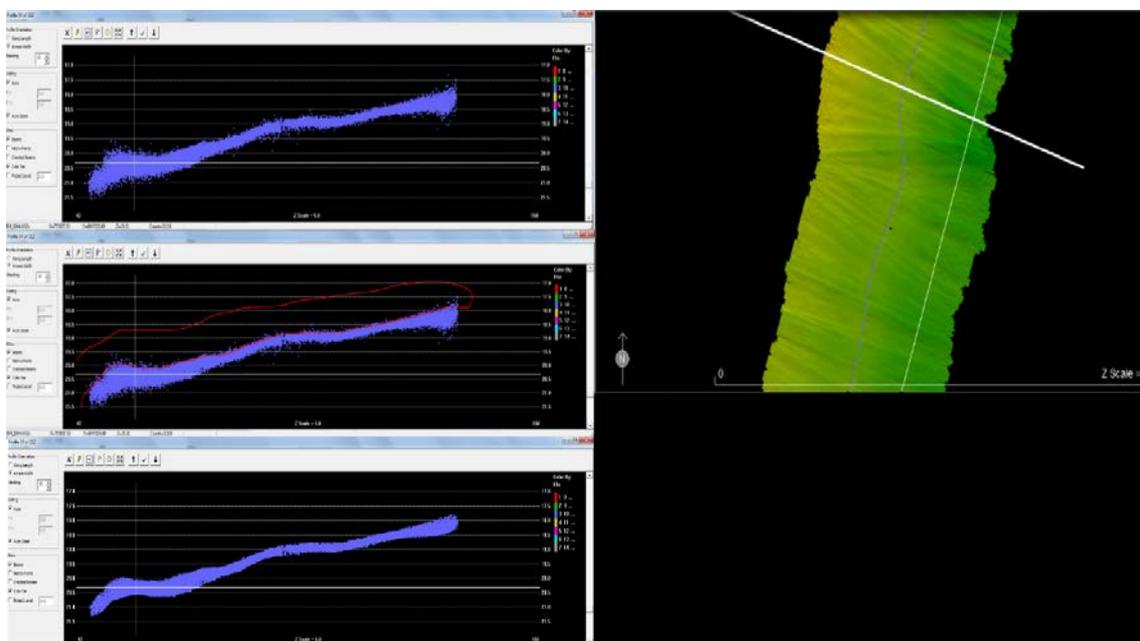


Figura 17 Edição da batimetria e remoção dos dados espúrios.

No terceiro estágio as linhas foram agrupadas e então exportadas em arquivos XYZ, sendo latitude (X), longitude (Y) e cota (Z), para posterior interpolação. Os dados foram exportados em matrizes quadradas com resolução da célula de 0,75m x 0,75m .

Devido à densidade de dados, as técnicas de interpolação não apresentaram diferenças. Assim, em função da configuração da matriz quadrada, foi utilizada a técnica do vizinho mais próximo (Manual Surfer, 2013).

## 5.5 Processamento da sonografia

O processamento da sonografia foi realizado no *software* SonarWiz5®. O primeiro passo foi carregar os dados sonográficos de cada linha sondada, selecionando o sistema de coordenadas utilizado no levantamento (WGS84). Após as linhas serem carregadas, as sequências de faixas sonográficas que as compõe são uma a uma processadas, realizando os procedimentos de *bottom tracking*, o qual remove a coluna d'água da imagem (figura 16), e a aplicação de ganhos para melhor visualização. O ajuste dos ganhos baseou-se na preservação das nuances naturais dos sonogramas, na tentativa de não comprometer as características interpretáveis dos dados de sonar sendo utilizado o ganho AGC (Automatic Gain Control).

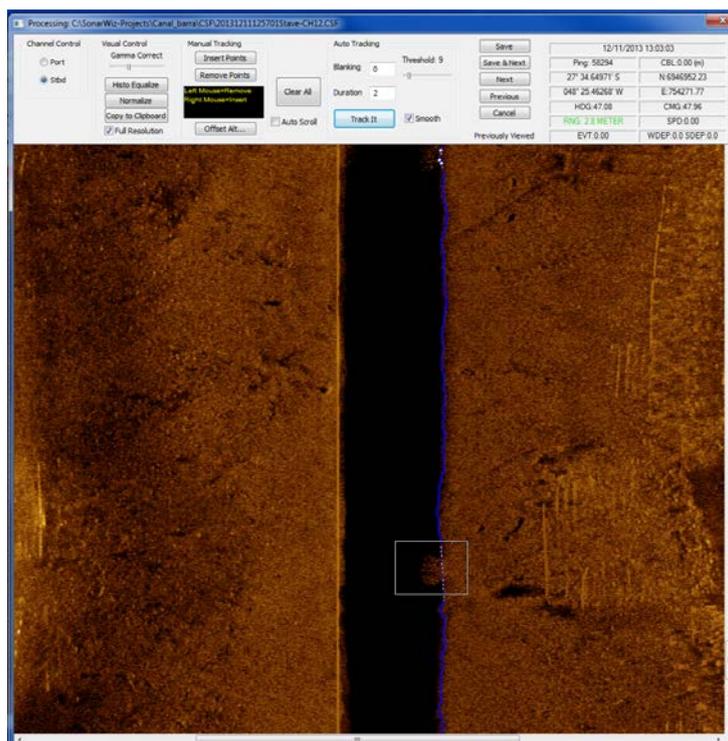


Figura 18. Edição da batimetria e remoção dos dados espúrios.

## 5.6 Correção da maré

A atenuação da maré no Canal da Barra da Lagoa é um fator crucial a ser levado em conta na redução das sondagens. Conforme detalhado em 3.2, a amplitude da maré entre a desembocadura externa e a desembocadura lagunar chega a ser 90% amortecida em função da geometria do canal e do atrito de fundo. Os dados disponíveis para esta correção são oriundos dos marégrafos instalados em píers na Praia da Armação e a poucos metros da desembocadura do canal na Lagoa da Conceição (figura 19). Análises prévias do Laboratório de Oceanografia Costeira concluíram que não há diferença significativa de fase entre a Praia da Armação e a Barra da Lagoa, não havendo problemas em usar esse dado para a desembocadura externa do

canal. Os dados de ambos marégrafos foram amarrados a referências de nível do IBGE através de nivelamento geométrico, e o datum vertical utilizado para a correção foi o nível médio medido ao longo de uma série temporal de 2 anos.



Figura 19. Local de instalação do marégrafo utilizado na porção interior do Canal da Barra da Lagoa.

A interpolação da maré ao longo do meio do canal onde não houveram medições foi feita através de uma ferramenta do software Hypack para levantamentos hidrográficos em áreas com múltiplas estações maregráficas. O método de interpolação utilizado por este recurso é uma regressão linear simples. Os dados de correção de cada marégrafo devem ser inseridos com os respectivos horários, assim como uma linha de referência ao longo da área com a distância de cada um dos equipamentos em relação à mesma. A partir destes valores são calculados os valores de correção de maré para a batimetria nas áreas sem registros no meio do canal.

## 5.7 Geração do mapa batimétrico

Após a batimetria ser processada, o arquivo xyz foi exportado com células de 0,75m x 0,75m e uma malha foi gerada através do software Surfer. Este tamanho de célula foi escolhido por apresentar a melhor relação entre resolução e ruído na visualização do dado.

A malha foi importada para o software Global Mapper e o mapa batimétrico gerado foi sobreposto a uma imagem aérea de alta resolução da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS) do ano de 2010 na escala de 1:5000.

## 5.8 Caracterização sonográfica

A caracterização sonográfica do Canal da Barra da Lagoa foi feita através da análise dos sonogramas e dos diferentes contrastes do retroespalhamento, cujas correlações com os tipos de substratos que compõem o leito foram identificadas e descritas separadamente. Foram selecionados alvos com as principais assinaturas acústicas encontradas ao longo da área de estudo e sua descrição foi feita através de interpretação visual bem como por registro fotográfico realizado por meio do mergulho autônomo nos locais dos alvos, procurando investigar o tipo de material correspondente a cada padrão de refletividade e suas principais propriedades.

Na análise das feições de leito do canal, as principais imagens dos sonogramas dessas feições foram selecionadas para auxílio na interpretação de seus atributos e na sua caracterização.

## 5.9 Registro fotográfico

Para compreender as respostas acústicas dos diferentes materiais e substratos que se encontram no domínio submerso do Canal da Barra da Lagoa, foi realizado um registro fotográfico dos alvos selecionados para a caracterização sonográfica.

A sonografia foi sobreposta às mesmas imagens da SDS utilizadas na batimetria, e os alvos selecionados foram assinalados nesta figura. A imagem serviu para a identificação das referências na margem para localização dos pontos a serem fotografados. Com o auxílio de um caiaque para percorrer o canal em busca dos pontos (figura 19), e de um Sonar Humminbird 398 Ci Si que conta com a tecnologia *Side Imaging* similar a do sonar de varredura lateral, os pontos foram facilmente localizados.

As imagens foram feitas por uma câmera GoPro Hero 3 Black através de mergulho autônomo de apnéia.



Figura 20. Caiaque e sonar Humminbird 398 Ci Si utilizados na localização dos alvos selecionados para registro fotográfico.

## 5.10 Análise das formas de leito

As feições de leito encontradas na batimetria e no imageamento sonográfico foram analisadas e classificadas segundo as especificações de Ashley (1990). Da batimetria foram extraídos perfis transversais à direção de migração das feições para melhor identificação de seus principais atributos, são eles: (1) Altura; (2) Comprimento ou espaçamento; (3) Forma e (4) direção de migração.

Através dos resultados, foram feitas interpretações quanto à dominância direcional das correntes de maré das diferentes áreas com campos de formas de leito.

## 5.11 Análise de sedimentos

Foi realizada a análise granulométrica de sedimentos do fundo coletados no local indicado na figura 21, com o intuito de se ter um maior detalhamento

sobre o padrão de refletividade acústica em função do tamanho de grão. Um analisador de partículas Horiba LA – 950 foi utilizado para este propósito.

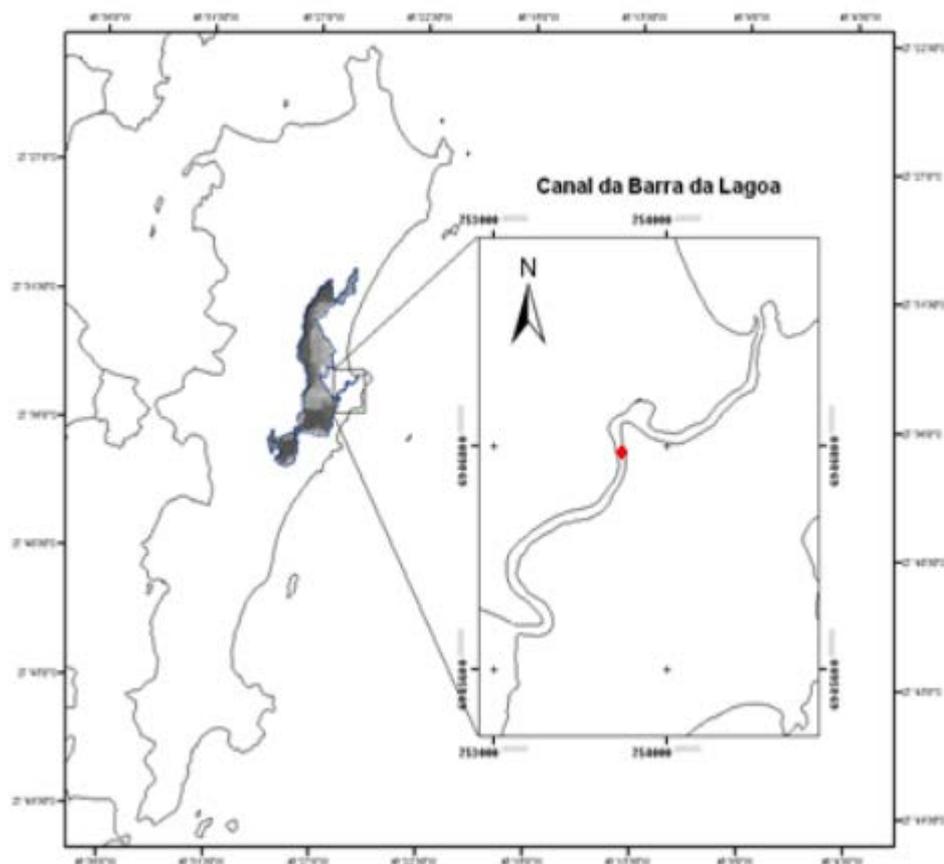


Figura 21. Local da amostragem de sedimentos indicado em vermelho no mapa.

## 6 Resultados e discussão

### 6.1 Batimetria

A batimetria de varredura realizada pelo sonar interferométrico Edgetech 4600 é apresentada na figura 18. Em função da resolução elevada das imagens, foram selecionados quadros que demonstram as principais características morfológicas do Canal da Barra da Lagoa e de desempenho do

51

equipamento utilizado. O mapa batimétrico final apresentou uma qualidade de resolução capaz de identificar pequenas feições na ordem de 30 centímetros, a exemplo das dunas submersas identificadas (veja em 6.4). Os dados exportados no formato XYZ contaram com células de 0,75 x 0,75m. Este valor foi escolhido por resultar em uma melhor visualização do mapa batimétrico, comparando com os resultados da interpolação para células de 0,25 x 0,25m e 0,5 x 0,5m.

A profundidade média do canal é de 2,28m, com valores máximo e mínimo de 7,34m e 1,03m, respectivamente. A região onde foi identificada a maior profundidade (quadro 1 da figura 21) corresponde ao trecho onde há a maior redução da área de escoamento, o que implica em um aumento da velocidade das correntes de maré e transporte de sedimentos. Este mesmo processo ocorre próximo à desembocadura lagunar (quadro 3 da figura 21) cuja menor profundidade é explicada pelo fato da área de escoamento não ser tão reduzida em comparação à supracitada e as velocidades das correntes serem menores em função da atenuação da maré ao longo do canal.

# Batimetria do Canal da Barra da Lagoa

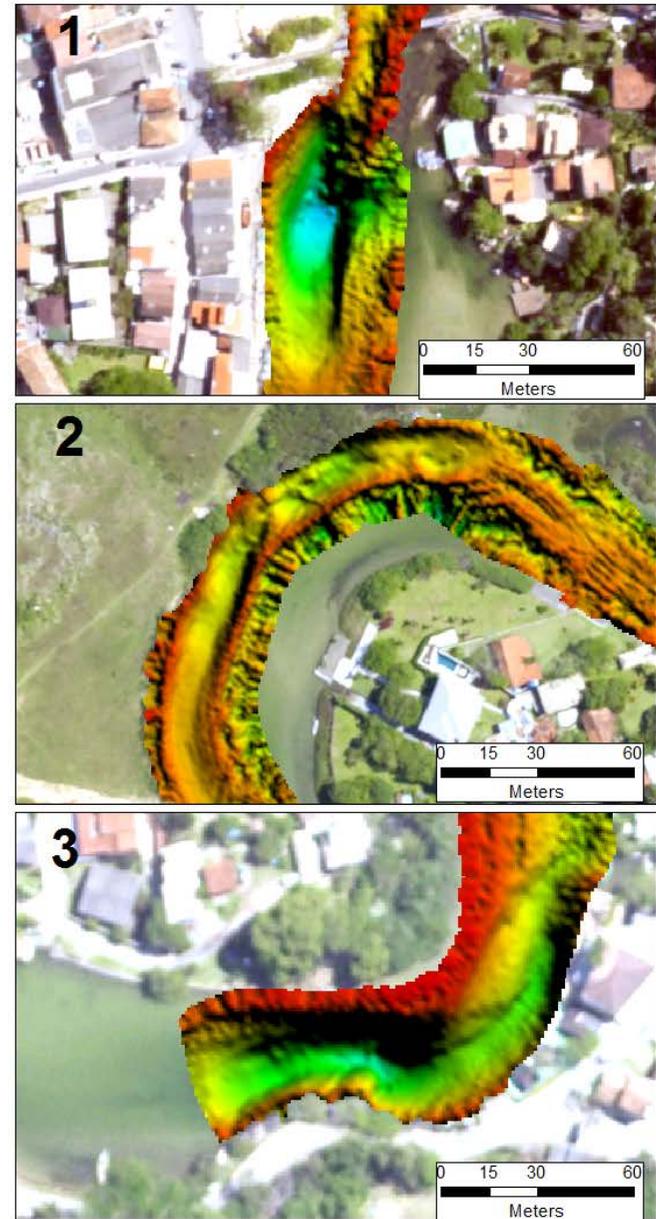
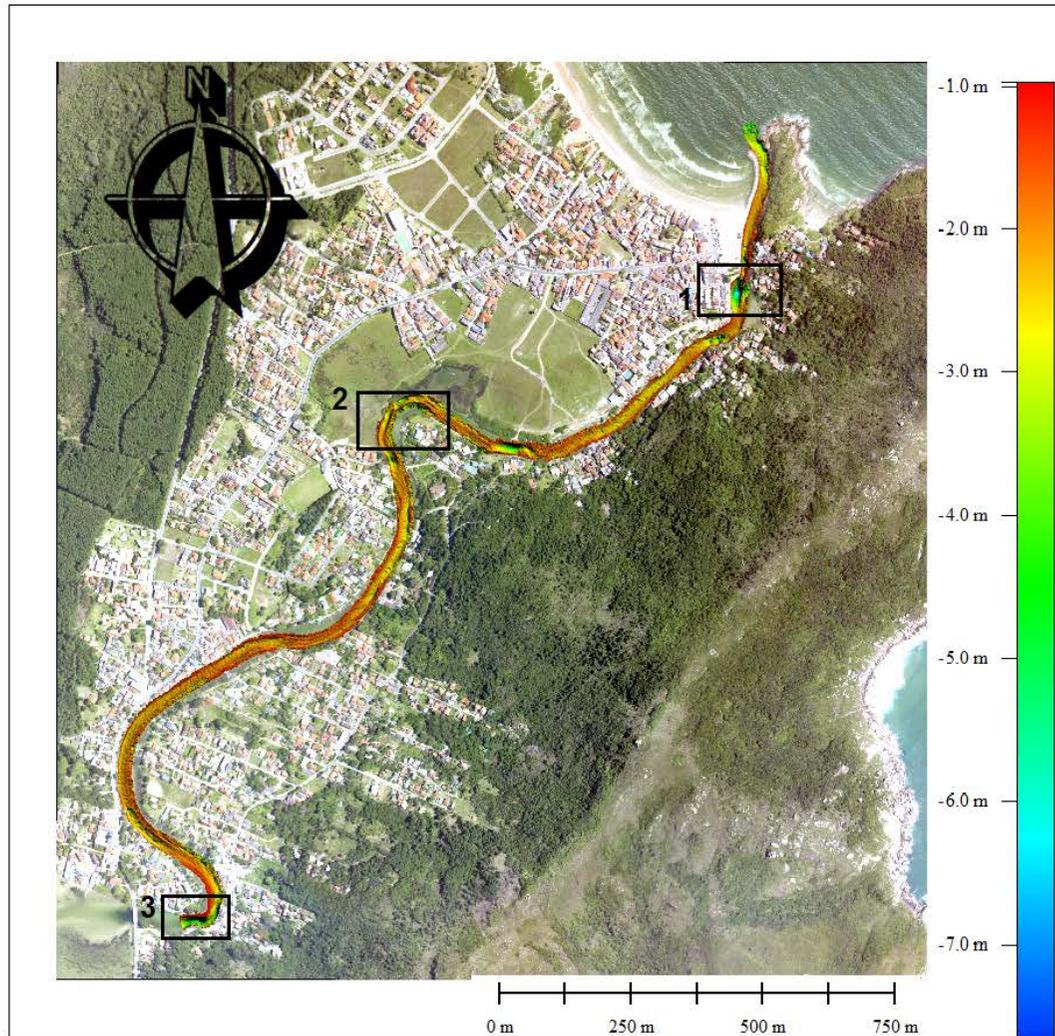


Figura 22. Mapa batimétrico da Barra da Lagoa.

No canal da Barra da Lagoa, as menores profundidades estão localizadas na porção interna dos meandros. No mapa batimétrico pode-se observar que nessas regiões, especialmente no primeiro meandro que possui a maior curvatura e área mais rasa (quadro 2 da figura 21), o registro acústico apresentou baixa qualidade. Esse problema provém de um erro recorrente em sistemas sonares diferenciadores de fase em que múltiplos sinais chegam aos receptores no mesmo instante, resultando em uma detecção errônea da posição, chamado de *multipath* na literatura (Denbigh, 1989; Bird *et. al.*, 2011; Saucan *et. al.*, 2012). Nos levantamentos de campo, através do mergulho autônomo, verificou-se uma profundidade aproximada variando entre 30cm a 1m nesta área, sendo uma profundidade altamente passível às várias possibilidades de múltiplos caminhos do sinal (figura 22), principalmente provenientes das extremidades da área de varredura do sonar onde os ângulos de incidência do feixe são maiores.

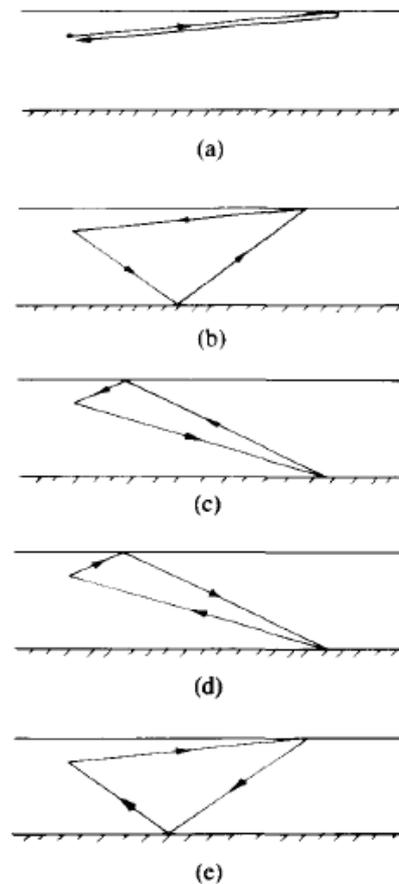
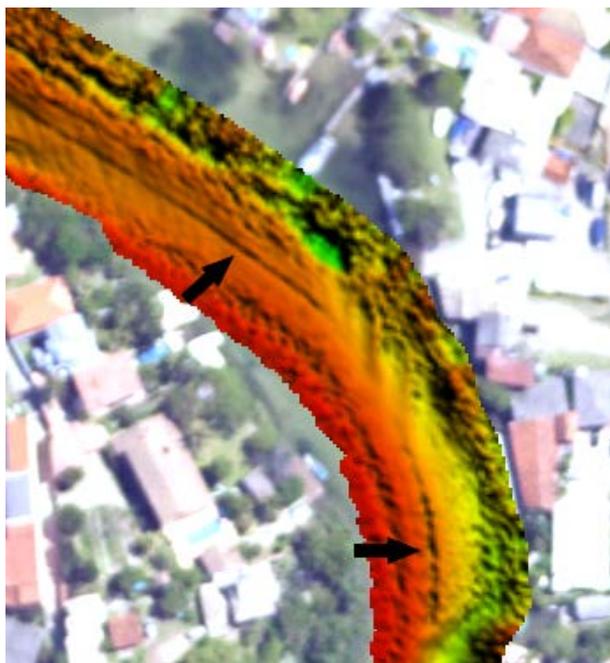


Figura 23. Representação dos caminhos múltiplos do eco: (a) Transdutor-backscatter da superfície da água-receptor; (b) Transdutor-espalhamento do fundo- backscatter da superfície da água-receptor; (c) Transdutor-backscatter do fundo-espalhamento da superfície da água-receptor; (d) Transdutor-espalhamento da superfície da água-backscatter do fundo-receptor; (e) Transdutor-backscatter da superfície da água-espalhamento do fundo- receptor. Denbigh (1989).

Outra interferência atribuída ao fenômeno *multipath* são as marcas imediatamente abaixo da linha de navegação (Figura 23). Hiller (2012) avaliou as incertezas das medições batimétricas do sonar Edgetech 4600 em águas rasas e detectou esta mesma ocorrência.



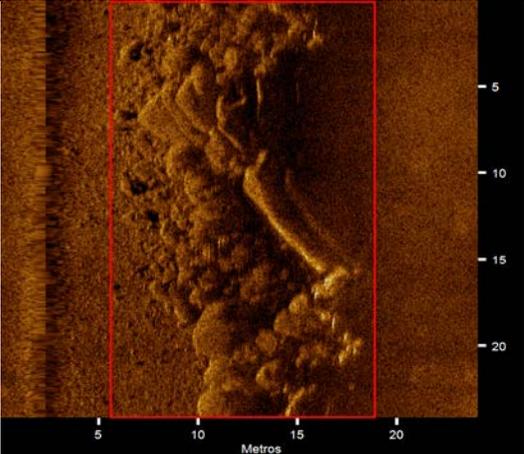
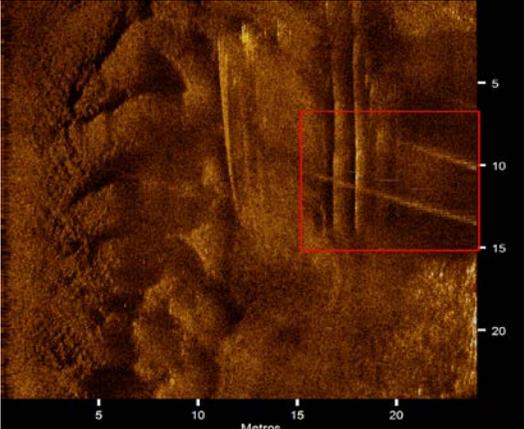
*Figura 24 Marcas abaixo da linha de navegação atribuídas ao erro multipath*

No tocante à redução das sondagens, a interpolação linear realizada pelo *software* de processamento da batimetria pode ser considerada uma fonte de erro nas medidas de profundidade. Idealmente, em um ambiente estuarino hiposíncrono com acentuada atenuação da maré como é o caso do Canal da Barra, deve-se empregar mais medições de nível da água ao longo de sua área além das duas extremidades. No entanto, as sondagens foram realizadas sobre maré de quadratura e em um curto período de tempo (aproximadamente 1 hora), o que minimiza o erro atribuído à interpolação linear da maré em função da menor variação do nível nessas condições.

## 6.2 Sonografia

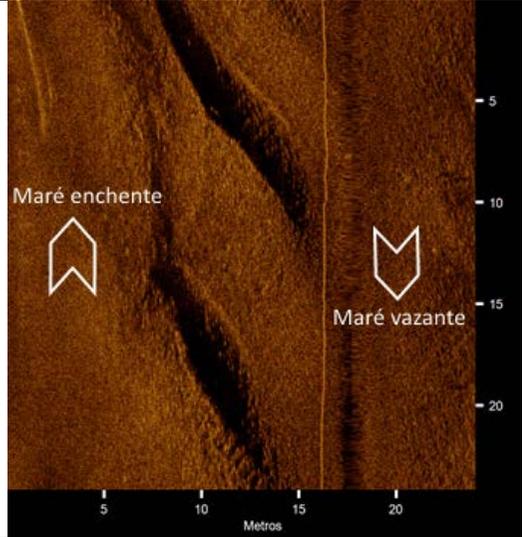
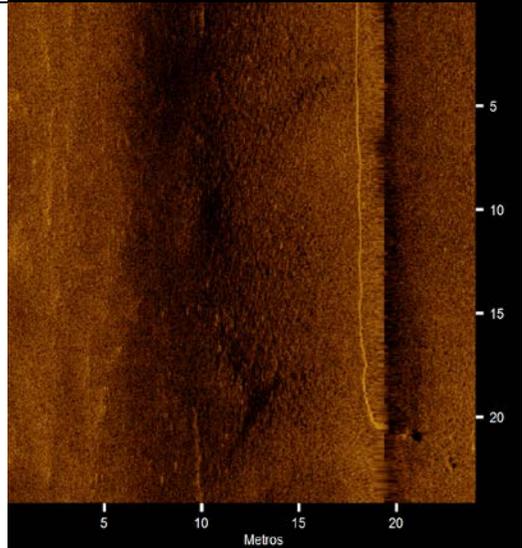
Através da análise dos sonogramas do canal da Barra da Lagoa, foram identificadas diferentes assinaturas acústicas para os diversos substratos que compõem seu leito. A caracterização sonográfica do canal foi dada por meio de uma seleção de alvos que representam os tipos de feições acústicas de seu domínio e as formas de leito identificadas, os quais são apresentados nos quadros 2 e 3, respectivamente. O quadro 4 demonstra os erros encontrados nos sonogramas que refletem o desempenho do equipamento, bem como problemas do levantamento em si.

Quadro 2. Caracterização sonográfica do Canal da Barra da Lagoa.

IMAGEM DO ALVO	REGISTRO FOTOGRÁFICO	INFORMAÇÕES DO ALVO
		<p><b>Afloramento rochoso</b></p> <p>Apresenta um alto padrão de refletividade acústica e textura rugosa.</p> <p>Em função da geometria complexa os valores de retroespalhamento são heterogêneos sobre as superfícies do afloramento.</p>
		<p><b>Correntes</b></p> <p>Estruturas rígidas como o metal são eficientes na reflexão de pulsos acústicos, apresentando um elevado retroespalhamento, sendo facilmente distinguíveis no sonograma.</p>

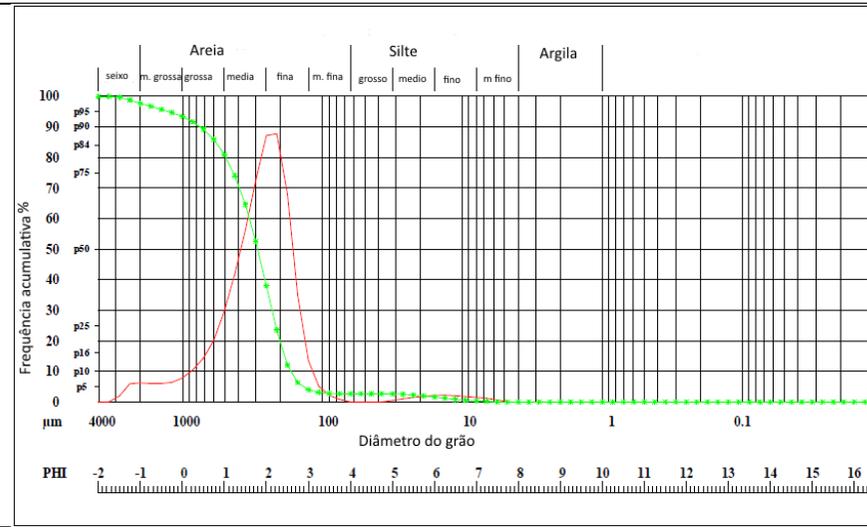
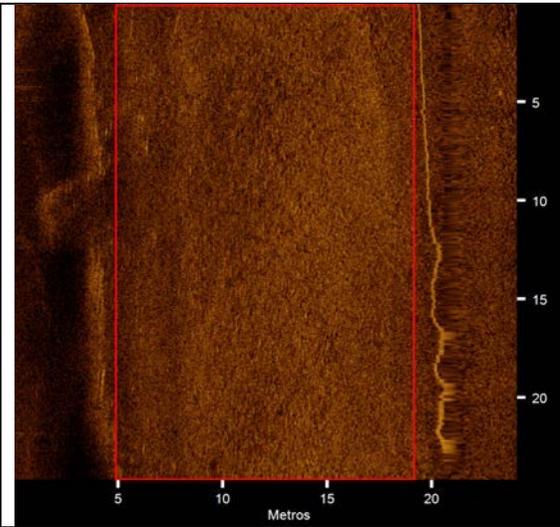
		<h3>Pilastras de um píer</h3> <p>As pilastras são feitas de concreto revestidas com material plástico de PVC. Assim como o metal as estruturas rígidas das pilastras são eficientes refletoras acústicas.</p>
		<h3>Rampa para embarcações</h3> <p>Observa-se que devido ao baixo ângulo de incidência das extremidades da faixa de varredura e a geometria da rampa, somente a face lateral da mesma foi retroespalhada com a intensidade de sinal que caracteriza este tipo de material.</p>

		<p style="text-align: center;"><b>Cascalho</b></p> <p>Esta ecofície apresentou a maior refletividade ao longo de todo o canal. Conforme pode ser visto ao lado no registro fotográfico, trata-se de uma fácies sedimentológica coberta por biodetritos.</p>
		<p><b>Sedimento mais grosso na face íngreme das dunas</b></p> <p>A perturbação causada no escoamento pela forma das dunas causa uma zona de deposição imediatamente na base de sua face íngreme. As faixas com retroespalhamento mais alto representam a maior refletividade de sedimentos arenosos mais grossos em comparação aos sedimentos adjacentes.</p>

	<p>Não foi realizado o registro fotográfico dessa feição.</p>	<p><b>Trem de dunas submersas 1</b></p> <p>A imagem corresponde ao trem de dunas 1. Possuem comprimento na faixa de 10m e altura de 30 à 40cm . As flechas brancas servem para referenciar a direção do fluxo unidirecional da maré.</p>
	<p>Não foi realizado o registro fotográfico dessa feição.</p>	<p><b>Trem de dunas submersas 2</b></p> <p>Esta imagem tem como objetivo a discussão a respeito da capacidade entre a batimetria e a sonografia de identificar essas formas de leito. A mesma imagem é representada na figura 37 da sessão 6.4, e pode-se observar que a batimetria foi capaz de identificar as dunas no local, ao contrário da sonografia como é mostrado ao lado. O trem de dunas submersas 3 não é apresentado pelo mesmo motivo.</p>

			<p style="text-align: center;"><b>Trem de dunas submersas 4</b></p> <p>Pode-se observar nesta imagem, as pequenas rugosidades sobre a duna submersa. É possível observar ao lado no registro fotográfico que se trata de uma duna submersa composta com marcas onduladas (<i>ripples</i>) sobrepostas.</p>
		<p>Não foi realizado o registro fotográfico dessa feição.</p>	<p style="text-align: center;"><b>Trens de dunas submersas 5</b></p> <p>Novamente, a visualização através da sonografia é pouco clara. Este trem de dunas submersas é mostrado na figura 40 da sessão 6.4.</p>

	<p>Não foi realizado o registro fotográfico dessa feição.</p>	<p><b>Trem de dunas submersas 6</b></p> <p>Na desembocadura do canal as dunas são orientadas no sentido de maré vazante e apresentam comprimento médio de 5m e altura de 20 à 30 cm. As flechas brancas servem para referenciar a direção do fluxo unidirecional da maré.</p>
		<p><b>Marcas onduladas sinuosas e depressões</b></p> <p>Esta área, conforme é apresentado no registro fotográfico ao lado, apresenta marcas onduladas sinuosas de pequena escala, associadas com depressões e fundo irregular. Por estar localizada logo após a um afloramento rochoso do meio do canal, a turbulência gerada no escoamento devido a este obstáculo pode explicar a complexidade das feições de leito no local.</p>



## 1) Fundo arenoso

O fundo do canal é composto predominantemente por areia fina e média. A análise granulométrica de uma amostra superficial da área deste sonograma é apresentada no gráfico ao lado.

As estruturas antrópicas dispostas por toda margem do canal são facilmente identificadas pelo distinto padrão de refletividade em relação ao meio natural. Considerando os dados da bibliografia e a confirmação do padrão sonográfico pela análise granulométrica, o domínio sedimentar do fundo do canal apresenta-se relativamente homogêneo com predominância de sedimentos arenosos de granulometria fina à média (FATMA, 1997 *apud* Pereira, 2004).

Na investigação das formas de leito do canal torna-se evidente a prerrogativa do uso do sonar interferométrico sobre a aquisição simultânea de dados batimétricos e sonográficos. Como indicado no quadro 2, algumas feições que não foram possíveis de serem visualizadas no sonograma, tiveram um bom detalhamento morfológico na batimetria de varredura. E da mesma forma, algumas feições como as marcas onduladas (*ripples*) do trem de dunas submersas 4 foram identificados na sonografia, onde o baixo detalhamento é justificável visto que a altura dessas formas de fundo está na ordem de 5 a 10 cm como comprovado visualmente no mergulho realizado.

A geometria do canal e de seu leito pode ser um fator que explica a omissão de alguns trens de dunas submersas nos sonogramas. Por ser estreito e extremamente raso, em muitos locais a incidência do feixe acústico dá-se sobre ângulos praticamente normais ao transdutor, dificultando a presença de contrastes e sombras nas imagens em função da morfologia do fundo (menores ângulo de incidência, apresentam menor retroespalhamento). A hipótese é reforçada pelo fato de que em ambos locais onde não foi possível a visualização das dunas submersas (trens de dunas submersas 2 e 3), o talvegue do canal é íngreme, sendo o único local por onde as embarcações

navegam com segurança nesta área. O perfil do canal nesta área é apresentado abaixo na figura 25.

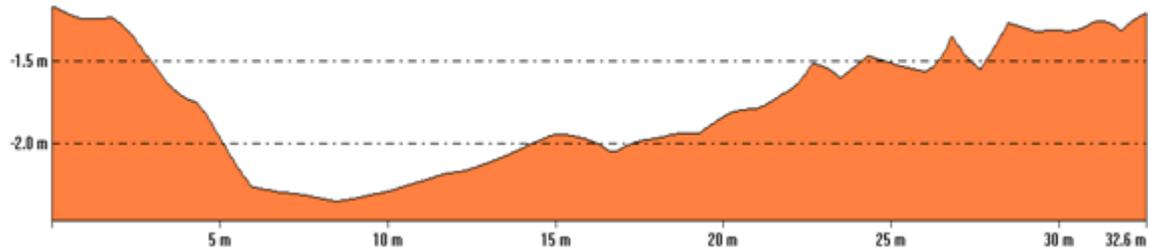
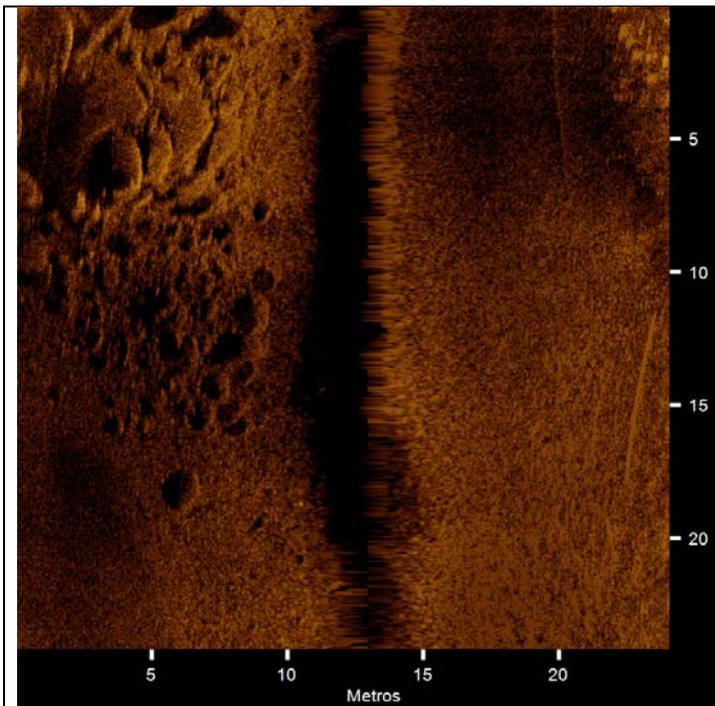


Figura 25. Perfil do canal na área de omissão dos trens de dunas 2 e 3.

O quadro 4 apresenta as imagens com erros de aquisição de dados e do levantamento sonográfico.

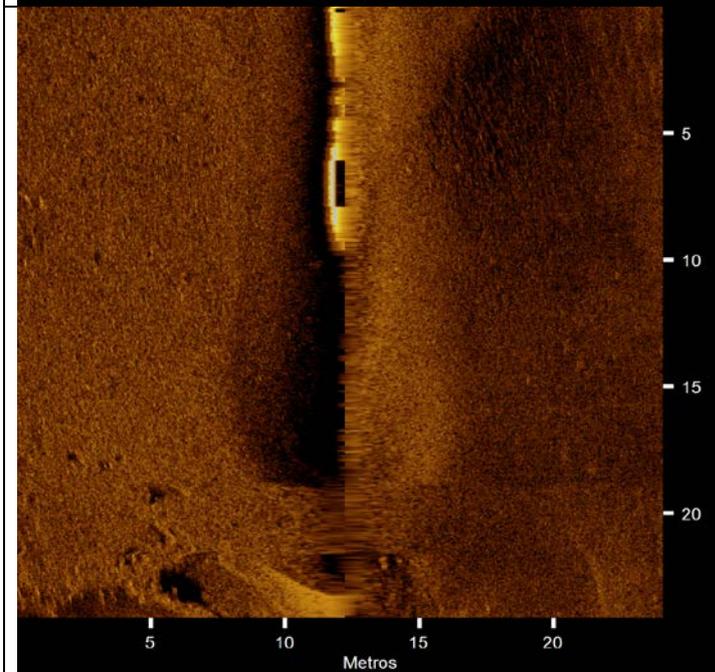
Quadro 3. Erros de aquisição dos dados sonográficos.

IMAGEM DO ALVO	INFORMAÇÕES DO ALVO
	<p>2) Refletividade no nadir</p> <p>Conforme é mostrado na imagem, em alguns pontos mais rasos a intensidade de energia refletida é maior no nadir, não sendo esta a característica real de reflexão do fundo neste local, podendo levar a erros de interpretação.</p> <p>Nesta faixa a altura do transdutor estava a 0,75m do fundo.</p>



### 3) Faixa sem dados no nadir

Este local apresenta um declive muito acentuado (figura 26), sendo a área mais profunda do canal (quadro 1 da figura 31). Possivelmente devido a este fato, a região do nadir apresentou uma falha no registro do sonograma.



### 4) Faixa sem dados no nadir

O mesmo problema da imagem anterior, na segunda área mais profunda do canal (quadro 3 da figura 31).

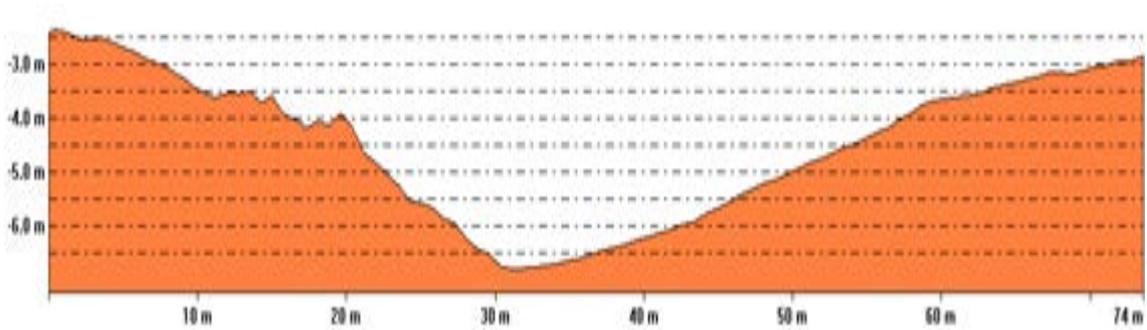
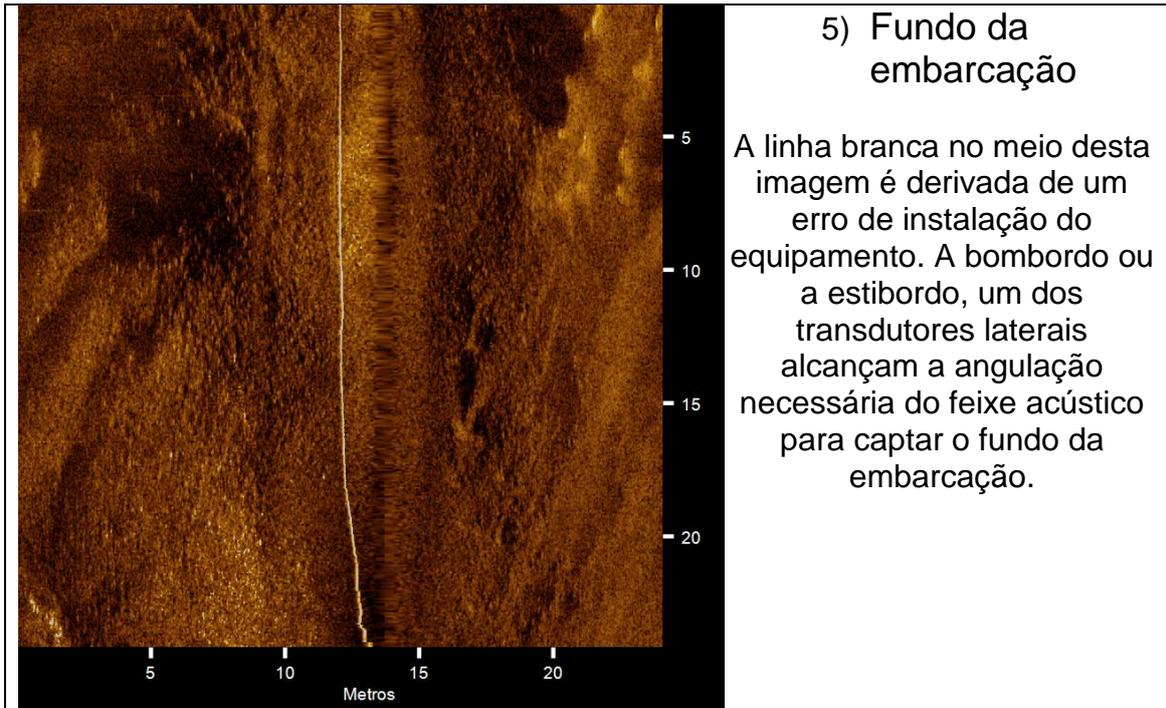


Figura 26. Perfil do fundo do canal paralelo à linha de navegação no local onde houve falha de aquisição dos dados na região do nadir.

### 6.3 Formas de leito

As áreas de ocorrência das formas de leito identificadas através da batimetria de varredura e da sonografia são apresentadas na figura 35. Cada

área é analisada individualmente através de perfis perpendiculares à direção de migração das feições.

As formas de leito captadas pela resolução do mapa batimétrico e do imageamento foram dunas submersas cujas alturas variaram entre 10 e 60cm e o comprimento de 5 à 30 metros. Através do registro fotográfico *in situ* das feições, pôde-se identificar marcas onduladas (*ripples*) sobre as dunas submersas, caracterizando-as como do tipo compostas.

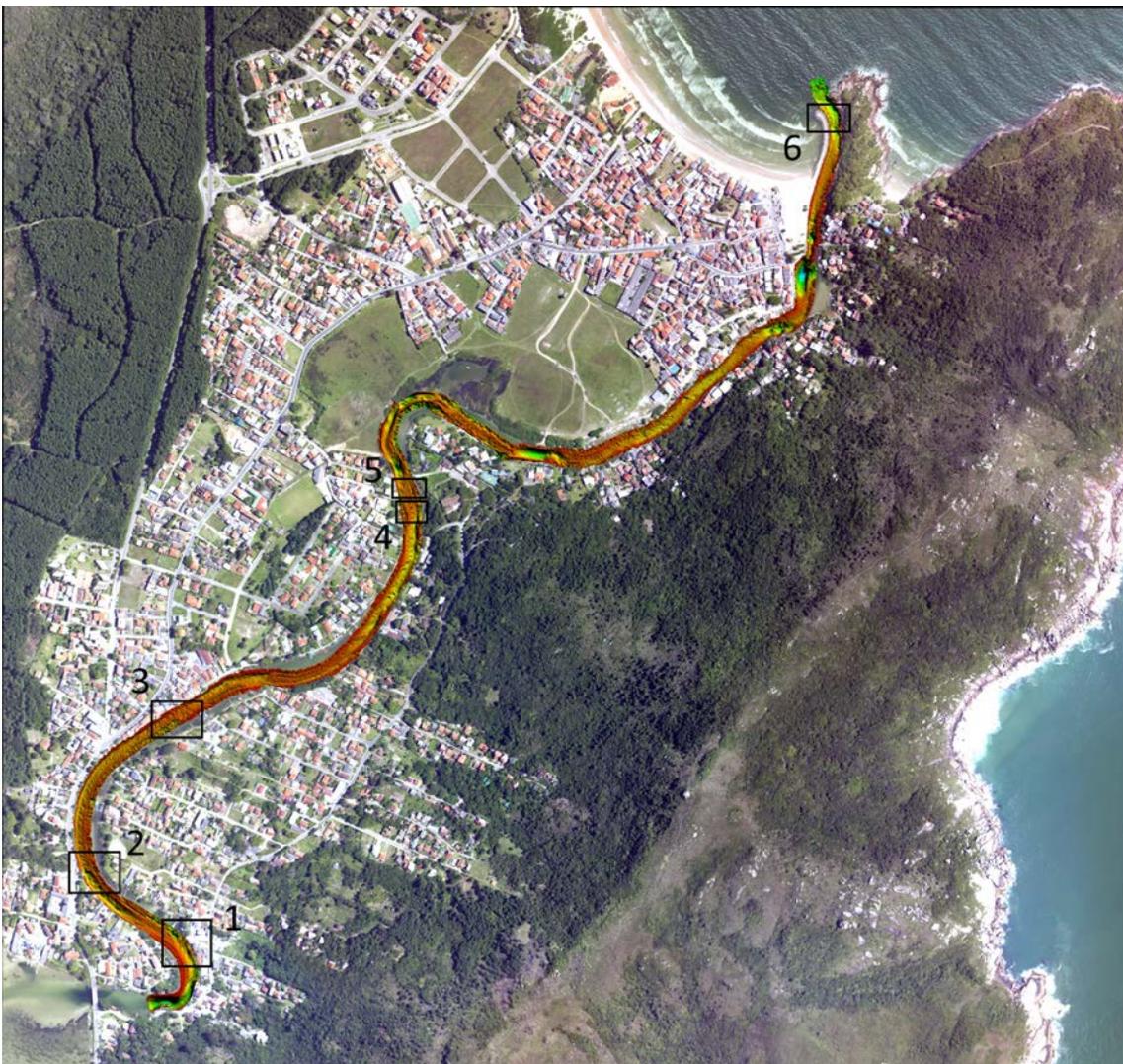


Figura 27. Locais dos trens de dunas identificados.

As dunas da área 1 (figura 36) apresentaram alturas de 20 e 40 cm, com espaçamento entre suas cristas ou cavas na ordem de 13m e forma tridimensional assimétrica. Seguindo os critérios propostos por Ashley (1990), essas dunas submersas são classificadas do tamanho médio. Interessante notar as duas dunas submersas pequenas com altura de 10cm e comprimento de 1m aproximadamente, cujo sentido de migração é contrário às dunas principais e localizadas nas suas faces íngremes. Este fato pode ser explicado pela diferença temporal de respostas da morfologia de feições com diferentes tamanhos em função da frequência das correntes unidirecionais, conforme citado em 3.6. No caso, a dominância no local, conforme a orientação das dunas submersas principais, é na direção das correntes no sentido da maré enchente, e as dunas submersas pequenas estariam orientadas no sentido contrário devido à correntes na direção de maré vazante em uma escala temporal de menor frequência.

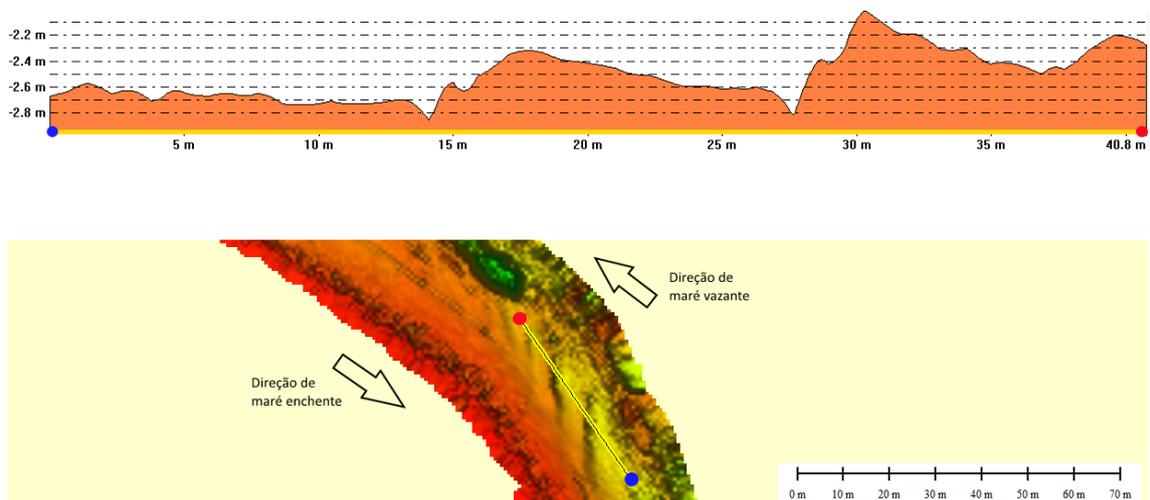


Figura 28. Trem de dunas submersas da área 1.

Nas áreas 2 e 3 as dunas submersas apresentaram espaçamentos de 7 à 14m e alturas de 15 à 60cm (figura 37 e 38, respectivamente), com forma tridimensional e assimétrica, e assumindo o mesmo critério anterior, são também compostas e de tamanho médio. No entanto a orientação de migração é oposta, na direção de maré enchente. Segundo Miranda *et.al* (2002) em estuários o sistema é dominado por correntes de maré, onde a direção do fluxo se reverte regularmente e os padrões associados à circulação de enchente e vazante comumente não coincidem. Desta forma é possível haver variação espacial de áreas dominadas por maré enchente e outras dominadas por maré vazante.

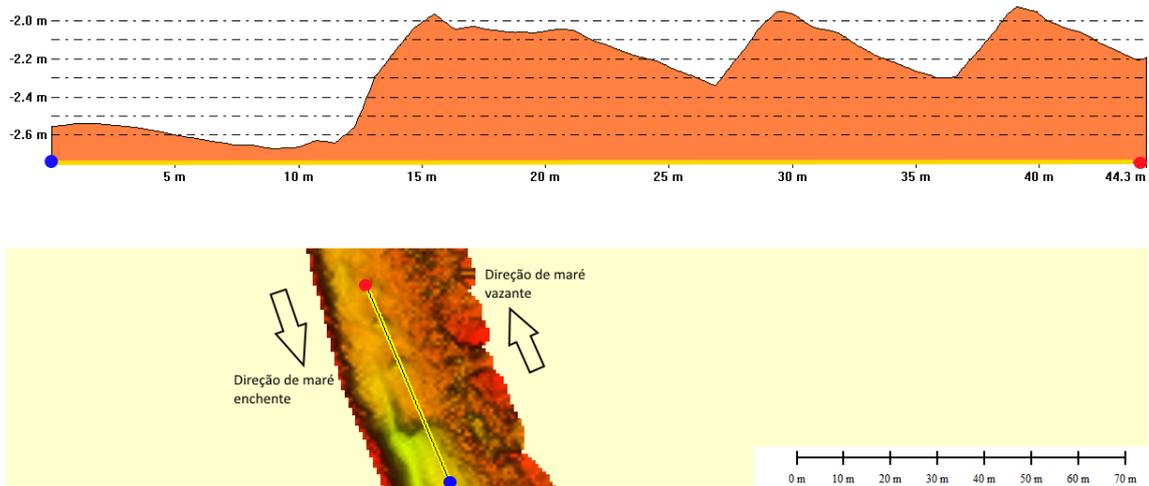


Figura 29. Trem de dunas submersas da área 2.

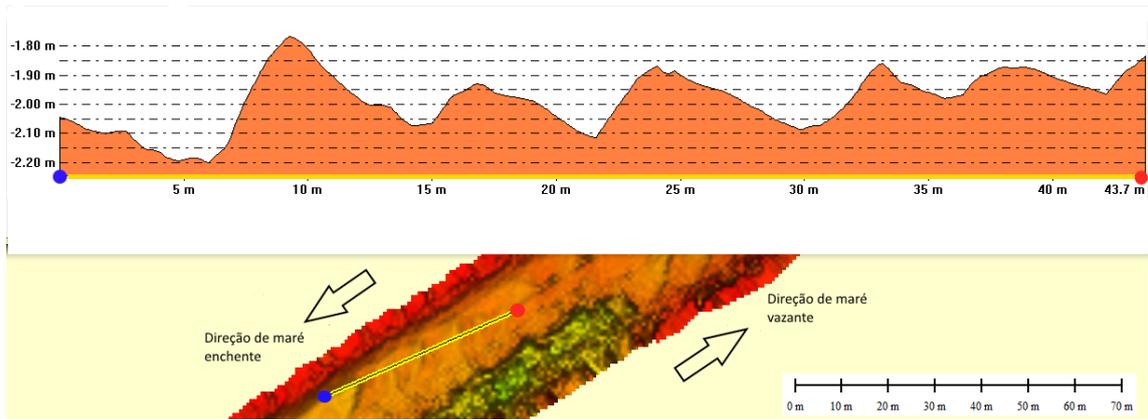


Figura 30. Trem de dunas submersas da área 3.

As dunas da área 4 (figura 39) seguem a mesma classificação das anteriores, e o sentido de migração é novamente alterado, sendo este na direção de maré vazante.

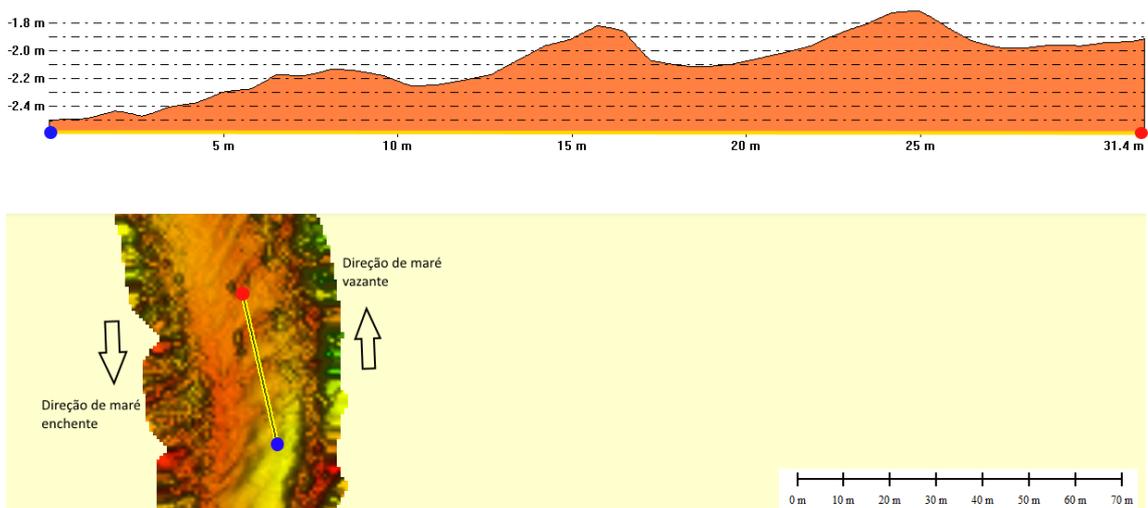


Figura 31. Trem de dunas submersas da área 4.

A área 5 apresenta o único trem de dunas submersas simétricas ao longo de todo o canal (figura 40). Esta configuração sugere um balanço pontual entre as forças dominantes das correntes de maré sobre o local. Uma outra

hipótese é estas dunas estarem em fase de transição do seu sentido de migração.

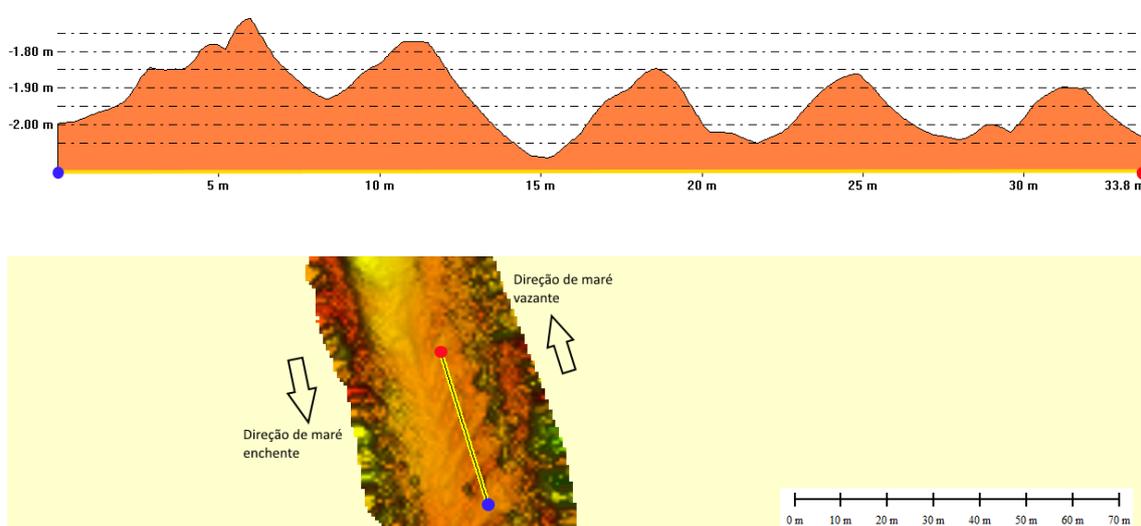


Figura 32. Trem de dunas da área 5.

O fundo do leito da desembocadura do Canal da Barra da Lagoa, área 6, é composto por dunas assimétricas pequenas com orientação de maré vazante (figura 41). A altura dessas dunas é de 20 centímetros e o espaçamento entre si de 5 metros. Dado o tamanho das formas do trem de dunas, a orientação pode ser resultado da corrente dominante na escala de tempo do ciclo de maré do dia.

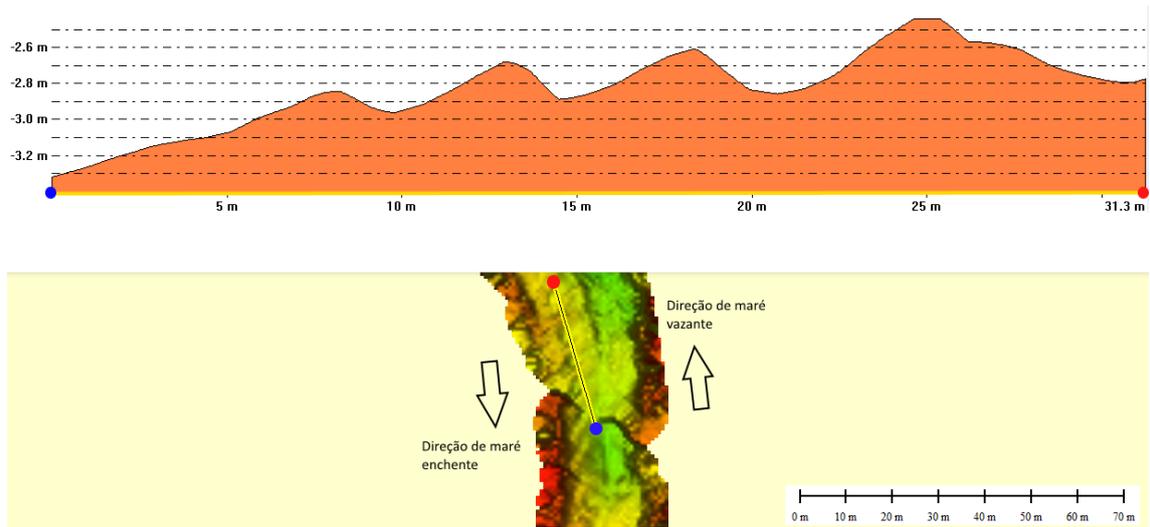


Figura 33. Trem de dunas da área 6

## 7 Conclusões

As imagens do sonar de varredura lateral mostraram a variedade de estruturas, substratos, ecofáceis e formas de leito através das suas assinaturas acústicas. Esse dado é inédito para a região de estudo, servindo como base para uma descrição qualitativa a nível geológico, físico e oceanográfico em futuros trabalhos do local.

O registro fotográfico dos alvos selecionados nos sonogramas serviu como uma ótima ferramenta para aprimoramento da capacidade interpretativa dos dados e na caracterização sonográfica do Canal da Barra da Lagoa.

A batimetria de varredura realizada pelo sonar interferométrico apresentou um bom nível de detalhamento, sendo capaz de identificar pequenas feições centimétricas. Os erros oriundos do fenômeno de múltiplos caminhos do eco é ainda um problema em áreas tão rasas como o Canal da Barra da Lagoa.

As formas de leito apresentaram tamanhos de dunas pequenas a médias, com orientação nas direções de maré enchente e vazante em pontos distintos do canal. Pela dimensão dessas feições, pode-se ter a garantia que representam a corrente dominante no local em uma escala de tempo de baixa frequência. Estas evidências servem como subsídios em estudos futuros mais detalhados sobre as hidrodinâmica e o transporte de sedimentos no canal.

A geração simultânea de dados batimétricos e sonográficos pelo sonar do sonar interferométrico mostrou-se uma eficiente forma de se realizar o mapeamento do fundo e sua caracterização acústica. Os dados se complementam, garantindo uma interpretação mais acurada dos dados.

Recomenda-se novos levantamentos de dados batimétricos e sonográficos sobre o canal, a fim de se comparar as formas de leito identificadas no presente trabalho, e inferir sobre a taxa de migração e o transporte de sedimentos no Canal da Barra da Lagoa.

## 8 Referências bibliográficas

ALLEN J.R.L. & FRIEND P.F.. Changes in intertidal dunes during 2 spring-neap cycles, lifeboat station bank, wells-next-sea, Norfolk (England). *Sedimentology* 23(3), p. 329–346. 1976.

ANDERSON, J.T; VAN HOLLIDAY, D; KLOSER, R.; REID D.G; SIMARD, Y. Acoustic seabed classification: Current practice and future directions. *ICES Journal of Marine Science*, 2002.

ANDRADE, Rodrigo Campos de. Estudo da Circulação Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição - SC. 2001. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook. Washington, 1994.

ASHLEY, G. M. "Classification of large-scale subaqueous bedforms; a new look at an old problem." *Journal of Sedimentary Research* 60.1, p. 160-172. 1990.

AYRES NETO, Arthur. Geologia e geofísica na exploração de recursos minerais marinhos. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo , v. 18, n. 3, p. 237-238, 2000.

AYRES NETO, Arthur. Uso da Sísmica de Reflexão de Alta Resolução e da Sonografia na Exploração Mineral Submarina. Rio de Janeiro. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 18(3), 2001.

AYRES NETO, A; MENDES, J.N.T; SOUZA, J.M.G; REDUSINO JR., M; PONTES, R.L.B. Geotechnical Influence on the Acoustic Properties of Marine Sediments of the Santos Basin, Brazil. Rio de Janeiro. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2013.

BATES, C.R; BYHAM, P. Swath-Sounding Techniques for Near Shore Surveying. Bath, 2001.

BIRD, J.S.; PEARCE, S.K.; MULLINS, G.K.. Swath bathymetry and the requirement for handling multiple same-time arrivals. OCEANS 2011 , pp.19-22.2011.

BITENCOURT, N. de L. da R. A Problemática da Conservação Ambiental dos Terrenos de Marinha: o caso da Orla do Canal da Barra da Lagoa, Ilha de Santa Catarina, Brasil. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), - UFSC, Florianópolis, 2005.

BLONDEL, Philippe. The Handbook of Sidescan Sonar. Chichester. Praxis Publishing, 2009.

BLONDEL, P. & MURTON B.J.. Handbook of Seafloor Sonar Imagery. Chichester, UK. 1997.

BOUMA H. A., RAPPEPORT L. M., ORLANDO C. R., HAMPTON A.M. Identification of bedforms in lower cook inlet, Alaska, Sedimentary Geology, Volume 26, Cap. 1–3, p.157-177.1980.

BRISSON, L. N; WOLFE, D.A; STALEY, M. Interferometric Swath Bathymetry for Large Scale Shallow Water Hydrographic Surveys. Canadian Hydrographic Conference, 2014.

BROWN, C.J; BLONDEL, P. Developments in the Application of Multibeam Sonar Backscatter for Seafloor Habitat Mapping. Applied Acoustics, 2009.

CAMIN, J, H; ISAKSON, M.J. A Comparison of Sediment Reflection Coefficient Measurements to Elastic And Poro-Elastic Models. Acoustical Society of America, 2006.

COCHRANE, G.R.; LAFFERTY, K.D. Use of Acoustic Classification of Sidescan Sonar Data for Mapping Benthic Habitat in the Northern Channel Islands, California. Continental Shelf Research, 2002.

COGGAN, R.; POPULUS, J.; WHITE, J.; SHEEHAN, K.; FITZPATRICK, F.; PIEL, S. Review of Standards and Protocols for Seabed Habitat Mapping. Mesh, 2007.

D'AQUINO, C. A.; ANDRADE NETO, J. S.; BARRETO, G. A. M.; SCHETTINI, C. A. F.. Caracterização oceanográfica e do transporte de sedimentos em suspensão no estuário do Rio Mampituba, SC. *Rev. Bras. Geof.* [online]. 2011.

D'AMICO, A.; PITTENGER, R. A Brief History of Active Sonar. San Diego. Aquatic Mammals, 2009.

DALRYMPLE R.W., RHODES R.N.. Estuarine dunes and bars. In: Perillo GME (ed) *Geomorphology and sedimentology of estuaries*. Elsevier, Amsterdam, pp 359–422. 1995.

DE MOUSTIER C. State of the art in swath bathymetry survey systems. *International Hydrographic Review*, 1988.

DE MOUSTIER C. & MATSUMOTO H.. Seafloor acoustic remote sensing with Multibeam Echo-Sounders and Bathymetric Sidescan Sonar Systems. *Marine Geophysics*, p.27-42. 1993.

DENBIGH, P.N.. Swath Bathymetry: Principles of Operation and an Analysis of Errors. *IEEE. Journal of Oceanic Engineering*, 14(4).p. 289 – 298.1989.

FISH, J.P. & CARR, A.H.. *Sound underwater images; a guide to the generation and interpretation of sidescan sonar data*. American Underwater Search and Surveys Ltd. Lower Cape. 1990.

Publishing Orleans, MA.189 pp.

FRIEDMAN, G.M.; SANDERS, J.E. & KOPASKA-MERKEL, D.C. *Principles of Sedimentary Deposits: Stratigraphy and Sedimentology*. New York: Macmillan 717p. 1992.

GEEN, M. Applications of interferometric swath bathymetry, Sea Technology. pp. 25 – 30.1996.

GODOY, F. B. Modelagem Hidrológico-Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – SC. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 2009.

GODOY, F. B., MARIO, H. F. S, FRANCO, D. O canal da Barra da Lagoa, Florianópolis – SC – um filtro de maré natural. Laboratório de Hidráulica Marítima - UFSC. Anais III SEMENGO – Seminário de Engenharia Oceânica, Rio Grande, RS. 2008.

GOSTNELL, Calebe. Efficacy of an Interferometric Sonar for Hydrographic Surveying: do Interferometers Warrant an In-depth Examination? The Hydrographic Journal, 2005.

GREEN, Matt. Applications of Interferometric Swath Bathymetry. Bath, 1998.

HAMILTON, E.L. Sound Velocity, Elasticity, and Related Properties of Marine Sediments, North Pacific. Ocean Sciences Department. San Diego, 1970.

HILLER, Tom. Solving the Interferometric Processing Bottleneck. Norwich. Thorne Hydrographic Ltd.

HILLER, T., BRISSON, L.N., WRIGHT, St. Measuring Bathymetric Uncertainty of the EdgeTech 4600 Sonar. In: Hydro12 - Taking care of the sea. Rotterdam. 2012.

ISAKSON, M; CHOTIROS, N; PIPER, J; GUILD, M; CAMIN, H.J. A Comparison of Models for the Interaction of Acoustic Waves and Sediments with Reflection Coefficient Measurements from a Sand/Water Interface at the Sediment Acoustics Experiment 2004 (Sax04). 2004.

JACKSON, D.R.; BRIGGS, K.B. High-frequency Bottom Backscattering: Roughness Versus Sediment Volume Scattering. Journal of the Acoustical Society of America, 1992.

KENYON H. N., BELDERSON H. R., Bed forms of the Mediterranean undercurrent observed with side-scan sonar, *Sedimentary Geology*, Volume 9, Cap. 2, May 1973, p.77-99.

KJERFVE, B. Comparative oceanography of coastal lagoons. pp. 63–81. In *Estuarine Variability* (Wolfe D. A., ed.). Academic Press, New York, U.S.A., pp. 63–81. 1986.

LINCOLN, J. M., and FITZGERALD, D. M.. Tidal distortions and flood dominance at five small tidal inlets in Southern Maine. *Marine Geology* 82, p. 133-148. 1988.

LLORT-PUJOL, G; SINTES. C; LURTON, X. A New Approach for Fast and High-Resolution Interferometric Bathymetry. France. IEEE Oceanic Engineering Society Newsletter, 2006.

LURTON, X; LAMARCHE, G. Backscatter Measurements by Seafloor-Mapping Sonars. Guidelines and Recommendations, 2015.

LURTON, X. An Introduction to Underwater Acoustics Principles and Applications. 2002.

LURTON, Xavier. Theoretical Modelling of Acoustical Measurement Accuracy for Swath Bathymetric Sonars. França. Service Acoustique et Sismique, 2003.

MARQUES, Danielle dos Santos. Simulação Numérica da Resposta Sísmica de Modelos Geológicos de Reservatórios de Petróleo e Gás. Rio de Janeiro, 2011.

MEDWIND AND CLAY. *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. 1998.

MESH. Review of standards and protocols for seabed habitat mapping. 2005.

MILLER Jr., G. T. *Ciência Ambiental*. São Paulo: Thomson Pioneira, 2011.

MIRANDA L.B., CASTRO B. M. & KJERFVE B. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. São Paulo: Edusp. 2002.

POST, Jan C.; LUNDIN, Carl G.. Guidelines for Integrated Coastal Zone Management. Washington: The World Bank, 1996.

MOUSTIER, Christian. State of the Art in Swath Bathymetry Survey Systems. Monaco. International Hydrographie Review, 1988.

MOUSTIER, C; MATSUMOTO, H. Seafloor Acoustic Remote Sensing with Multibeam Echo-Sounders and Bathymetric Sidescan Sonar System. Kluwer Academic Publishers, 1993.

NISHIMURA, Clyde E. Fundamentals of Acoustic Backscatter Imagery. Washington, 1997.

PENROSE, J.D; SIWABESSY, P.J.W; GAVRILOV, A; PARNUM, I; HAMILTON, L.J; BICKERS, A; BROOKE, B; RYAN, D.A; KENNEDY, P. Acoustic Techniques for Seabed Classification. CRC for Coastal Zone Estuary & Waterway Management, 2005.

PEREIRA, M. L. M.: *Estudo da dinâmica das águas do canal da Barra – Barra da Lagoa – Florianópolis, SC*. Dissertação (Mestrado em Geografia), UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 2004.

PEREIRA, M.L.M.; PORTO FILHO, E. & BONETTI FILHO, J.. Estudo hidrodinâmico do Canal da Barra – Florianópolis/SC: resultados preliminares. XIV Semana Nacional de Oceanografia – Rio Grande, 7 a 13 de outubro de 2001. In CDRom do evento. 2001.

PORTO FILHO, E. & BONETTI FILHO, J.. Considerações sobre a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos no Canal da Barra, Florianópolis –SC. In: Anais do XI Simpósio Nacional de Oceanografia. Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí: 514-516. 1997.

QUARESMA V.S., DIAS G.T.M. & BAPTISTA NETO J.A.. Caracterização da ocorrência de padrões de sonar de varredura lateral e sísmica de alta

freqüência (3,5 e 7,0 kHz) na porção sul da Baía de Guanabara – RJ. *Revista Brasileira de Geofísica*, 18(2): 201–214. 2000.

ROCHA, C. B. M. Implementação e uso do modelo Mike 21 na análise de cenários hidrodinâmicos na Lagoa da Conceição – SC. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 2007.

RØNHOVDE, Are. High Resolution Beamforming of SIMRAD EM3000 Bathymetric Multibeam Sonar Data. Oslo, 1999.

ROSMAN, P. C. C.. EIA da Marina Porto da Barra - Florianópolis - SC: Análise dos Aspectos Hídricos e Oceanográficos. Relatório AECO/COPPE/UFRJ. 1996.

RUBIN, D.M. & MCCULLOCH, D.S.. Single and superimposed bedforms: a synthesis of San Francisco Bay and flume observations. *Sedimentary Geology*., 26, p. 207-231. 1990.

SAUCAN, A.A.; SINTES, C.; CHONAVEL, T.; LE CAILLEC, J.M.. Enhanced sonar bathymetry tracking in multi-path environment. *Oceans, 2012* , pp. 14-19.2012.

SCHUBEL, J.R. & CARTER, H. H., 1984. Fine-grained Suspended Sediment. IN: KENNEDY V.S. (Ed.). *The estuary as a filter*. Orlando, Academic Press, INC., pp. 81-105.

SIERRA DE LEDO, B. & SORIANO-SIERRA, E.. Atributos e processos condicionantes da hidrodinâmica na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina.. O ecossistema da Lagoa da Conceição. NEMAR/CCB/UFSC. Florianópolis, Brasil: 89-100. 1999.

SIMÕES, Isabel C.V.P. Simulação Numérica da Resposta Sísmica de Modelos Geológicos de Reservatórios de Petróleo E Gás. Rio de Janeiro, 2007.

SHON, JOHN. Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics. IN: HELBIG K & TREITEL S. Handbook of Geophysical Exploration: Seismic Exploration. 1996.

SOUTHARD, J. B., BOGUCHWAL, L. A..Bed configurations in steady unidirectional water flows. Part 2. Synthesis of flume data. Journal of Sedimentary Petrology, 60(5), p. 658-79. 1990.

SOUZA, Luis Antonio Pereira. Revisão Crítica da Aplicabilidade dos Métodos Geofísicos na Investigação de Áreas Submersas Rasas. São Paulo, 2006.

SOUZA, L.A.P. As técnicas geofísicas de Sísmica de reflexão de alta resolução e sonografia aplicada ao estudo de aspectos geológicos e geotécnicos em áreas submersas. 35° Congresso Brasileiro de Geologia, Anais, Belém, 1551-1564, 1988.

STERNLICHT, Daniel D. A Dissertation Submitted in Partial Satisfaction of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Electrical Engineering (Applied Ocean Science). San Diego, 1999.

TIAN, Wen-Miin. Integrated Method for the Detection and Location of Underwater Pipelines. Taiwan. Applied Acoustics, 2007.

VOLBERG, B; MEURLING, T. Evolution and Future of Multibeam Echosounder Technology. Tokyo, 2007.

WEWETZER S. F. K. Side-scan sonar mapping of bedforms in the middle Tay Estuary, Scotland. International Journal of Remote Sensing. Vol. 20, Cap. 3, 1999.

WHITMEYER, S. J., & FitzGerald D. M.. Episodic dynamics of a sand wave field. *Marine Geology*, 252.1, p. 24-37. 2008.

XU, Wen. Signal Direction-of-Arrival and Amplitude Estimation for Multiple-Row Bathymetric Sidescan Sonars. 1998.



# Batimetria do Canal da Barra da Lagoa

