

**Universidade Federal do Rio Grande – FURG**

**Instituto de Oceanografia**

Programa de Pós-Graduação em Oceanologia

**Identificação de depósitos de lama fluida  
na antepraia da Praia do Cassino (RS, Brasil)  
utilizando métodos geofísicos e medições  
diretas**

**Carolina de Oliveira Lempek De-Zotti**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanologia, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre.

Orientador: *Prof. Dr. LAURO JULIO CALLIARI*

Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Coorientadora: *Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. DÉBORA MARTINS MACHADO*

Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Coorientadora: *Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. ELAINE SIQUEIRA GOULART*

Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Rio Grande, RS, Brasil

Abril 2021

**Identificação de depósitos de lama fluida  
na antepraia da Praia do Cassino (RS, Brasil)  
utilizando métodos geofísicos e medições  
diretas**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Oceanologia, como parte  
dos requisitos para a obtenção do Título de  
Mestre  
por

**Carolina de Oliveira Lempek De-Zotti**

Rio Grande, RS, Brasil

Abril 2021

© A cópia parcial e a citação de trechos desta tese são permitidas sobre a condição de que qualquer pessoa que a consulte reconheça os direitos autorais do autor. Nenhuma informação derivada direta ou indiretamente desta obra deve ser publicada sem o consentimento prévio e por escrito do autor

DE-ZOTTI, CAROLINA

Identificação de depósitos de lama fluida na antepraia da Praia do Cassino (RS, Brasil) utilizando métodos geofísicos e medições diretas/Carolina de Oliveira Lempek De-Zotti – Rio Grande: FURG, 2021.

Número de páginas p. 133

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande. Mestrado em Oceanologia. Área de Concentração: Física dos Oceanos e Clima; Geologia Marinha e Costeira; Biogeoquímica, Poluição e Ecossistemas Marinhos. 1. Métodos Acústicos. 2. Lama Fluida. 3. Densidade. I. Identificação de depósitos de lama fluida na antepraia da Praia do Cassino (RS, Brasil) utilizando métodos geofísicos e medições diretas.

# Agradecimentos

Agradeço aos meus professores, Lauro Calliari, Elaine Goulart e Débora Machado pela orientação, amizade e carinho demonstrado em todo esse processo. Pensando em tudo que ocorreu desde 2018, parece que já se passaram várias vidas e não existem palavras para resumir o quanto eu sou grata pelo compartilhar do nosso caminho.

Agradeço ao CNPq pela bolsa de estudos concedida, ao projeto Monitoramento do Bolsão de Lama Fluida na Antepraia da Praia do Cassino (RS, Brasil), ao SiMCOSTA pelo apoio financeiro para realização das saídas de campo e pelo investimento de todos recursos associados.

Agradeço a todos que participaram de alguma saída de campo dos “Mud Hunters”. A equipe do LEC/LIFE que compôs nosso grupo de trabalho, a todos do LOG que participaram em algum momento. Agradeço a Austral e a todas tripulações e barcos que utilizamos em todo esse tempo. A lista é extensa demais! Sem todas essas pessoas nada disso teria ocorrido. É necessária muita logística operacional para colocar esse projeto em ação e em vocês encontrei a ajuda necessária e fiz parte de uma equipe.

Quero agradecer especialmente a minha “dupla de dois” Lelo, o nosso convívio me possibilitou aprendizados gigantescos, compreendi o que é uma parceria dinâmica, a confiar e lidar com as responsabilidades (muitas vezes maiores que nós) de uma forma leve e engraçada. Para qualquer problema e comemoração foi tu quem estava do meu lado, compartilhando.

Agradeço ao prof. Fontoura e ao LEC que me recebeu de braços abertos e me senti acolhida. Veri, a tua ajuda foi essencial em vários momentos, sempre com uma palavra amiga de incentivo. Meu agradecimento especial também vai para minhas Mudgirls: Marine e Luiza. Foram muitos os desafios mas ultrapassamos juntas com muitas risadas, segurando na mão do David e do cano da Marine!

Agradeço aos meus pais e irmãos, gratidão por tanto! Vocês não apenas me deram a vida como também me deram força para seguir nela. Agradeço o apoio do meu parceiro de vida Giordan. Agradeço a todos amigos, que com certeza já

cansaram de me ouvir falando sobre a lama. Agradeço a Flávia e a Andrea por me ajudarem a expandir em todas direções, sentindo todas experiências e correndo riscos. Todos vocês são inspiração diária, me auxiliam na forma e momento corretos de me posicionar com firmeza, quando necessito desabafar como uma maluca, quando preciso apenas calar e sentir, e no desafio de demonstrar compaixão e não violência. Vocês me auxiliam a ser mais empática e aberta. Serei eternamente grata a todos meus médicos e especialmente aos meus cardiologistas, sem os quais não estaria aqui.

Sou grata pelo meu comprometimento, disciplina e responsabilidade. Conclui esta etapa em meio a uma pandemia, o que torna tudo muito mais difícil. De repente não ter mais o convívio e a companhia de toda essa equipe dos laboratórios foi muito duro. Não sei expressar o desafio que foi e é ser brasileiro e estar no Brasil neste momento. A educação e a ciência salvam vidas!

# Resumo

O substrato de regiões costeiras e estuarinas pode ser recoberto por sedimentos coesivos. A antepraia da Praia do Cassino (Rio Grande do Sul, Brasil) desenvolve esporadicamente depósitos de lama fluida de origem e dinâmica ainda desconhecidos. Nesta região, estes depósitos podem se deslocar em direção à face de praia causando impactos socioambientais e econômicos. O objetivo deste trabalho é relacionar a estrutura vertical de densidade da lama fluida medida *in situ* com os horizontes identificados pela geofísica rasa de diferentes frequências. A ecossonda monofeixe de dupla frequência opera simultaneamente com uma frequência mais alta (200 kHz, por exemplo) e uma mais baixa (50, 33, 38, 24 kHz, por exemplo). Nos levantamentos foram utilizados dois equipamentos acústicos de dupla frequência, mapeando os depósitos de lama fluida utilizando a alta frequência de 200 kHz para identificar o primeiro gradiente abrupto de impedância acústica, enquanto a baixa frequência de 33 kHz ou 50 kHz penetra na lama fluida e é refletida no próximo gradiente abrupto de impedância acústica. Doze campanhas ocorreram de 2018 a 2020 na antepraia da Praia do Cassino, unindo perfis de densidade com os registros de ecossonda de dupla frequência, simultaneamente. A correlação de Pearson foi aplicada para determinar a coerência entre os limites detectados por ambos equipamentos. Foram avaliados os erros na penetração do sinal acústico na estrutura vertical de densidade do depósito, identificando os intervalos de densidade melhor reconhecidos por cada frequência utilizada. Os maiores gradientes detectados pela alta frequência parecem ocorrer no intervalo de densidades de 1080 a 1100 kg/m<sup>3</sup>. A densidade de 1150 kg/m<sup>3</sup> tem uma melhor associação com a baixa frequência de 50 kHz e a densidade de 1225 kg/m<sup>3</sup> com a frequência de 33 kHz. Esta abordagem integrativa detectou com sucesso a presença e espessura da camada de lama fluida da antepraia da Praia do Cassino. Recursos complementares podem ser agregados a essa abordagem para entender a interação dessas camadas com as particularidades desse ambiente.

**Palavras-chave:** sedimentos coesivos, métodos acústicos, dupla frequência, densidade, antepraia, lama fluida.

# Abstract

Cohesive sediments usually cover the bottoms of coastal and estuarine regions. The shoreface of Cassino beach (Rio Grande do Sul, Brazil) is an exceptional environment for the development of fluid mud deposits since it is located on a microtidal coast, dominated by waves and with a high degree of exposure. These deposits sporadically move towards the beach, causing socio-environmental and economic impacts. This work aims to relate the fluid mud's vertical structure of density measured *in situ* with the horizons identified by geophysics methods with different frequencies. Dual-frequency acoustic methods identify the fluid mud deposits using the high-frequency 200 kHz to recognize the first abrupt acoustic impedance gradient (lutocline). The low-frequency 33 kHz or 50 kHz penetrates the fluid mud and, in the next abrupt acoustic impedance gradient is reflected. From 2018 to 2020 were executed twelve field surveys, simultaneously associating density profiles with records of the dual-frequency echo sounder. Pearson's correlation was applied to determine the coherence between the detection of the fluid mud boundaries by both devices. Each frequency best recognizes specific density intervals. The high-frequency best identifies the range of densities from 1080 to 1100 kg/m<sup>3</sup>. The density of 1150 kg/m<sup>3</sup> had a better association with the low frequency of 50 kHz, and the range of densities 1225 to 1250 kg/m<sup>3</sup> are associated with the frequency of 33 kHz. The densimeter combined with the dual-frequency echo sounder 200 kHz and 33 kHz had a better overall performance. This integrative approach has successfully detected the presence, boundaries, and thickness of the fluid mud deposit. Complementary resources can be added to understand how the particularities of this environment interact with these layers.

**Keywords:** cohesive sediments, geoacoustical methods, dual-frequency, density, shoreface, fluid mud.

# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	iv
<b>Resumo</b> .....	vi
<b>Abstract</b> .....	vii
<b>Índice</b> .....	viii
<b>Lista de Figuras</b> .....	x
<b>Lista de Tabelas</b> .....	xiv
<b>Lista de Acrônimos, Abreviações e Símbolos</b> .....	xvi
<b>Prefácio</b> .....	1
<b>Capítulo I: Introdução</b> .....	3
<b>Capítulo II: Objetivos</b> .....	8
<b>Capítulo III: Referencial Teórico</b> .....	9
3.1. Características Gerais da Lama Fluida .....	9
3.2. Pesquisas em Lama Fluida: Panorama geral para o Brasil e o mundo .....	13
3.3. Detecção e Monitoramento da Lama Fluida .....	22
3.3.1. Métodos acústicos indiretos: Ecosonda de dupla frequência.....	22
3.3.2. Métodos diretos: Densímetro.....	27
<b>Capítulo IV: Revisão Literária e Caracterização da Área de Estudo</b> .....	29
4.1 Caracterização da área de estudo .....	29
4.1.1 Eventos de lama na praia .....	33
4.1.1.1. Evento de 1998 .....	38
4.1.1.2. Evento de lama na praia em 2014 e sua evolução (2014-2017) .....	39
4.1.1.3. Eventos de 2018-2020 .....	43



4.2. Lama na praia: natural ou antrópica? .....	46
<b>Capítulo V: Material e Métodos</b> .....	<b>52</b>
5.1. Processo de coleta dos dados .....	52
5.1.1. Corroboração do registro de lama fluida .....	57
5.1.2. Calibração dos dados diretos .....	59
5.2. Integração dos dados e processamento estatístico .....	64
<b>Capítulo VI: Artigo Científico</b> .....	<b>67</b>
<b>Capítulo VII: Síntese da Discussão e Conclusões</b> .....	<b>88</b>
7.1. Síntese da Discussão .....	88
7.2. Considerações Gerais .....	94
7.3. Conclusões .....	100
<b>Capítulo VIII: Referências Bibliográficas</b> .....	<b>102</b>

# Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Representação simples do fundo com presença de LF e sua espessura ( $z_f$ ). Fonte: Mehta <i>et al.</i> 2014.....	4
<b>Figura 2:</b> Conceito de fundo náutico para a navegação em LF. Identificação baseada na abordagem multi-frequência associada com a densidade dos limites do pacote de LF. Fonte: Soares 2019 e Nederlof 1978.....	6
<b>Figura 3:</b> Estratificação horizontal no perfil vertical de concentração (C) de sedimentos em suspensão para condições de alta concentração. Fonte: Winterwerp & Van Kesteren 2004 adaptado de Mehta 1991.....	12
<b>Figura 4:</b> Mapa-múndi com a localização de alguns ambientes com estudos em lama publicados. Dimensão dos símbolos meramente ilustrativa. ....	13
<b>Figura 5:</b> Ecosonda monofeixe em operação. Fonte: Soares 2019. ....	23
<b>Figura 6:</b> Levantamento de LF utilizando ecosonda de dupla frequência em 13/11/1998 (superior) e 29/12/1998 (inferior) no canal de acesso ao Porto de Rotterdam. Fonte: Winterwerp & Van Kesteren 2004. ....	25
<b>Figura 7:</b> Apresentação do equipamento de medição direta do perfil de densidade do pacote de LF. Fonte: acervo pessoal. ....	27
<b>Figura 8:</b> Malha amostral repetida em todos levantamentos do depósito de LF da Praia do Cassino (RS, Brasil). Fonte: própria.....	32
<b>Figura 9:</b> Deposições de lama na praia; <b>(a)</b> LF ao longo de 3km de praia em 2020, marcada pelo abrupto limite entre uma zona de surf ativa e a atenuação de onda devido ao amortecimento da energia de onda pela presença submersa de lama. Foto de Deivid Alves [Mirlean <i>et al.</i> 2020]; <b>(b)</b> LF sob a face de praia no mesmo evento em 2020. Foto de Camilla Bellini. ....	34
<b>Figura 10:</b> Em detalhe a presença de areia fina junto a deposição de LF na face de praia, evento de fevereiro de 2020. Foto de Camilla Bellini.....	36
<b>Figura 11:</b> Eventos de lama na praia; <b>(a)</b> deposição de lama de grande espessura na face de praia no evento de 1998 <b>(b)</b> lama retrabalhada após consolidação e erosão do depósito no evento de 1998 <b>(c)</b> reportagem de jornal de maio de 2003 e <b>(d)</b> surfista preso do pacote de LF. Fotos cedidas por Lauro Calliari.....	36

<b>Figura 12:</b> Deposições de lama na praia; (a) bolas de lama formadas depois da consolidação e erosão do depósito submerso. Fonte: Mirlean <i>et al.</i> 2020. (b) Deposição recente de LF na face de praia, evento de 2020. Foto de Camilla Bellini.....	37
<b>Figura 13:</b> Mapa de espessura de LF na antepraia do Cassino para o ano de 2016. Fonte: Colleoni 2016. ....	40
<b>Figura 14:</b> Estágio de evolução do depósito de LF, ressecamento inicial da camada de LF depositada sob a porção aérea da praia do Cassino. Fonte: própria. ....	43
<b>Figura 15:</b> Imagem LANDSAT TM5 de 08/04/1984 demonstrando a vortividade induzida pelo vento na pluma de sedimentos introduzida na plataforma continental pela Lagoa dos Patos. Fonte: Calliari <i>et al.</i> 2009. ....	48
<b>Figura 16:</b> Ecossondas de dupla frequência utilizadas: <b>(a)</b> Exemplo de padrão característico para a LF marcado em linha azul a frequência de 200 kHz e em linha vermelha a frequência de 33 kHz; <b>(b)</b> Ecossonda TGE – Ecosounder Datalogger operando. Fonte: acervo pessoal. ....	53
<b>Figura 17:</b> Ecossondas de dupla frequência utilizadas: <b>(a)</b> Exemplo de padrão característico para a LF marcado em linha preta a frequência de 200 kHz e em linha branca a frequência de 50 kHz. Fonte: Colleoni 2016; <b>(b)</b> Ecossonda Lowrance® HDS Gen 2 operando. Fonte: acervo pessoal.....	53
<b>Figura 18:</b> Pontos amostrados com o densímetro ao longo dos dois anos de monitoramento. ....	54
<b>Figura 19:</b> Exemplos de acoplagem das ecossondas à embarcação <b>(a)</b> na lancha “Larus” o equipamento acoplado em um suporte junto ao costado, com o GPS acoplado a outra extremidade do cano <b>(b)</b> no rebocador “4 irmãos” o transdutor da ecossonda junto ao costado e o GPS acoplado da mesma forma <b>(c)</b> exemplo de como o transdutor vai preso a extremidade submersa do cano. ....	56
<b>Figura 20:</b> <b>(a)</b> e <b>(b)</b> Sonda de medição direta; <b>(c)</b> detalhe para o garfo vibratório; <b>(d)</b> sistema de aquisição de dados GPS. Fonte: acervo pessoal. ....	56
<b>Figura 21:</b> Localização das amostras sedimentológicas coletadas em abril e maio de 2018. ....	58
<b>Figura 22:</b> Caracterização da presença de LF em 04 de abril de 2018. <b>(a)</b> Perfil de densidade mostrando a presença de LF e <b>(b)</b> gradiente de densidade associado à coleta. Os pontos em	

preto representam os dados do densímetro, a linha tracejada em azul é o horizonte de reflexão da alta frequência 200 kHz e a linha em vermelho é o horizonte de reflexão da baixa frequência. As densidades respectivas que vão de encontro ao horizonte identificado pela dupla frequência estão representadas por quadrados. **(c)** histograma mostrando todas as densidades amostradas, em cinza claro e em cinza escuro as densidades pertencentes ao intervalo de LF utilizado neste trabalho. **(d)** gráfico em pizza da distribuição granulométrica associada à perfilagem..... 58

**Figura 23:** Caracterização da ausência de LF em 04 de abril de 2018. **(a)** Perfil de densidade mostrando a presença de LF e **(b)** gradiente de densidade associado à coleta. Os pontos em preto representam os dados do densímetro, a linha tracejada em azul é o horizonte de reflexão da alta frequência 200 kHz e a linha em vermelho é o horizonte de reflexão da baixa frequência. **(c)** histograma mostrando todas as densidades amostradas, em cinza claro **(d)** gráfico em pizza da distribuição granulométrica associada à perfilagem. .... 59

**Figura 24:** Mapa de localização do ponto de coleta de material (sedimento e água) para a calibração da sonda de medição direta. Fonte: própria. .... 60

**Figura 25:** **(a)** e **(b)** Coleta e **(c)** armazenagem de sedimento e **(d)** água da antepraia da praia do Cassino no dia 30/01/2020 para calibração da sonda de medição direta. Fonte: acervo pessoal. .... 61

**Figura 26:** Processo em laboratório de calibração da sonda de medição direta; **(a)** amostra de lama com densidade de 1227 kg/m<sup>3</sup> no recipiente aguardando inserção do equipamento **(b)**; **(c)** retirada de alíquotas em triplicata para determinação analítica da densidade – peso total; **(d)** amostras após serem levadas à estufa e pesadas em balança de precisão – peso seco; **(e)** detalhe no recipiente de 5 litros onde a amostra foi homogeneizada para inserção do equipamento. Fonte: acervo pessoal. .... 62

**Figura 27:** Curva de calibração resultante. Fonte: própria. .... 63

**Figura 28:** Resumo das estatísticas (erro médio relativo, RMSE, índice de espalhamento e inclinação média quadrática) sobre a capacidade da ecossonda de dupla frequência identificar determinadas densidades dentro do intervalo selecionado de 1080 a 1275 kg/m<sup>3</sup>. Em azul temos as informações para a alta frequência 200 kHz de ambos equipamentos, em vermelho os valores para a baixa frequência de 33 kHz (LF1) e em verde os valores para a baixa frequência de 50 kHz (LF2)..... 90

<b>Figura 29:</b> Mapa de espessura de LF para a antepraia da praia do Cassino com dados dos mapeamentos realizados dias 26/01/2020 e 30/01/2020. Fonte: própria.....	95
<b>Figura 30:</b> Espessura da camada de LF obtida pela ecossonda de dupla frequência 200 kHz e 33 kHz no “Ponto 04” amostrado no dia 26 de janeiro de 2020 e no dia 30 de janeiro de 2020. A linha azul representa o sinal refletido na alta frequência 200 kHz e a linha vermelha representa a baixa frequência 33 kHz.....	96
<b>Figura 31:</b> Perfil de densidade (esquerda) e gradiente de densidade (direita) do ponto de coleta "Ponto 04" amostrado dia 26/01/2020. A linha tracejada em azul corresponde a profundidade de reflexão da alta frequência 200 kHz no ponto laranja de densidade 1142 kg/m <sup>3</sup> . A linha tracejada vermelha está associada a profundidade de reflexão da baixa frequência 33 kHz, refletida na densidade 1227 kg/m <sup>3</sup> . .....	97
<b>Figura 32:</b> Perfil de densidade (esquerda) e gradiente de densidade (direita) do ponto de coleta para calibração do densímetro, amostrado dia 30/01/2020. A linha tracejada em azul corresponde a profundidade de reflexão da alta frequência 200 kHz no ponto laranja de densidade 1021 kg/m <sup>3</sup> . A linha tracejada vermelha está associada a profundidade de reflexão da baixa frequência 33 kHz, refletida na densidade 1272 kg/m <sup>3</sup> . .....	98
<b>Figura 33:</b> Espessura da camada de LF no ponto de calibração do densímetro, amostrado no dia 26 de janeiro de 2020 e no dia 30 de janeiro de 2020. A linha azul representa o sinal refletido na alta frequência 200 kHz e a linha vermelha representa a baixa frequência 33 kHz. ....	98
<b>Figura 34:</b> Espessura da camada de LF entre as coordenadas do “Ponto 04”, amostrado dia 26/01/2020, e o ponto de calibração do densímetro, amostrado no dia 30/01/2020. A linha azul representa o sinal refletido na alta frequência 200 kHz e a linha vermelha representa a baixa frequência 33 kHz. ....	99
<b>Figura 35:</b> Condições meteo-oceanográficas para o período de 26 a 30 de janeiro de 2020. Dados retirados da boia RS-04 (SiMCOSTA). .....	100

# Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Sumário de trabalhos brasileiros caracterizando a camada de LF e dinâmica do ambiente. VMM = Variação média de maré. MMS = Média maré de sizígia. MMQ = média maré de quadratura. ....	14
<b>Tabela 2:</b> Sumário de trabalhos brasileiros e as densidades refletidas pelas eco sondas de dupla frequência em uma abargagem multi-frequência.. ....	16
<b>Tabela 3:</b> Sumário de exemplos que possuem presença de LF e breve apresentação das características hidrodinâmicas locais dentro do continente americano com exceção do Brasil. VMM = Variação média de maré. MMS = Média maré de sizígia. MMQ = média maré de quadratura. ....	18
<b>Tabela 4:</b> Sumário de exemplos que possuem presença de LF e breve apresentação das características hidrodinâmicas locais dentro do continente europeu. VMM = Variação média de maré. MMS = Média maré de sizígia. MMQ = média maré de quadratura .....	19
<b>Tabela 5:</b> Sumário de exemplos que possuem presença de LF e breve apresentação das características hidrodinâmicas locais dentro do continente asiático. VMM = Variação média de maré. MMS = Média maré de sizígia. MMQ = média maré de quadratura. $H_s$ =Altura significativa de onda. $H_{max}$ =Altura máxima de onda .....	20
<b>Tabela 6:</b> Sumário de exemplos que possuem presença de LF e breve apresentação das características hidrodinâmicas locais dentro do continente africano e Oceania. VMM = Variação média de maré. MMS = Média maré de sizígia. MMQ = média maré de quadratura .....	21
<b>Tabela 7:</b> Resumo das condições de onda para eventos de alta energia no período de 2016 a 2017. Fonte: Oliveira <i>et al.</i> 2020.....	42
<b>Tabela 8:</b> Períodos de dragagem no canal de acesso ao Porto de Rio Grande e as datas dos eventos de deposição de lama na praia. Fonte: Mirlean <i>et al.</i> 2020.....	49
<b>Tabela 9:</b> Informações sobre as saídas de campo: data e forma de amostragem.....	54
<b>Tabela 10:</b> Resultados da análise granulométrica das amostras de abril e maio de 2018. ..	57
<b>Tabela 11:</b> Resumo das estatísticas para o pacote de LF segundo ambos monitoramentos com a eco sonda de dupla frequência e o densímetro. Na sequência da esquerda para a direita:	

Densidade média, desvio padrão da densidade, erro médio, erro médio relativo, erro médio quadrático (RMSE), índice de espelhamento (SI) e inclinação média quadrática (SS). ..... 89

**Tabela 12:** Valores de  $R^2$  obtidos a partir da correlação entre as profundidades encontradas na sondagem de 200 kHz e as profundidades correspondentes às densidades de 1080, 1100 e 1150 kg/m<sup>3</sup> ..... 90

**Tabela 13:** Valores de  $R^2$  obtidos a partir da correlação entre as profundidades encontradas na sondagem de baixa frequência e as profundidades correspondentes à diversas faixas de densidade, comparando trabalhos pretéritos brasileiros com este estudo. .... 91

# Lista de Acrônimos, Abreviações e Símbolos

## F

FM – *Fluid Mud* (Lama Fluida)

## H

HF – Alta Frequência 200 kHz (*High Frequency*)

## L

LF - Lama Fluida

LF1 – *Low Frequency* 33kHz (Baixa Frequência 33 kHz)

LF2 – *Low Frequency* 50 kHz (Baixa Frequência 50 kHz)

## M

MO – Matéria Orgânica



## Prefácio

A lama fluida (LF) pode ser definida como uma suspensão de alta concentração de partículas de sedimento fino ( $<63 \mu\text{m}$ ) que não formou uma matriz com ligações fortes o suficiente para eliminar o potencial de mobilidade [Van Rjin 2016]. A sedimentação deste material é impedida devido à proximidade entre as partículas de sedimento e os flocos [Van Rjin 2016].

A LF ocorre em ambientes litorâneos que têm disponibilidade de sedimentos finos, como por exemplo, lagos, estuários, canais e águas costeiras. A espessura da camada de LF é variável e dependente da disponibilidade de sedimentos finos e da hidrodinâmica do ambiente no qual está localizado [McAnally *et al.* 2007a].

Delaney [1962] comentou a existência de depósitos de argila arenosa na praia do Cassino apresentando espessuras de até 1m. As pesquisas na região evidenciam a existência de um depósito de lama intermitente na antepraia [Colleoni 2016; De-Zotti 2018] que, em condições altamente energéticas, é conduzido à face de praia [Calliari *et al.* 2000; Calliari *et al.* 2009]. Não apenas a presença da LF na zona de surf causa riscos costeiros à população, mas também a sua presença na porção subaérea da praia oferece riscos à população em geral, que usufrui culturalmente do local.

Este trabalho têm o objetivo de investigar a detecção e a caracterização da parcela de LF distribuída na antepraia utilizando métodos diretos e indiretos. Esta metodologia foi desenvolvida para o monitoramento da LF em ambientes hidrodinamicamente mais calmos, como canais de navegação de portos. A LF em cada ambiente possui singularidades, portanto, avaliar a aplicabilidade desta metodologia para identificação do pacote de LF em uma região de antepraia, exposta e submetida a alta energia de ondas [Davies 1980], é uma etapa consistente e importante para expandir o conhecimento deste pacote de LF. O contínuo monitoramento da LF fomentou discussões e questionamentos que vão além de sua identificação e, portanto, este trabalho compila informações relevantes ao entendimento do cenário no qual a temática da LF está inserida.

Finalmente, este trabalho tem a intenção de fornecer subsídios e colaborar com a linha de pesquisa, permitindo que, em pesquisas futuras, seja possível compreender as propriedades reológicas do sedimento que constitui o depósito, estudar a interação da coluna d'água e sedimento do fundo e compreender como ocorre a formação dos depósitos de LF, caracterizando os eventos responsáveis por proporcionar seu deslocamento e trazê-los à face de praia. Além disso, os conhecimentos deste trabalho podem servir para expandir o conceito de navegabilidade em LF no Brasil, podendo colaborar com a linha de pesquisa aplicada ao canal de navegação do Porto de Rio Grande.

## Capítulo I: Introdução

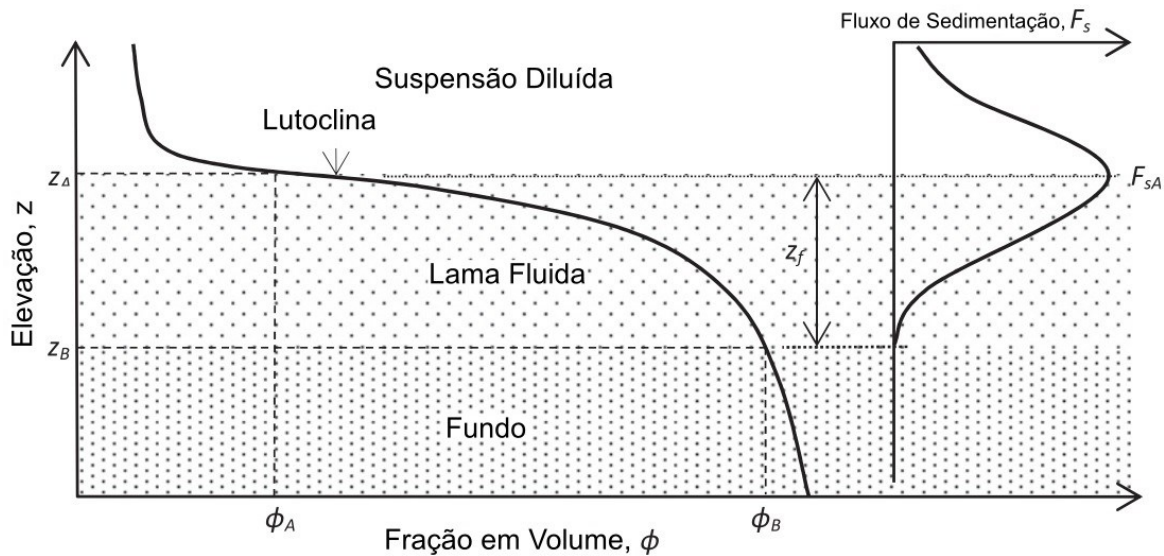
**O**s sedimentos coesivos estão presentes em regiões costeiras e estuarinas ao redor do mundo. Este sedimento é composto por sedimentos finos, matéria orgânica (MO), água e gases, cujo comportamento varia no tempo e espaço, sendo governados pela disponibilidade de sedimentos, condições meteorológicas e hidrodinâmicas e atividade biológica [Winterwerp & Van Kesteren 2004].

Lama fluida pode ser definida como uma fase transiente na formação de fundos coesivos, onde não exista nenhum mecanismo que mantenha as partículas em suspensão, a tendência é, portanto, que a camada esteja sujeita a consolidação [Winterwerp & Van Kesteren 2004]. Dyer [1986] descreve LF como o sedimento coesivo em suspensão sob uma concentração dentro ou próxima do “ponto de gel”, da ordem de 10 a 100 g.l<sup>-1</sup>. Van Rjin [2016] a explica como uma suspensão de alta concentração de partículas de sedimento fino (<63 µm) que não formou uma matriz com ligações fortes o suficiente (concentração de gelificação) para eliminar o potencial de mobilidade, e possui a sedimentação impedida devido à proximidade entre as partículas de sedimento e os flocos. A floculação ou agregação é um dos processos responsáveis pela ligação de partículas primárias de sedimento fino em partículas maiores e múltiplas, que dão origem aos flocos [Van Rjin 2016]. McAnally *et al.* [2007a] define de forma geral, o intervalo de densidade característico para a LF como sendo

superior a  $1080 \text{ kg/m}^3$  e inferior a  $1200 \text{ kg/m}^3$ . Neste trabalho será utilizado este intervalo de densidade.

Para Winterwerp & Van Kesteren [2004] o comportamento e ocorrência dos sedimentos coesivos dependem tanto das propriedades físico-químicas do sedimento e sua água intersticial, como se relacionam com uma série de parâmetros ambientais diversos. A alteração da aparência, comportamento e propriedades ocorre dentro de um amplo espectro de escalas espaciais e temporais. Os sedimentos coesivos podem ser considerados como parte do material em suspensão na coluna d'água ou até formar camadas espessas de LF.

A representação da figura 1 esquematiza a estratificação horizontal do fundo com presença de LF, a camada intermediária. Anterior à formação de LF, há o progressivo aumento na concentração de partículas. A camada de suspensão diluída pode ser definida a partir de sua densidade, sendo mais densa que a água até aproximadamente  $1030 \text{ kg/m}^3$  [Carneiro *et al.* 2020]. Após, pode ocorrer um brusco gradiente na concentração de sedimentos e, portanto, na densidade [Vinzon *et al.* 2015] originando a lutoclina. As lutoclinas são formadas a partir de eventos de deposição ou de ressuspensão, e são mantidas pela ação hidrodinâmica de ondas e correntes [Winterwerp & Van Kesteren 2004].



**Figura 1:** Representação simples do fundo com presença de LF e sua espessura ( $z_f$ ). Fonte: Mehta *et al.* 2014.

Na figura 1, logo abaixo da camada de LF há o fundo com maior consolidação. O estado de consolidação do sedimento coeso pode ser descrito por um perfil vertical construído

com métodos geoacústicos e sondagens diretas [Soares 2019; Carneiro *et al.* 2017; Fontein & Bird 2007; Kirby *et al.* 1980].

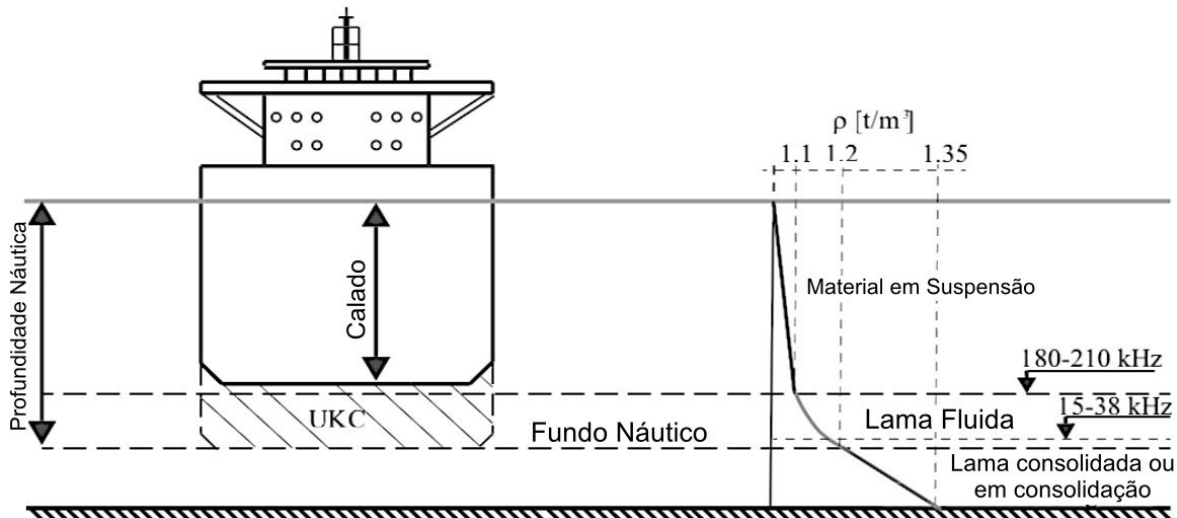
As eco sondas monofeixe de frequência 200 kHz são equipamentos comumente instalados em navios comerciais. Nos canais de navegação de portos, ocasionalmente este equipamento detectava um padrão de eco duplo e gerava um efeito de “fundo falso”. Na verdade, está é a camada de LF perceptível nos instrumentos acústicos, estando presente na maioria dos canais de navegação de portos e normalmente possuindo grandes espessuras. A LF se distingue claramente da água e demais sedimentos consolidados, possui um caráter não-newtoniano e demais características abordadas posteriormente no Capítulo III.

Pesquisar a camada de LF em cada ambiente, permitiu maior compreensão das suas características e sua utilização para a navegação, sendo uma alternativa mais econômica e que diminui os impactos ambientais associados à região portuária. Esta linha de pesquisa teve início há mais de cinquenta anos visando identificar e assegurar o calado navegável em diversos portos ao redor do mundo. Claramente a navegação em LF não é um conhecimento ordinário e envolve um extenso processo de investigação, experimentos e monitoramento, assim como exigiu o desenvolvimento de técnicas específicas para a caracterização e manutenção da camada de LF sob condições específicas próprias para a navegação segura.

Apenas os métodos indiretos, como a eco sonda de dupla frequência, não fornecem informações sobre as propriedades e características da camada de LF. Portanto, foram desenvolvidos métodos diretos de investigação específicos, como o densímetro (Rheotune®, STEMA Systems). Este equipamento perfila em tempo real a camada de LF, obtendo parâmetros reológicos como densidade, viscosidade e tensão de cisalhamento.

O estado reológico da lama pode apresentar diferentes respostas acústicas tanto em eco sondas monofeixe de dupla frequência quanto em perfiladores sísmicos [Soares 2019; Carneiro *et al.* 2017; Wurpts 1998; Madson & Sommerfield 2003]. A reologia é uma característica importante para a compreensão da deformação e fluxo de materiais geológicos sob a influência de uma tensão aplicada [Schettini *et al.* 2010]. Devido às características singulares da LF presente em cada ambiente, seus parâmetros reológicos específicos são o fator determinante se o navio pode navegar em segurança. A PIANC (World Association for Waterborne Transport Infrastructure) vem evoluindo e regulamentando a navegação em LF, acompanhando as pesquisas mundiais. Em 2014, a Associação sugeriu a utilização do

conceito de fundo náutico (Fig. 2) definido como "o nível em que as características físicas do fundo alcançam um limite crítico para além do qual o contato com a quilha de um navio causa danos ou efeitos inaceitáveis na capacidade de controle e na manobrabilidade".



**Figura 2:** Conceito de fundo náutico para a navegação em LF. Identificação baseada na abordagem multi-frequência associada com a densidade dos limites do pacote de LF. Fonte: Soares 2019 e Nederlof 1978.

A utilização de métodos indiretos integrados com os métodos diretos é, atualmente, empregada com sucesso e em um alto nível de precisão em canais de navegação de portos. Estes ambientes naturalmente possuem menor hidrodinâmica e tendem a ter maior acúmulo de sedimentos finos pois é comum os portos estarem localizados no interior de grandes estuários. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é utilizar esta metodologia de identificação da camada de LF a aplicando na antepraia de uma praia arenosa, dominada e exposta a alta energia de ondas como a praia do Cassino (RS, Brasil).

A praia do Cassino é uma região submetida ao regime de micromaré [Davies 1980] e próxima a desembocadura do estuário da Lagoa dos Patos. Na praia do Cassino, há o desenvolvimento de depósitos subaquosos intermitentes de LF na antepraia, apresentando espessuras de até 2m e que, em condições altamente energéticas na região, são conduzidos à face de praia [De-Zotti 2018; Colleoni 2016; Calliari *et al.* 2000; Calliari *et al.* 2009]. Não apenas a presença da LF na zona de surf causa riscos costeiros, mas também a sua presença na porção subaérea da praia oferece riscos à população em geral, que usufrui culturalmente do local.

A origem do sedimento destes depósitos ainda é desconhecida, assim como sua dinâmica. Até 2018 diversos trabalhos [Calliari *et al.* 2000; Sperle *et al.* 2005; Colleoni 2016] registraram a presença e ausência dos depósitos, tanto na antepraia quanto na porção subaérea da praia. Entretanto, estes monitoramentos são descontínuos e estudaram apenas alguns recortes desta extensa área de estudo.

A identificação do depósito lamoso de forma confiável é um alicerce sólido que permite o desenvolvimento de pesquisas futuras, sendo possível modelar a interação da coluna d'água e o leito, compreender como e onde ocorrem a formação dos depósitos de LF e caracterizar os eventos responsáveis por proporcionar seu deslocamento e trazê-los à face de praia. Desta forma, entende-se que este processo se inicia identificando a presença destes depósitos em toda área de estudo e compreendendo a sua estrutura vertical de densidade. Assim, este trabalho possui como objetivo identificar e caracterizar a camada de LF na antepraia da praia do Cassino através da integração de métodos diretos e indiretos utilizando uma abordagem multi-frequência.

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. O Capítulo II apresenta os objetivos deste trabalho. No Capítulo III é apresentado um referencial teórico cuja intenção é expor o estado da arte na pesquisa sobre LF ao redor do mundo e no Brasil, discutindo os métodos de detecção diretos e indiretos e oferecendo o embasamento teórico no qual essa dissertação é fundamentada. Em seguida, o Capítulo IV compõe uma breve apresentação da área de estudo, exibindo as características da LF presente neste ambiente. O Capítulo V apresenta a metodologia empregada na aquisição dos dados obtidos em saída de campo durante os anos de 2018 a 2020. O Capítulo VI apresenta, no formato de artigo científico, os resultados obtidos através desta abordagem e finalmente, o Capítulo VII conclui e ressalta os principais ensinamentos e questionamentos que este projeto expandiu nesta linha de pesquisa.

## Capítulo II: Objetivos

### **OBJETIVO GERAL**

Relacionar a estrutura vertical de densidade do depósito de lama fluida medida *in situ* com os horizontes identificados pela geofísica rasa de diferentes frequências.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Caracterizar a estrutura vertical de densidade no depósito de lama fluida *in situ*;

Identificar na estrutura vertical de densidade o retorno do sinal acústico nas diferentes frequências;



## Capítulo III: Referencial Teórico

**E**ste capítulo está dividido em três seções. Inicialmente, são apresentadas características gerais de relevância mundial sobre o estudo da LF. A seguir, um breve tópico apresenta a distribuição global das pesquisas em LF e um panorama do estudo no Brasil. Na sequência, é apresentado o embasamento teórico para as técnicas de detecção e monitoramento da LF utilizados no trabalho.

### 3.1. Características Gerais da Lama Fluida

Van Rjin [2016] explica a camada de LF como uma suspensão de alta concentração de partículas de sedimento fino ( $<63 \mu\text{m}$ ) com potencial de mobilidade. A formação de LF possui forte relação entre a porcentagem de partículas de argila de tamanho menor que  $4 \mu\text{m}$  e a porcentagem de MO. Lamas fluidas ricas em MO são características de lagos eutróficos pouco profundos. Ambientes relativamente quiescentes, como lagos, costumam possuir camadas persistentes de LF e grandes quantidades de MO podem desempenhar um papel na inibição da desidratação e manutenção do estado líquido do leito. Lamas fluidas encontradas em deltas e estuários subaquáticos e ao longo de costas de alta energia tendem a conter menos

MO (<5%). Em ambientes de baixa energia (ou estagnados), o alto teor de MO e o acúmulo de contaminantes tendem a ser um problema.

Winterwerp & Van Kesteren [2004] ressaltam o papel da MO e como os efeitos da química e da biologia afetam o comportamento dos sedimentos, tendo em vista que estes parâmetros se transfiguram de acordo com os efeitos sazonais que ocorrem regionalmente, em particular nas áreas intermareais, de estuários e mares costeiros.

Van Rjin [2016] discute a composição de LF como possuindo tanto altas porcentagens de MO como de partículas de grão no tamanho argila. O autor resalta que, caso a porcentagem de argila da amostra seja superior a 50%, há o fomento da formação deste tipo de fundo. A fração de argila é constituída por minerais coesivos e achatados da classe das argilas e micas, tendo mineralogia específica dependendo das condições geológicas locais.

McAnally *et al.* [2007a] demonstra a variação na distribuição de classes de tamanho de grão característico para a LF ao redor do mundo. Os autores entendem que tais diferenças são referentes à especificidade local, como a disponibilidade do sedimento e da hidrodinâmica particular da região. McAnally *et al.* [2007a] relacionam a quantidade de MO presente na LF, sua distribuição sedimentológica e a categoria hidrodinâmica do ambiente no qual a LF está situada. Por exemplo, para a LF que possui baixo conteúdo de MO, os autores afirmam que, geralmente, são encontradas porcentagens de partículas no tamanho argila que representam 50 a 70% do total de sólidos, possuindo a classe silte em segundo lugar, em termos quantitativos. Em locais caracterizados por serem de alta energia, os autores reconhecem que é comum o entranhamento de areia fina, em baixas porcentagens.

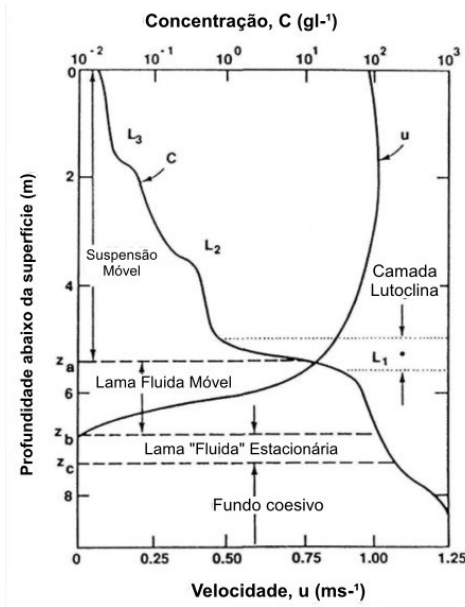
A floculação e agregação das partículas primárias de sedimentos finos em partículas maiores e múltiplas, ou flocos, ocorre quando a concentração dos grãos começa a interferir na decantação [Van Rjin 2016]. No ambiente, a partícula de argila e o restante dos grãos de sedimentos finos tendem a se ligar (por agregação ou floculação) [Van Rjin 2016; McAnally *et al.* 2007a], constituindo flocos de diferentes tamanhos e composições. A MO excretada e secretada pelos organismos junto com seu comportamento no sedimento afeta diretamente a formação dos flocos, aumentando a coesão e a estabilidade da camada de LF [Winterwerp & Van Kesteren 2004]. Em geral, grãos menores são mais coesos, com a coesão se tornando progressivamente mais importante à medida que o tamanho do grão diminui para menos de 40 µm [Mehta & McAnally 2002]. McAnally *et al.* [2007a] explica que os processos

biogênicos também contribuem para a floculação devido a ligação polimérica de grãos. Inicialmente, a estrutura formada pelo floco possui grande conteúdo de água armazenado na matriz do floco, proporcionando densidades apenas ligeiramente maiores do que a da água [Winterwerp & Van Kesteren 2004].

Winterwerp & Van Kesteren [2004] descrevem o processo de sedimentação impedida como o aumento da concentração volumétrica, ou seja, quando os flocos começam a atrapalhar a própria sedimentação, se tornando uma unidade, uma estrutura em rede de preenchimento dos espaços (gel), impedindo a deposição, exceto como resultado da consolidação do peso próprio. Ross & Mehta [1989] se referem à lutoclina como um gradiente estabilizado devido a sedimentação impedida abaixo desta camada. De acordo com as condições locais e devido ao baixo peso molecular dos sedimentos finos, o processo de consolidação pode durar dias ou anos [Van Rjin 2016].

Winterwerp & Van Kesteren [2004] ressaltam que, além das propriedades e interações específicas do sedimento, as condições meteo-hidrodinâmicas, a história (tensão) da camada sedimentar e a disponibilidade de sedimento são variáveis extremamente importantes e que regulam o depósito de LF. Por exemplo, a presença de lama junto ao leito modifica a cinemática do fluido, alterando a circulação, reduzindo o atrito e modificando a propagação de ondas [Beardsley *et al.* 1995].

Mehta [1991] propõe uma subcategorização da camada de LF em virtude das transições de fase e do caráter do fluxo (Fig. 3), identificando esta camada através da designação de uma camada hiperpicnal [Wright *et al.* 1988] com potencial mobilidade horizontal. Os autores determinam que o limite inferior desta camada é o momento no qual a velocidade do fluxo horizontal torna-se zero, de forma que, a lama abaixo dessa camada é considerada estacionária no sentido horizontal de movimento. Segundo Mehta [1991] a diferença entre a lama estacionária e o leito coeso abaixo é que este último se caracteriza pela ocorrência de uma tensão efetiva mensurável, enquanto na lama estacionária essa tensão é zero. No geral, a LF apresenta um comportamento reológico não newtoniano [McAnally *et al.* 2007b], ou seja, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento não é linear.



**Figura 3:** Estratificação horizontal no perfil vertical de concentração (C) de sedimentos em suspensão para condições de alta concentração. Fonte: Winterwerp & Van Kesteren 2004 adaptado de Mehta 1991.

O comportamento resultante depende da integração de conhecimentos singulares. Estudar a reologia da LF permite avançar no entendimento e caracterizar de forma prática estes depósitos. Barnes *et al.* [1989] definem a reologia como o estudo da deformação e fluxo de matéria. Como muitas propriedades da LF, a reologia varia acentuadamente entre as diferentes fontes de lama, tornando difícil generalizar suas propriedades de fluxo [McAnally *et al.* 2007a]. Análises reológicas nos permitem entender como os parâmetros viscosidade, tensão de cisalhamento, taxa de cisalhamento e densidade se inter-relacionam [Carneiro *et al.* 2017].

Adicionalmente, a LF apresenta um comportamento dependente do tempo (tixotropia), onde a viscosidade aparente também é função da duração do cisalhamento no qual o fluido foi submetido, bem como a história cinemática anterior [Chhabra 2010]. A tixotropia em fluidos não-newtonianos é uma propriedade do comportamento visco-elástico submetido ao efeito temporal, onde ocorre a diminuição da viscosidade com o tempo a uma taxa de deformação de cisalhamento constante, havendo a recuperação do sedimento ao estado anterior após um período de inércia [Winterwerp & Van Kestern 2004; Chhabra 2010]. As propriedades tixotrópicas afetam diretamente as propriedades reológicas [Wurpts & Torn 2005] pois a viscosidade diminui com a duração do cisalhamento [Chhabra 2010]. Portanto,

a fluidez depende também da duração e intensidade da tensão cisalhante, podendo retornar a um estado mais consolidado (maior firmeza) quando mantida em repouso por um período determinado [McAnally *et al.* 2007a].

Como a camada de LF pode variar sua densidade e viscosidade de acordo com a tensão de cisalhamento realizada, efetivamente, no ambiente, a passagem de tempestades, aumento do regime enchente/vazante, navegação, entre outros, são alguns dos fenômenos que podem erodir este extrato, remodelar o fundo e ser responsável por modificar este acúmulo.

### 3.2. Pesquisas em Lama Fluida: Panorama geral para o Brasil e o mundo

Cerca de 75% dos ambientes costeiros entre latitudes 25° N a 25° S são ricos em sedimentos lamosos [Lugo & Snedaker 1974; Wong & Tam 1995; Gensac *et al.* 2015] e, geralmente, estão associados a grandes rios [Healy *et al.* 2002]. Muitas vezes, estudar as características do sedimento tem o intuito apenas de caracterizar o meio no qual a fauna e flora está inserida [James *et al.* 2020]. Alguns países utilizam a camada de LF para navegação, desenvolvendo pesquisas específicas para caracterizar as propriedades e comportamento da LF e camadas adjacentes para aumentar o calado navegável de portos [Wurpts & Torn 2005; Mehta *et al.* 2014; Shakeel *et al.* 2019; Shakeel *et al.* 2020]. A Figura 4 apresenta a distribuição global de alguns locais com trabalhos publicados que, ou estudam a camada de LF ou caracterizaram o sedimento lamoso de forma a já identificarem uma camada móvel de LF no processo de consolidação.



**Figura 4:** Mapa-múndi com a localização de alguns ambientes com estudos em lama publicados. Dimensão dos símbolos meramente ilustrativa.

As características hidrodinâmicas dos locais que estudam a camada de LF no Brasil estão dispostas na tabela 1, apresentando alguns estuários que abrigam os canais de navegação dos maiores portos brasileiros e os depósitos do Amazonas.

**Tabela 1:** Sumário de trabalhos brasileiros caracterizando a camada de LF e dinâmica do ambiente. VMM = Variação média de maré. MMS = Média maré de sizígia. MMQ = média maré de quadratura.

Local	Características Hidrodinâmicas e dos Depósitos de LF	Ref.
Amazonas	Regime de macromaré, alta descarga do rio e influência cíclica de vento. MMS: 3.1 m.	Kineke <i>et al.</i> 1996
	Perfil estratificado da camada de LF: camada de LF próxima ao fundo com espessura variando de 1 a 2m com concentrações altas variando 10 a 200 kg/m <sup>3</sup> , sedimentação impedida atuando como processo dominante; camada intermediária de flocculação em suspensão, 1m de espessura com concentração entre 1 a 10 kg/m <sup>3</sup> ; camada superior bem misturada com concentrações menores que 1 kg/m <sup>3</sup> , a camada da suspensão diluída, tamanho de grão próximo a 3 µm e extremamente dependente do pico de descarga do rio em Maio-Junho.	Vinzón & Mehta 2003; Van Rjin 2016
	Distribuição granulométrica: 85% silte, 10% argila e 5% areia [Vinzón & Gallo 2016].	Carneiro <i>et al.</i> 2020
São Paulo	Regime de micromaré VMM: 0.47m e MMQ: 1.5 m. Estuário caracterizado como parcialmente estratificado. Porto com frequentes dragagens para retirada da camada de LF.	Harari & Camargo 2003
	Distribuição granulométrica: 65% silte, 15% argila e 20% areia. Espessura de LF: 0.31m.	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Itajaí	Regime de micromaré misto predominante semi-diurna. VMM: 0.8m. MMS: 1.2m. O estuário do rio Itajaí-açu é considerado parcialmente misturado. MMQ: 0.3m e, nestes momentos, considerado estratificado. Porto com frequentes dragagens para retirada da camada de LF.	Nichols & Biggs 1985; Pion 2017
	Distribuição granulométrica: 80% silte, 15% argila e 5% areia. Espessura de LF: 0.34m.	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Rio Grande	Costa dominada por ondas, regime de micromaré, misturadas do tipo diurno com VMM=0.47m na desembocadura do estuário da Lagoa dos Patos.	Garcia, 1997
	Frequentes tempestades meteorológicas, variabilidade sazonal e, efeito dominante do vento, bidirecional com ação local e não-local no estuário.	Möller <i>et al.</i> 2001
	Distribuição granulométrica: 80% silte, 15% argila e 5% areia fina.	Calliari <i>et al.</i> 2009
	Deposições frequentes de LF em toda faixa da praia do Cassino. Anteriormente os depósitos de LF na antepraia eram atribuídos à descarga da Lagoa dos Patos e atualmente, sua origem está sendo novamente questionada, sugerindo que haja influência antrópica, especificamente dos processos de dragagem. Porto com frequentes dragagens para retirada da camada de LF.	Villwock & Martins 1972; Calliari <i>et al.</i> 2009; Calliari <i>et al.</i> 2020
Vitória	Regime de micromaré, exposição moderada a ondas. Estuário classificado como de planície costeira.	Neves <i>et al.</i> 2012
	Material sedimentar do porto contento baixo conteúdo carbonático, alto conteúdo de sedimentos finos. Distribuição granulométrica: 61% silte, 19% argila e 20% areia. Espessura de LF: variável de 0.18 a 0.9m.	Soares 2019

Os bancos lamosos desenvolvidos na plataforma continental da América do Sul, entre a desembocadura do rio Amazonas e o delta do rio Orinoco são feições muito estudadas devido a sua singularidade (Tab. 1). O sistema de planícies lamosas entre marés formado pela migração de bancos lamosos não contínuos e efêmeros desde Macapá (BR) à Guiana, possui 90% de seu sedimento composto por lama [Bouysse *et al.* 1977; Milliman & Meade 1983; Gensac *et al.* 2015] originada pelas descargas dos rios Orinoco e, principalmente, o Amazonas. A formação destes bancos é iniciada no Cabo Cassiporé (Brasil) mas ainda não é bem compreendida [Wells & Coleman 1978; Eisma *et al.* 1991; Allison *et al.* 2000; Anthony *et al.* 2010, 2014].

O regime de maré apresenta um gradiente de intensidade entre a desembocadura do rio Amazonas e o restante da costa, até a Guiana; passando de um regime de macromaré, atingindo 8m, a um regime de mesomaré com tendência a micromaré, apresentando variação de 1.8 a 3m [Anthony *et al.* 2014].

Morfologicamente, estes bancos lamosos são divididos em duas áreas: a porção longitudinal próxima a costa, influenciada pelos ciclos de maré e a porção mais *offshore*, exposta e afetada pelo regime de ondas [Gensac *et al.* 2015]. Os bancos lamosos possuem dimensões tais como 10 a 60 km de comprimento, 20 a 30 km de largura, 5m de espessura e espaçados por 15 a 25 km [Gensac *et al.* 2015]. O sistema de bancos lamosos apresenta migração com sentido nordeste ao longo da costa, com alta mobilidade, dominados pela combinação das ondas e correntes próximas a costa.

Um resultado importante para a região está exposto em Gensac *et al.* [2015]. Os autores combinaram a amostragem de testemunhos, altímetros ultrasônicos e eco sondas com frequência 2MHz para compreender o processo de deposição, consolidação e erosão do pacote de lama. Os métodos mediram com sucesso o processo de deposição sucessiva das camadas de lama, identificando a cada ciclo de maré, a deposição de finas camadas (<5 mm) de LF. A sedimentação da porção consolidada ocorre no período de maré alta. A erosão da camada no canal de drenagem ocorre através das correntes de maré de sizígia, o fluxo remobiliza o sedimento através de canais secundários atingindo maiores elevações do banco lamoso, ou seja, lamas consolidadas com presença de mangue e/ou biofilmes. A presença do biofilme nas camadas de lama permite a acresção do depósito de forma que, entre uma

deposição e outra, esta camada de biofilme se desenvolve e migra no sentido descendente, atravessando até cerca de 10cm no pacote de LF, durante a estufa de maré baixa.

O estudo também mostrou como a erosão que ocorre na porção *offshore* dos bancos lamosos é um processo chave para sua migração, pois o sedimento remobilizado é redirecionado para os locais onde ocorre a formação dos bancos e onde o sedimento é fixado e consolidado no ecossistema dos mangues e porção interna das planícies lamosas. A variabilidade da maré permite um sistema de redistribuição e remobilização do sedimento da porção interna dos bancos lamosos, onde as “bolas” de lama, pacotes arredondados de lama com maior grau de consolidação, são desmanteladas, erodidas e fluidizadas, fornecendo novo sedimento ao sistema [Gensac *et al.* 2015].

Alguns trabalhos realizados no Brasil utilizam a abordagem multi-frequência para identificar a camada de LF, *in situ* e em experimentos de laboratório. A tabela 2 reúne as informações publicadas para o Brasil referentes às densidades de reflexão do sinal acústico de dupla frequência.

**Tabela 2:** Sumário de trabalhos brasileiros e as densidades refletidas pelas ecossondas de dupla frequência em uma aborgagem multi-frequência.

Local Amostrado	HF (kHz)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) HF	LF (kHz)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) LF	Espessura (m) LF-HF	Ref.
Porto de Itajaí (SC)	200	1021	24	1327	0.345	Carneiro <i>et al.</i> 2020*
Porto de Santos (SP)	200	1046	28	1245	0.315	Carneiro <i>et al.</i> 2020*
Canal Norte do Amazonas (AM)	210	1136	28	1402	0.192	Carneiro <i>et al.</i> 2020*
Coluna de Sedimentação Cenário A	200	~1140	33	Fundo da coluna	1.19	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Coluna de Sedimentação Cenário B	210	~1170	33	~1170	0.02	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Porto de Itajaí (SC)	-	-	33	1150 a 1200	0.5m a 2.5m	Pion 2017
Porto de Tubarão (Vitória, ES)	200	1050	38	1150 a 1200	0.18 a 0.90	Soares 2019
Coluna de Sedimentação Cenário B	200	~1200	50	~1200	0.03	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Coluna de Sedimentação Cenário C	200	~1030	50	~1220	0.82	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Coluna de Sedimentação Cenário C	200	~1060	50	~1200	0.38	Carneiro <i>et al.</i> 2020

\*Representam os valores médios.

Carneiro *et al.* [2020] medem o depósito de LF em diversos portos do Brasil com a ecossonda de dupla frequência, chirp e densímetro, além de coletar sedimento do porto de



Itajaí (Santa Catarina) para elaboração de um experimento em laboratório com a intenção de testar estes métodos em um ambiente controlado, utilizando diversos cenários-teste em uma coluna de sedimentação (dados da Tab. 2).

Pion [2017] em sua dissertação, utilizando coletas *in situ* com densímetro, ecossonda de dupla frequência e modelagem numérica, avaliou a aplicação do conceito de fundo náutico ao porto de Itajaí (Santa Catarina). Embora o autor não apresente os valores de densidade relacionados a alta frequência, apresenta o intervalo de densidade que a baixa frequência 33 kHz foi capaz de identificar. Neste levantamento, a ecossondagem de baixa frequência identificou a profundidade em que ocorrem as massas específicas de 1150 kg/m<sup>3</sup> e 1200 kg/m<sup>3</sup>. Para os meses de julho e novembro de 2007, a cota em que foi encontrada massa específica de 1150 kg/m<sup>3</sup> apresenta melhor correlação com a cota obtida com ecobatímetro de 33kHz. Adicionalmente, nota-se que, em maio de 2007 as cotas em que foram encontradas as massas específicas de 1200 kg/m<sup>3</sup> e 1250 kg/m<sup>3</sup> apresentam valor de R<sup>2</sup> semelhante quando relacionadas às cotas obtidas no levantamento batimétrico de baixa frequência.

Soares [2019] elabora sua dissertação utilizando uma abordagem multi-frequência para mapear o depósito de LF do Porto de Tubarão (Vitória, Espírito Santo). A baixa frequência 28 kHz usada no Porto de Santos [Carneiro *et al.* 2020] é capaz de identificar camadas de LF com maior grau de consolidação (densidade de 1245 kg/m<sup>3</sup>) enquanto a baixa frequência 33 kHz usada no Porto de Tubarão [Soares 2019] reconhece as densidades de 1150 a 1200 kg/m<sup>3</sup>. Segundo a literatura, é esperado que a baixa frequência 28 kHz seja capaz de penetrar a maiores camadas de consolidação que a baixa frequência 33 kHz.

A tabela 3 reúne diversos exemplos de ambientes da América do Norte e do Sul (com exceção do Brasil) que contam com estudos em sedimentos lamosos. A camada de lama no Canadá, no estuário de Petitcodiac é estudada em seus diferentes níveis de consolidação, especificamente para determinação da dinâmica de flocos de lama sob ação das correntes de maré (*mud floccule ripples*) [Shchepetkina *et al.* 2017].

A camada de LF no porto de Montevideu (Uruguai) ainda não foi estudada com a intenção de desenvolver a navegação segura nesta camada. Muniz *et al.* [2014] avaliaram a contaminação dos sedimentos por metais pesados e hidrocarbonetos de petróleo no canal de navegação do porto de Montevideu. Carneiro *et al.* [2020] não apresentaram os dados de perfis de densidade para este porto, entretanto compara os dados obtidos utilizando ecossonda

de dupla frequência 33/200 kHz e chirp 3.5 kHz com o conjunto de dados do porto de Santos (São Paulo) (ecossonda de dupla frequência 28/200 kHz e chirp 2– 8 kHz). Em Montevideu, os dados de chirp conseguiram penetrar mais profundamente nas camadas que a baixa frequência da ecossonda, entretanto não informa seus valores de densidade.

**Tabela 3:** Sumário de exemplos que possuem presença de LF e breve apresentação das características hidrodinâmicas locais dentro do continente americano com exceção do Brasil. VMM = Variação média de maré. MMS = Média maré de sizígia. MMQ = média maré de quadratura.

<b>País e Local</b>	<b>Características Hidrodinâmicas e dos Depósitos de LF</b>	<b>Ref.</b>
	Estuário bem misturado com fortes correntes de maré e baixa descarga fluvial e alta turbidez.	Wojda 2011
Canadá: Estuário Petitcodiac, New Brunswick	Regime de macromaré na desembocadura com MMS de até 15m. Na porção superior do estuário possui regime de micromaré com VMM variando de 1 a 2m.	Morand & Haralampides, 2006; Heath 2009
	Distribuição granulométrica média 2,5% areia, 58% silte e 39,5% argila.	Shchepetkina <i>et al.</i> 2017
Guiana	Variação no gradiente de intensidade de maré (micromaré a mesomaré, MMS de 1.8 a 3m).	Anthony <i>et al.</i> 2014
Francesa: Banco lamoso Kourou e outros bancos associados.	A distribuição granulométrica nos bancos lamosos: compostos de 45 a 60% de silte fino, cerca de 25% de silte grosso, 10 a 15% de argila e 15% de areia fina. Espessura: cerca de 5m com finas camadas (até 0.3m) de LF intercaladas com biofilme e o sucessivo processo de colonização de mangue.	Gensac <i>et al.</i> 2015
Suriname	VMM: 1.8m. MMS: 2.8m. MMQ: 1m. Energia de onda alta a moderada.	Wells & Coleman 1981;
	Espessura de LF de aproximadamente 1.5m. Densidade das camadas de LF variam de 1030 a 1250 kg/m <sup>3</sup> , o conteúdo de água varia de 64-96%, conteúdo de MO 1.5 a 2.2%.	Rine & Ginsburg 1985
Uruguai: Porto de Montevideo	Variabilidade sazonal. Correntes controladas por marés meteorológicas e regime de micromaré variando cerca de 1m na porção sul da baía e 0.35m na porção norte.	Muniz <i>et al.</i> 2004; Santoro <i>et al.</i> 2013
	Distribuição granulométrica com 72% silte, 18% argila e 10% areia.	Carneiro <i>et al.</i> 2020

A tabela 4 mostra exemplos de estudos em LF no continente europeu. Países como Alemanha, Holanda, Inglaterra e França navegam com segurança em LF e investiram na exploração destas camadas, estando na vanguarda da pesquisa acerca deste assunto.

**Tabela 4:** Sumário de exemplos que possuem presença de LF e breve apresentação das características hidrodinâmicas locais dentro do continente europeu. VMM = Variação média de maré. MMS = Média maré de sizígia. MMQ = média maré de quadratura

País e Local	Características Hidrodinâmicas	Ref.
Alemanha: Estuário Ems-Dollard e Porto de Emden, Mar de Wadden	Descarga do Rio Ems: 20 a 400 m <sup>3</sup> /s com média de 100 m <sup>3</sup> /s. Regime de mesomaré com predominância semi-diurna com VMM: 2.3 a 3.5m MMS ampliada a 5m.	Wurpts & Torn 2005
	Onde há conexão com o mar, a coluna d'água se torna menos turva, onde há influência do rio a turbidez é elevada (concentração de 10 a 80 kg/m <sup>3</sup> ).	Van Rjin 2016
Alemanha: Estuário Weser, Mar do Norte	Estuário parcialmente misturado com o desenvolvimento de uma ZTM bem marcada.	Grabemann <i>et al.</i> 1997
	A porção superior do estuário é considerada mesomaré e a porção inferior, macromaré. VMM 3.5m ± 1m em Bremerhaven.	Schrottke <i>et al.</i> 2006
Holanda: Amsterdã, Canal Holwerd	VMM cerca de 3m. Fundo do canal composto por lama arenosa onde o fundo consolidado possui cerca de 15 a 20% de argila. Duas camadas em suspensão se desenvolvem no período de enchente: uma suspensão lamosa com 1 a 2m de espessura e concentrações entre 1 a 10 kg/m <sup>3</sup> e uma camada de suspensão diluída com 3 a 4m com concentrações de lama superiores a 1 kg/m <sup>3</sup> . Em outros canais espessuras de < 0.3m foram observadas.	Van Rjin 2016
Inglaterra: Estuário Humber, Mar do Norte	VMM: 4.8 m; MMS: 6.4m; MMQ: 3.2m (em Immingham).	ATT 2005
	Estuário altamente turvo. O material particulado em suspensão na zona de turbidez máxima consiste de sedimento fino (silte e 20-30% argila) presentes sob forma de agregados, microflocos e macroflocos ou partículas primárias.	Uncles <i>et al.</i> 2006
Inglaterra: Estuário Severn	Estuário bem misturado de macromaré. MMS: 12.3m; MMQ: 6.5m (em Avonmouth). Durante o período de estofa da maré há a formação de espessuras de LF de cerca de 2 a 3m. Durante o ciclo de marés de sizígia e quadratura, apenas a porção mais densa da camada de LF permanece.	Van Rjin 2016
Portugal: Estuário Tagos	O estuário é classificado como mesomaré com VMM entre 2m na desembocadura e 2.6m na porção superior. MMS: 4m e MMQ: 1m.	Nogueira <i>et al.</i> 2012
	É composto por tidal flats (64%) e marismas (13%). Os tidal flats possuem percentuais de argila maiores que 10%. Os marismas apresentam menor que 5% de areia. Não existem pesquisas específicas para a camada de LF.	Franz <i>et al.</i> 2014

Um exemplo muito estudado na Europa é o estuário Gironde (França), considerado sob um regime de macromaré com turbidez elevada [Tseng *et al.* 2001]. Allen *et al.* [1977] discutem que, morfologicamente, o estuário é dividido em dois sistemas de canais distintos, o canal do sul é mais profundo e possui um ciclo de maré bem marcado. A variação de maré na desembocadura varia de 1.55m durante as marés de quadratura a 5m durante as marés de sizígia. A maré é ampliada na porção superior do estuário, atingindo até 6m. A LF é

encontrada apenas no canal sul, formando bolsões com concentração de sedimento superiores a 250 g/l. O ciclo de erosão e formação destes bolsões segue o ciclo de maré: durante as marés de quadratura, a LF acumula devido a sedimentação da zona de turbidez máxima e atinge maiores espessuras; durante a maré de sizígia esta camada é erodida e resuspensa para a zona de turbidez máxima.

A tabela 5 apresenta exemplos de locais onde a LF é estudada no continente asiático. Na China os canais de navegação apresentam espessuras de LF inferiores a 1m. Um evento extremo ocorreu em 2014 e atuou na costa modificando bruscamente as forçantes meteorológicas. Ligado a este evento, houve a formação de LF no canal norte do estuário Yangtze [Wan *et al.* 2014]. Em Liangyungang, Xie *et al.* [2010] discutem que não há formação de LF no canal de navegação deste porto.

**Tabela 5:** Sumário de exemplos que possuem presença de LF e breve apresentação das características hidrodinâmicas locais dentro do continente asiático. VMM = Variação média de maré. MMS = Média maré de sizígia. MMQ = média maré de quadratura.  $H_s$ =Altura significativa de onda.  $H_{max}$ =Altura máxima de onda

País e Local	Características Hidrodinâmicas	Ref.
China: Canal Norte do Estuário Yangtze, Shangai	Evento de LF com espessura variável de 1 a 5m decorrente da passagem de uma frente fria intensificada. $H_s$ de 0.5 a 2.2m. $H_{max}$ = 4.35m. Esta foi uma forte tempestade induzida pelo vento (Escala Beaufort 6 a 7) que perdurou 10 dias na costa com vento de direção norte.	Wan <i>et al.</i> 2014;
China: Canal Norte do Estuário Yangtze, Shangai	Presença de LF com grão médio 7.23 $\mu$ m e espessura variável de acordo com a maré, VMM < 5m. Durante MMQ a espessura varia de 0.2 a 0.96m e, durante a VMM a espessura varia de 0.17 a 0.73m. Durante o período de vazante a espessura de LF foi maior do que nos períodos de enchente.	Zang & Ruan 2002
Índia: Porto de Cochin, Lagoa Cochin, Kerala	Porto com proteção natural de dois promontórios. Variabilidade dependente das monções com conseqüente aumento da descarga do rio. VMM: 1m. Clima de ondas com relação ao período de monções, onde aumenta sua intensidade. Dentro do porto a ação de ondas é insignificante. O canal interno possui camadas de LF cíclicas: no período pré-moções não há presença de LF, durante as monções a espessura de LF atinge aproximadamente 6-7m e após este período é observada a consolidação desta camada.	Ferket <i>et al.</i> 2017
Japão: Estuário Chikugo, Mar Ariake	VMM: 2.5 a 8m. MMS: 5m. MMQ: 1.5m. Espessura de LF: 0.9m. Distribuição granulométrica: 65% silte, 35% argila com porções insignificantes de areia fina. Conteúdo de água: 200 a 450%. Viscosidade: 10 a 120 Pa s, considerado alto.	Azhikodan & Yokoyama 2018

O trabalho de Ferket *et al.* [2017] (Tab. 5) apresenta estudos iniciais para implementação do conceito de navegação em LF no porto de Cochin. A LF da Índia está ligada a alta descarga dos rios durante o período de monções, atingindo 6 a 7m de espessura

de LF. Após este período, não há presença de LF pois há a alteração do seu comportamento e grau de consolidação.

Segundo Azhikodan & Yokoyama [2018], a LF presente no estuário do rio Chikugo (Japão) pode ser subdividida em três camadas de acordo com a viscosidade. A camada superior é composta quase puramente por água com uma viscosidade de 10 Pa s e conteúdo de água entre 370 a 450%. A camada intermediária se torna mais comprimida e a viscosidade aumenta de 10 a 40 Pa s com um conteúdo de água variando de 300 a 350%. A LF no fundo já se torna consolidado com o efeito de pressão da coluna acima, rapidamente aumenta sua viscosidade de 40 a 120 Pa s enquanto o conteúdo de água supersaturada varia entre 200 a 300%. As observações dos autores identificaram a formação da camada de LF diária, onde o sedimento em suspensão deposita e acumula formando espessuras variáveis de LF de até 0.9m.

A tabela 6 apresenta estudos de caracterização sedimentar no estuário Mbashe (África do Sul) para avaliar como a variação das condições hidrodinâmicas modelam a ecologia do local. O estuário é extremamente raso (profundidade média de 1m), apresenta intrusão de água salgada que possibilita o processo de floculação dos sedimentos finos, acumulando na forma de LF [Bianchi 2013] com espessura variável dependente do grau de exposição de correntes [Day 1981; Plumstead *et al.* 1989].

**Tabela 6:** Sumário de exemplos que possuem presença de LF e breve apresentação das características hidrodinâmicas locais dentro do continente africano e Oceania. VMM = Variação média de maré. MMS = Média maré de sizígia. MMQ = média maré de quadratura

País e Local	Características Hidrodinâmicas	Referência
	MMS: 2m. MMQ: 0.5m dados para o Porto de Elizabete.	Schumann 2015
África: Estuário Mbashe, África do Sul	Estuário Mbashe altamente turvo com baixa profundidade. Praticamente toda a coluna d'água possui características de LF, rica em sedimentos finos sob o leito arenoso. Entretanto, a distribuição granulométrica é variável, de acordo com o período de enchentes, se tornando progressivamente mais rica em areias finas (até 55%).	James <i>et al.</i> 2020
	Espessura de 1-2m de LF acumulada entre os períodos de dragagem. Proximidade com a Grande Barreira de Corais.	Wolanski & Gibbs 1992;
Austrália: Porto de Townsville, Cleveland Bay, Queensland	Máximo da maré astronômica: 4.01m.	Johnson & Carter 1987;
	MMS: 2.34m. MMQ: 0.63m.	Coastal Engineering Studies 2007

James *et al.* [2020] discutem que a presença de camadas de LF neste ambiente único contribui significativamente para a abundância e diversidade de biotas móveis como zooplâncton e peixes. Os eventos de enchente e aumento da descarga do rio causaram temporária diminuição dos pacotes de LF e afetaram a diversidade, composição e abundância de macrobentos e espécies de peixes.

### **3.3. Detecção e Monitoramento da Lama Fluida**

Neste tópico serão explicados os princípios de funcionamento das tecnologias utilizadas neste trabalho com a finalidade de detectar e monitorar a camada de LF. Os métodos indiretos foram adaptados para identificar a espessura de LF a partir da ecossonda de dupla frequência. Entretanto, houve a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias que permitissem perfilar a estrutura vertical de LF *in situ* e em tempo real, sendo assim, o densímetro é o método direto utilizado neste levantamento.

#### **3.3.1. Métodos acústicos indiretos: Ecossonda de dupla frequência**

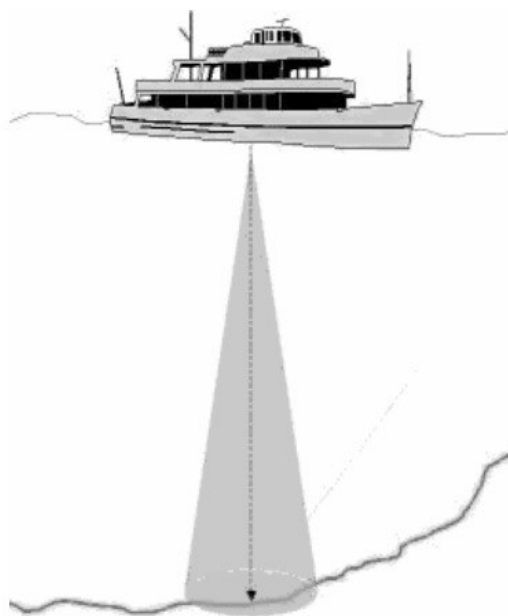
Para a investigação de áreas submersas, os métodos geofísicos permitem a obtenção de dados detalhados sobre a morfologia da superfície e da subsuperfície de fundo. Aplicar estes métodos possibilita a identificação da espessura das camadas sedimentares e da profundidade do embasamento rochoso, além da identificação e da caracterização de estruturas geológicas em subsuperfície [Souza 2006].

Os métodos geoacústicos são comumente usados em áreas portuárias para monitorar, determinar a profundidade navegável e avaliar os volumes de material a ser dragado [Kirichek *et al.* 2020]. Estes recursos compõem um conjunto de técnicas de investigação geofísicas indiretas com grande relevância no estudo de áreas submersas, já que são procedimentos não destrutivos e viáveis para a observação de áreas extensas e contínuas [Telford *et al.* 1990].

A detecção da profundidade e espessura da camada de LF também pode ser determinada por estes métodos, utilizando a ecossonda monofeixe de dupla frequência [Winterwerp & Van Kesteren 2004].

As ecossondas e ecobatímetros se baseiam na propagação de ondas acústicas de um transdutor-receptor. O transdutor da ecossonda é feito de um material cerâmico piezoelétrico

que sofre deformações milimétricas em caso de aplicação de corrente elétrica, produzindo ondas sonoras e, transmitindo para a água, uma onda de pressão com uma frequência específica. Após sua reflexão, o pulso retorna ao transdutor e, através do efeito piezoelétrico reverso, são gerados os dados de profundidade [Hughes Clarke 2000]. Para ecossondas monofeixe, os pulsos acústicos emitidos pela fonte se espalham na forma de um cone estreito e retornam da mesma maneira para o receptor (Fig. 5). A profundidade adquirida pelo método batimétrico é função da nitidez do gradiente de densidade do meio [Carneiro *et al.* 2017]. Neste sistema, a profundidade é calculada pelo tempo de viagem e pela velocidade do sinal acústico para o receptor [Clay & Medwin 1977]. O tempo de retorno do sinal acústico depende da profundidade local, ou seja, quanto mais profundo o local mapeado, maior o tempo de retorno ao receptor na embarcação. A velocidade da onda acústica também pode variar dependendo da temperatura, salinidade e pressão [Telford *et al.* 1990]. Neste trabalho, a velocidade de propagação do sinal acústico não foi calculada para o sedimento local, sendo utilizado o valor padrão de 1500 m/s.



**Figura 5:** Ecossonda monofeixe em operação. Fonte: Soares 2019.

Dependendo do estado reológico da lama, esta pode apresentar diferentes respostas acústicas tanto em ecossondas monofeixe de dupla frequência quanto em perfis sísmicos [Soares 2019; Carneiro *et al.* 2017; Wurpts 1998; Madson & Sommerfield 2003]. Mudanças

de densidade e velocidade de propagação das ondas acústicas geram contrastes de impedância acústica ao longo do meio, o que leva a reflexão e refração do pulso acústico [Quaresma *et al.* 2011].

Souza [2006] explica que o fenômeno físico da reflexão das ondas acústicas só ocorre quando existem contrastes representativos entre os meios atravessados pelo sinal acústico emitido. Desta forma, o autor explica que, teoricamente, corpos extremamente homogêneos não refletem as ondas acústicas, até que estas encontrem obstáculos ou interfaces acústicas (rocha, por exemplo). Da mesma forma, a quantidade de energia que é refletida, quando o sinal acústico atinge uma superfície ou uma interface, é função direta do contraste de impedância (produto entre a velocidade de propagação do som num meio e sua densidade) entre os dois meios.

A escolha do equipamento e frequência utilizada está intimamente relacionada à profundidade do local mapeado e à relação entre a definição da camada sedimentar e a profundidade de subsuperfície mapeada. Camadas lamosas com diferentes graus de compactação irão induzir contrastes de impedância acústica que serão registrados como um eco duplo no ecobatímetro [Quaresma *et al.* 2011]. Ressalta-se que o sinal acústico não reflete em uma densidade específica, mas sim na presença de gradientes de impedância acústica [Winterwerp & Van Kersten, 2004].

A estrutura vertical teórica da camada sedimentar possui duas interfaces marcadas por gradientes de densidade. A primeira interface é caracterizada pela interface de transição entre a água do mar e a LF/lamas semifluidas de baixa densidade (lutoclina). O pulso de alta frequência (200 kHz e mais altas) reconhece o contraste de impedância acústica entre a água e a superfície da LF [Bastos *et al.* 2009], ocorrendo a reflexão do mesmo quando há o encontro com a primeira interface.

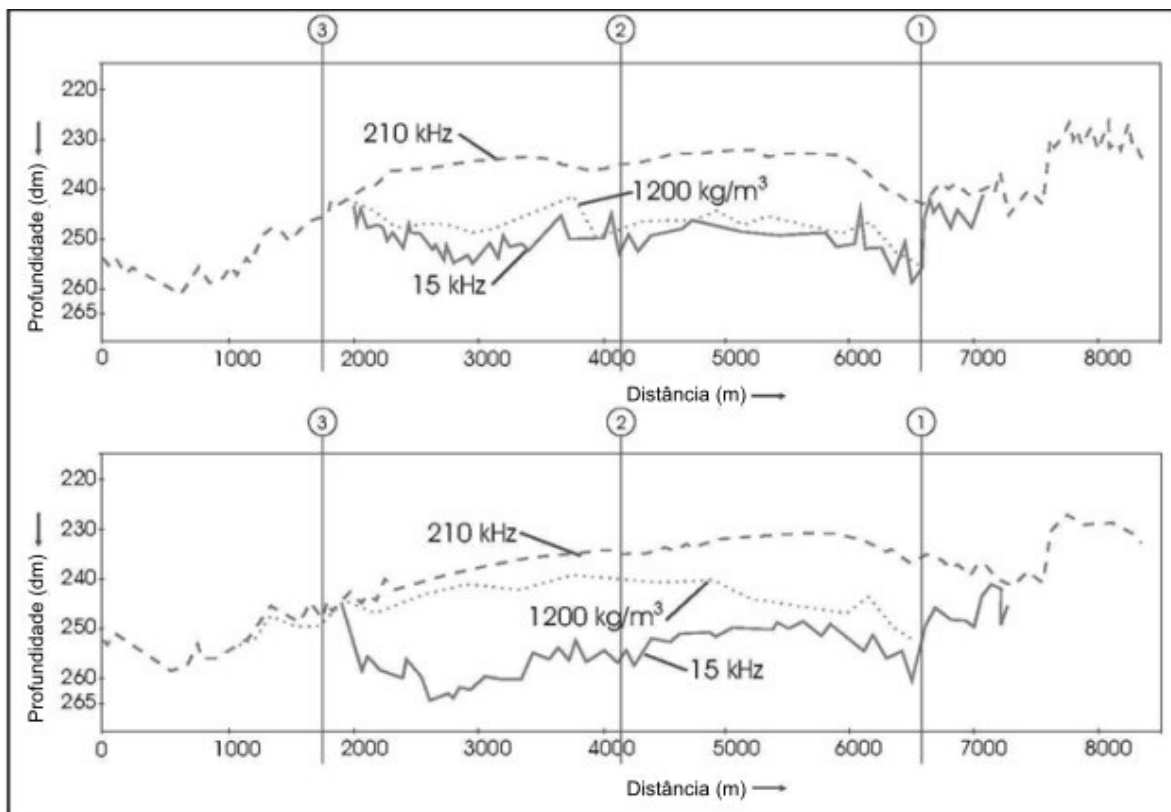
A segunda interface com gradiente de densidade é marcada pela transição entre a LF e a areia ou lama de maior densidade com maiores níveis de consolidação. As ondas sonoras com baixas frequências possuem maior penetração no sedimento e menor resolução, ou seja, há menor detalhamento espacial do limite inferior da camada de LF. Desta forma, o pulso de baixa frequência (24, 30, 33, 38 ou 50 kHz) é capaz de penetrar a primeira interface, mas é refletido quando encontra o segundo gradiente de densidade ou outros gradientes de densidade dentro da camada de LF [Clayes 2006; USACE, 2002, 2013].



Quaresma *et al.* [2011] explicam que os pulsos de alta frequência emitidos pela maioria das ecossondas refletem quando ocorre acúmulo de material na coluna de água. Já as transmissões de baixa frequência, embora capazes de penetrar neste material de baixa densidade, são submetidas a alterações no pulso refletido.

Souza [2006] discute que além dos sinais com frequências da ordem de 200 kHz, que identificam com grande precisão a espessura da coluna d'água e a topografia de fundo, transdutores de menores frequências (geralmente entre 25 e 50 kHz) atuam simultaneamente, proporcionando “certa penetração” no substrato. Por meio destes sistemas de dupla frequência, pode-se penetrar nas camadas de sedimentos finos e inconsolidados.

A figura 6 mostra como a ecossonda de dupla frequência é capaz de separar a resposta da impedância acústica da camada de LF. O exemplo retirado de Winterwerp & Van Kesteren [2004] é um levantamento realizado no Porto de Rotterdam, em duas datas distintas, indicando uma espessura de 1 a 3 m de LF neste local. As frequências utilizadas nesta ocasião foram 210 kHz como alta frequência e 15 kHz como baixa frequência.



**Figura 6:** Levantamento de LF utilizando ecossonda de dupla frequência em 13/11/1998 (superior) e 29/12/1998 (inferior) no canal de acesso ao Porto de Rotterdam. Fonte: Winterwerp & Van Kesteren 2004.

Na figura 6 é possível observar a linha pontilhada como delimitadora da densidade de  $1200 \text{ kg/m}^3$ , para muitos autores representa a troca de comportamento da camada de LF, passando de pseudoplástica para plástica e se tornando mais resistente à manobrabilidade de navios sendo, portanto, um risco para a navegação.

Diversos autores consolidam o uso da frequência de 200 kHz como capaz de identificar o primeiro gradiente de densidade da camada de LF. Atualmente, percebe-se que o aumento acentuado na concentração de sedimentos da lutoclina pode retornar um fundo falso para sistemas de sonar [McAnally *et al.* 2016], fazendo a determinação da profundidade ambígua e altamente variável [Carneiro *et al.* 2017]. Ressalta-se a necessidade de conhecer o sedimento local para garantir a segurança à navegação. Há uma diversidade de baixas frequências que podem ser utilizadas para mapear a morfologia do fundo e estratos do sub-fundo em áreas portuárias. A pesquisa local deve ser desenvolvida para determinar a confiabilidade dos dados e o extrato de densidade que esta baixa frequência é capaz de identificar. Neste contexto, diversos autores exploraram a resposta acústica da camada de LF em diferentes equipamentos geofísicos [Carneiro *et al.* 2017; Soares 2019; Wurpts & Torn 2005; Marroig 2015; Menandro *et al.* 2015; Quaresma *et al.* 2011].

Para Soares [2019] o mapeamento de fundo em áreas com alto acúmulo de sedimentos lamosos gera uma discussão científica sobre a aplicabilidade de diferentes fontes e frequências acústicas. Como discutido anteriormente, diversos países passaram pelo estágio de sondagem e aprendizado sobre como mapear e identificar com segurança o pacote de LF existente. No Brasil, a união entre a pesquisa acadêmica e os portos possibilitou grande avanço no conhecimento dos depósitos situados nos canais de navegação [Schettini *et al.* 2010; Quaresma *et al.* 2011; Menandro *et al.* 2015; Marroig 2015; Carneiro *et al.* 2017; Fonseca *et al.* 2018; Soares 2019].

É importante ressaltar que apenas esses métodos indiretos não determinam a navegabilidade dos depósitos lamosos nem a natureza desse depósito (se fluido, se consolidado, por exemplo) e, conseqüentemente, devem ser acoplados com observações *in situ* através de métodos diretos e amostragens para testes laboratoriais [Carneiro *et al.* 2017; Buchanan 2005].

### 3.3.2. Métodos diretos: Densímetro

Devido às limitações dos métodos acústicos e à demanda de precisão necessária para a operação de navegabilidade, tecnologias alternativas foram desenvolvidas. McAnally *et al.* [2007b] discutem que, em portos como Rotterdam e Zeebrugge foram desenvolvidas e testadas as primeiras ferramentas de medição projetadas para medir as densidades de lama, como sondas radioativas. O densímetro têm a capacidade de identificar o perfil vertical de densidade e de parâmetros reológicos da camada de LF, se tratando de uma medição direta.

A densidade constitui um dos parâmetros mundialmente mais estudados nas camadas de LF e, embora não seja totalmente confiável como único critério de navegação, para o entendimento de depósitos em um ambiente de alta energia, a densidade é o início do esforço para compreensão da dinâmica e comportamento destes bolsões.

O equipamento utilizado neste trabalho para os levantamentos de campo foi o Rheotune (STEMA Systems®). A figura 7 apresenta a sonda em operação. O Rheotune, ou sonda de medição, penetra na camada sedimentar e mensura a frequência e amplitude de materiais fluidos, que é transformada e fornece perfis verticais em tempo real de parâmetros como tensão limite de escoamento (Bingham), viscosidade, tensão de cisalhamento e densidade como saída [Groposo *et al.* 2014]. Para adequá-lo ao sedimento local é necessária uma calibração para a região de estudo, cujo processo é descrito posteriormente no Capítulo V.



**Figura 7:** Apresentação do equipamento de medição direta do perfil de densidade do pacote de LF.  
Fonte: acervo pessoal.

O mecanismo de funcionamento está ligado a um garfo vibratório cuja frequência é responsável por medir as características do material (densidade e viscosidade) do meio no qual ele está imerso [Allwright 2002; Fontein & Byrd 2007; Groposo *et al.* 2014; Carneiro 2018] e à medida que vai penetrando nas camadas do fundo. O equipamento tem uma frequência ressonante próxima a 1kHz no vácuo em uma determinada frequência, aplicando uma tensão a um elemento piezoelétrico localizado em sua base [Soares 2019]. A frequência ressonante natural do sensor de garfo vibratório diminui à medida que a densidade da LF aumenta e a amplitude das vibrações diminui com o aumento da viscosidade [Zheng *et al.* 2012].

Kirichek *et al.* [2020] discutem a interpolação espacial destes perfis verticais de densidade através do sistema SILAS, usado atualmente para detecção do fundo náutico no Porto de Rotterdam e no Porto de Ijmuiden (Holanda). Este sistema é capaz de unir o sinal sísmico da frequência de 38 kHz junto às densidades medidas pelo Rheotune [Diaferia *et al.* 2013]. A partir da mensuração da tensão limite de escoamento, este parâmetro pode ser interpretado como o limite crítico onde o fundo náutico é definido [Mehta *et al.* 2014; Teeter 1992; Van Craenenbroeck *et al.* 1991] como ocorre no Porto de Emden [Wurpts & Torn 2005].

## Capítulo IV: Revisão Literária e Caracterização da Área de Estudo

**E**ste capítulo inicialmente caracteriza a área de estudo, apresentando a descrição de parâmetros meteo-oceanográficos para a região. Como um subitem, são apresentados os eventos de lama na praia. Em seguida, uma sessão específica discorre sobre a evolução da pesquisa nestas deposições, apresentando um breve levantamento histórico e expondo novos argumentos para a discussão.

### 4.1 Caracterização da área de estudo

A praia do Cassino está situada na cidade de Rio Grande (Rio Grande do Sul, Brasil) nas adjacências da desembocadura da Lagoa dos Patos, entre 30° e 32° de latitude sul, possuindo cerca de 220 km de comprimento [Calliari *et al.* 2020]. Segundo Mirlean *et al.* [2020], o porto de Rio Grande é considerado o terceiro maior porto no Brasil e está localizado na porção inferior do estuário da Lagoa dos Patos, possuindo um amplo distrito industrial. O canal de navegação externo e interno passa por dragagens periódicas e, atualmente, o

sedimento dragado é levado a um sítio de despejo *offshore* em profundidades de 19 a 22m a aproximadamente 22km da linha de costa.

A costa do Rio Grande do Sul é dominada por ondas e apresenta deriva litorânea bidirecional com sentidos SO-NE e NE-SO, e transporte líquido de sedimentos para NE [Motta 1969]. A região é submetida a um regime de micromaré com amplitudes médias de 0.5m, classificada como misturadas com uma componente diurna predominante [Möller *et al.* 2001]. A precipitação pluviométrica é bem distribuída ao longo do ano, ficando em torno de 1300-1500 mm [Machado 2013]. No entanto, esta precipitação pode variar significativamente a cada ano, devido ao padrão e frequência de frentes frias que entram no estado [Paz 1985].

Calliari & Klein [1993] afirmam que as marés astronômicas possuem menor importância comparado aos fatores meteorológicos, os principais responsáveis pelas variações do nível d'água (maré meteorológica) [Torres 2000]. Parise *et al.* [2009] investigaram a ocorrência de marés meteorológicas intensas para a Praia do Cassino, associada a ciclones extratropicais, encontrados 23 eventos intensos de elevação do nível do mar (associados com a passagem de 23 ciclones), com 35% dos eventos ocorrendo no outono e inverno, com ventos de sudoeste em 70% dos casos. Os autores estimaram a elevação média em torno de 1m, sendo a máxima registrada com 1.9m [Machado 2013].

A direção de onda dominante nos meses de verão e de primavera é nordeste com altura significativa de 1 a 2m e período de onda de 6 a 8s, assim como no inverno e outono a direção dominante é do quadrante sul com altura de onda de 2 a 3m e períodos de 10 a 12s [Pianca *et al.* 2010]. Os fortes ventos são associados à passagem das frentes frias que ocorrem com maior intensidade durante os meses de outono e inverno e, nesta região a literatura [Stech 1990; Stech & Lorenzetti 1992] mostra que a passagem de sistemas de frente polar se dá em intervalos entre 6 e 10 dias, de forma que estes eventos refletem também na maior frequência de alta energia de ondas. Alturas superiores a 7m e períodos de 15s foram observadas em associação com tempestades vindas de sul [Pianca *et al.* 2010]. Arejano [1999] concluiu que o vento que provém da direção nordeste é o de maior frequência e também o mais intenso, sendo mais importante nos meses de primavera e verão. Secundariamente são também importantes, na ordem, os ventos de sudoeste, nos meses de outono e inverno e sudeste nos meses de inverno e primavera [Machado 2013].

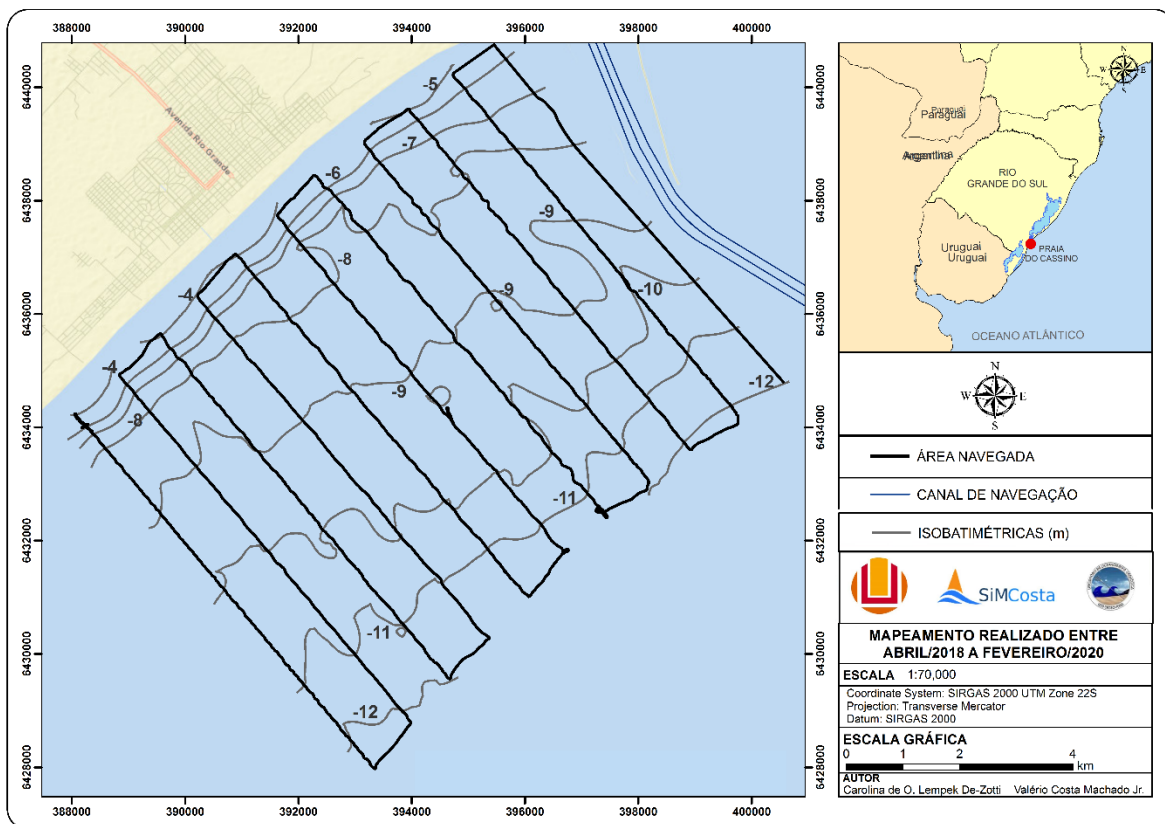
Villwock & Tomazelli [1995] explicam as variáveis envolvidas na dinâmica desta região. A alteração nos processos erosivos e deposicionais é função da dinâmica dos ventos, das conseqüentes ondas geradas e das correntes litorâneas que se desenvolvem quando as ondas chegam à linha de costa. Além do efeito dos ventos e das ondas, as variações de maré e as ressacas produzidas pela passagem de tempestades influenciam fortemente na dinâmica local.

A plataforma adjacente possui duas regiões com características diferentes quanto à morfologia de fundo, a região ao sul da Barra do Rio Grande apresenta-se extremamente homogênea e lisa enquanto a norte, a plataforma tem irregularidades topográficas, representadas por bancos arenosos lineares [Calliari & Fachin 1993]. A composição textural da praia do Cassino pode ser representada como areia fina quartzosa bem selecionada [Tozzi & Calliari 2000].

Calliari & Klein [1993] enquadraram a região próxima à Rio Grande como apresentando características dissipativas, com ampla zona de arrebentação, com uma ou múltiplos bancos paralelos à linha de costa, onde as ondas têm sua energia dissipada. De acordo com Tozzi [1995], a porção sul do Balneário Cassino apresenta uma maior mobilidade devido aos sedimentos mais finos e a baixa declividade na zona de espraiamento, oscilando entre estágios dissipativo a intermediário [Pereira 2005].

Analisando o regime de ondas incidente na praia do Cassino, Calliari & Klein [1993] observaram um comportamento sazonal, com tendência ao desenvolvimento do perfil de acreção de praia entre os meses de novembro e março, e do perfil de erosão no restante do ano [Torres 2000]. Porto [2016] identificou que, entre os anos de 2006 e 2015, houve um rápido aumento na largura da praia, num dado segmento de cerca de 7km de linha de costa, na porção defrontante ao balneário Cassino.

A malha amostral desenhada para este trabalho compreende a plataforma continental interna, especificamente a antepraia, adjacente a desembocadura da Lagoa dos Patos e está disposta na figura 8. A área de estudo compreende um retângulo de aproximadamente 9km de comprimento e 8km de largura. O levantamento amostral foi formado por dez linhas transversais a costa com cerca de 8km de comprimento, espaçadas 1km entre si, abrangendo as isobatimétricas de 2 a 14m.



**Figura 8:** Malha amostral repetida em todos levantamentos do depósito de LF da Praia do Cassino (RS, Brasil). Fonte: própria.

É importante conceituar a profundidade de fechamento, um parâmetro muito utilizado na engenharia costeira para identificar o limite significativo do transporte de sedimentos no sentido transversal a costa em praias arenosas [Nicholls *et al.* 1999]. Este parâmetro é importante pois distingue duas zonas com diferentes níveis de atividade morfodinâmica [Nicholls *et al.* 1999]. Os limites inferior e superior da antepraia são regulados pelas ondas e pelo transporte sedimentar e, portanto, respondem de formas distintas, de acordo com a escala temporal de interesse [Nicholls *et al.* 1998]. A profundidade de fechamento superior é reajustada mais rapidamente [Larson & Kraus 1995], enquanto o limite inferior demora mais tempo para encontrar novamente seu equilíbrio dinâmico (de séculos a milênios) [Cowell *et al.* 1999].

Para calcular a profundidade de fechamento para a praia do Cassino, Figueiredo *et al.* [2019] utilizaram diversas fontes de dados devido a dificuldade de aquisição de dados coletados *in situ* e por um grande período de tempo. Com os dados disponíveis medidos por bóias e com dados modelados, quatro casos de profundidades de fechamento foram testados



como *input* para o modelo que avalia a resposta da linha de costa à elevação do nível do mar. A profundidade de fechamento superior, na antepraia, foi usada como 6.2 e 7.4m enquanto a profundidade de fechamento inferior, mais *offshore*, foi de 35.7 e 42.1m.

É importante ressaltar que o cálculo da profundidade de fechamento segundo as equações de Hallermeier consideram o diâmetro médio do grão ( $D_{50}$ ) coletado entre as profundidades de 9 a 11m. Na praia do Cassino, Figueiredo *et al.* [2019] utilizaram o tamanho de 0.8 mm [Calliari & Fachin 1993; Parise *et al.* 2009] que, segundo Wentworth [1922] é classificado como areia grossa. Assim, é importante levar em consideração que o tamanho médio de grão na antepraia com uma camada de LF considerável pode oscilar entre o silte (0.004 a 0.062mm) e a argila (menor que 0.0062mm). A drástica redução do tamanho médio ocasiona alterações no equilíbrio dinâmico da praia e na capacidade de mobilização de sedimentos de fundo.

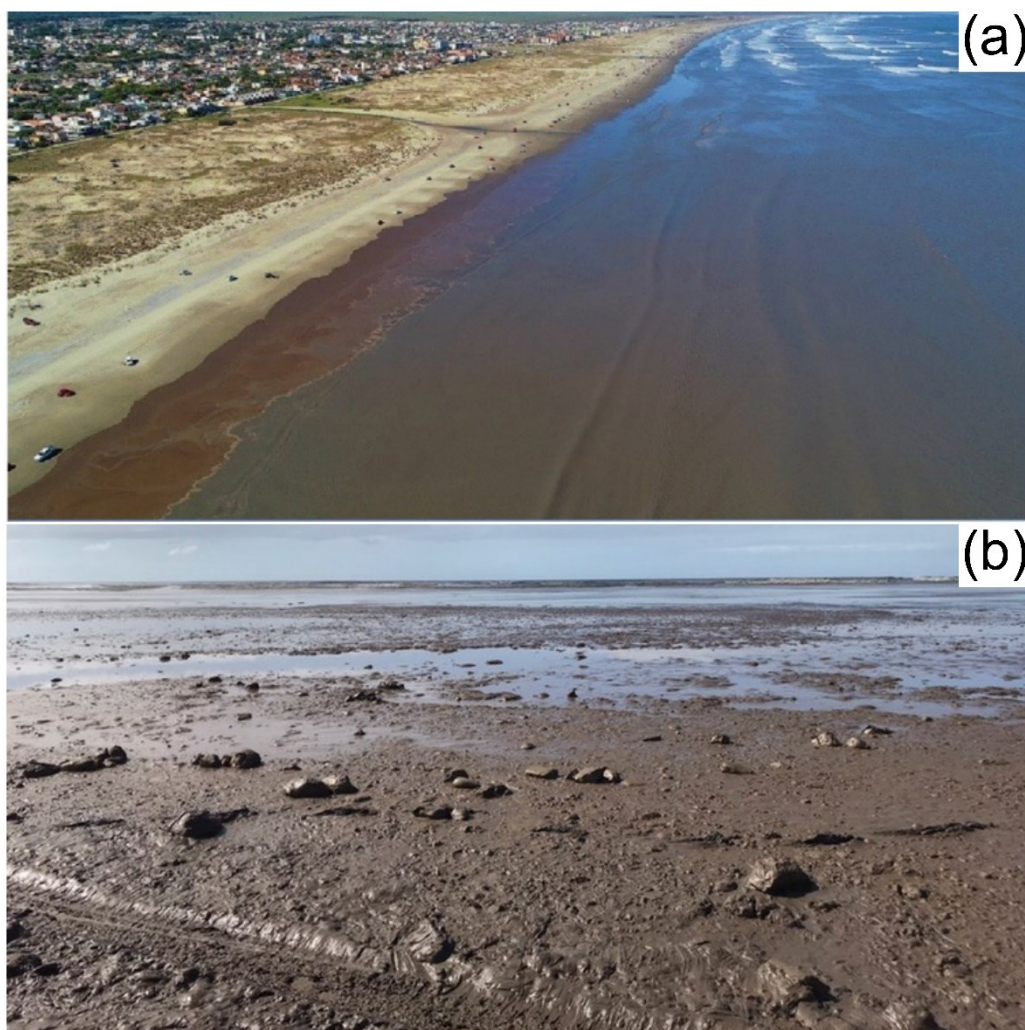
#### **4.1.1 Eventos de lama na praia**

Delaney [1962] comentou a existência de depósitos de argila arenosa na praia do Cassino apresentando espessuras de até 1m. As pesquisas na região evidenciam a existência de um bolsão de lama móvel e intermitente na antepraia [Colleoni 2016; De-Zotti 2018] que, em condições altamente energéticas na região, é conduzido à face de praia [Calliari *et al.* 2000; Calliari *et al.* 2009]. Mapeamentos realizados por Calliari & Fachin [1993] identificaram bolsões de lama ao sul da desembocadura entre 15 e 17m de profundidade, apresentando espessuras de 0.8m.

Estudos realizados em 2005 por Holland *et al.* [2009] determinaram, através de difratometria de raios X a composição da lama, concluindo que os componentes mais abundantes encontrados tiveram fração de tamanho  $<2 \mu\text{m}$ . A maioria das amostras foi composta por esmectita (37 - 43%), illita (32 - 36%), caulinita (14 - 23%) e quartzo (1 - 3%). O alto teor de esmectita confere alta coesão ao material. Neste estudo, a LF foi observada no limite da isóbata de 6m, nunca estando mais próxima da costa. As observações acústicas e os dados coletados *in situ* indicaram que a espessura média da camada de LF era da ordem de 0.4m. As densidades calculadas para a LF foram de  $1,14 \text{ g/cm}^3$  com um teor de água de 73,3%. Em comparação, sedimentos de lama superficial com diferentes níveis de consolidação apresentaram variação de densidade de  $1,3 - 1,8 \text{ g/cm}^3$ .

Muitas vezes estes depósitos de LF da antepraia são remobilizados e transportados à praia, comprometendo o ecossistema e as atividades ali exercidas [Machado 2013]. Estudos anteriores [Villwock & Martins 1972; Martins *et al.* 1978; Calliari *et al.* 2000] concluíram que a ressuspensão e transporte do depósito de LF, em direção à costa, estão associados a ondas de tempestade de alta energia e a seus longos períodos.

Quando as ondas entram em águas intermediárias ou rasas, os depósitos lamosos aí existentes afetam as mesmas, produzindo uma dissipação gradual da energia e atenuando sua altura [Jiang & Zhao 1989], podendo causar ressuspensão (Fig. 9a) e transporte de lama devido às pressões exercidas por elas no fundo (Fig. 9b) [Machado 2013]. Após a deposição, a LF pode ser ressuspensa devido à grande quantidade de água presente [Cuchiara 2008].



**Figura 9:** Deposições de lama na praia; **(a)** LF ao longo de 3km de praia em 2020, marcada pelo abrupto limite entre uma zona de surf ativa e a atenuação de onda devido ao amortecimento da energia de onda pela presença submersa de lama. Foto de Deivid Alves [Mirlean *et al.* 2020]; **(b)** LF sob a face de praia no mesmo evento em 2020. Foto de Camilla Bellini.

Winterwerp *et al.* [2007] explicam que o amortecimento das ondas sobre fundos lamosos segue uma sequência de eventos: primeiro, pequenas deformações elásticas são geradas dentro do solo oceânico pelas tensões cíclicas induzidas pelas ondas. Quando estas tensões excederem a resistência do fundo, o solo oceânico é liquefeito (ou parte dele), sendo então caracterizado como LF. As ondas que agem sobre este fundo geram ondas internas na interface água-lama, que se dissipam através da fricção interna dentro da camada de LF. Assim, a camada liquefeita é determinada pelas propriedades da lama e pelo clima de ondas de cada região [Machado 2013]. A intercalação de camadas de areia e LF pode tornar o depósito lamítico não disponível para ressuspensão em eventos de alta energia.

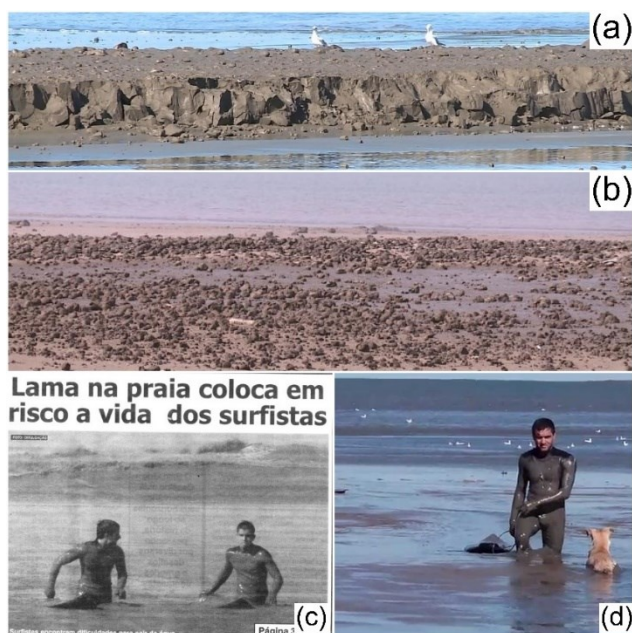
Vinzón *et al.* [2009] utilizaram dados gerados por um modelo computacional para analisar a deposição inicial de lama na plataforma continental. Os autores comentam que estes depósitos de LF são governados por dois processos opostos, ambos dirigidos por eventos: primeiro os eventos de deposição são regidos pela recirculação barotrópica ao sul dos molhes, que é fortemente modificada pela circulação de fundo em direção à praia e segundo, estes são governados por eventos de erosão que ocorrem durante tempestades, resuspendendo e deslocando material devido as intensas correntes geradas pelos fortes ventos [Machado 2013].

As deposições de LF e areia muito fina são intercaladas sucessivamente de acordo com os regimes hidrodinâmicos atuantes. Dados de testemunhos coletados em 2004 e 2005 [Calliari *et al.* 2007; Calliari *et al.* 2020] mostram que depósitos de lama em regiões mais rasas (< -10m) possuíam LF superficial intercalada com laminações de areia enquanto os testemunhos localizados em maiores profundidades (até -14m) exibiam lama compactada intercalada com areia de espessura variável. Tal padrão possivelmente representaria períodos de fornecimento rápido de lama e o avanço subsequente do lençol de areia relíquia transgressiva sobre os depósitos de LF recentes, fazendo com que o tamanho médio real do grão permanecesse principalmente uma mistura de silte e areia, criando uma heterogeneidade da estrutura vertical. Assim, o enriquecimento de laminações arenosas misturadas nas amostras indicariam um severo retrabalhamento, que só pode ser atribuído à ação de onda [Calliari *et al.* 2009].

Não apenas a presença da LF na zona de surf causa riscos costeiros, mas também a sua presença na porção subaérea da praia oferece riscos à população em geral, que usufrui culturalmente do local (Fig. 10 e 11).



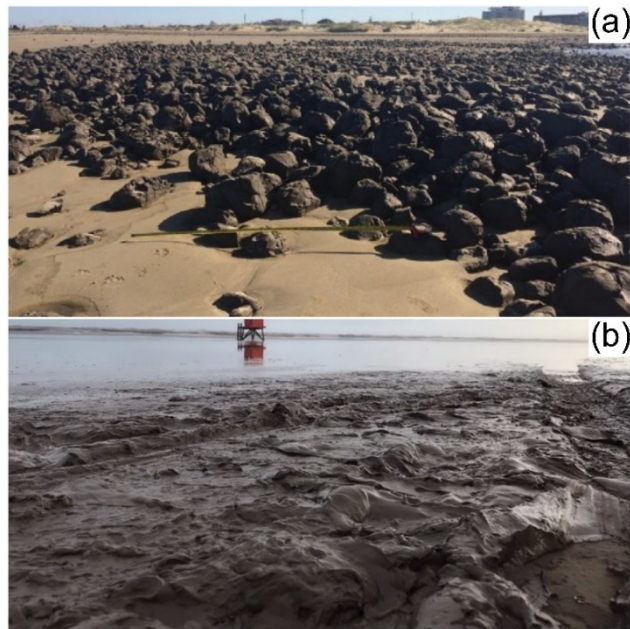
**Figura 10:** Em detalhe a presença de areia fina junto a deposição de LF na face de praia, evento de fevereiro de 2020. Foto de Camilla Bellini.



**Figura 11:** Eventos de lama na praia; **(a)** deposição de lama de grande espessura na face de praia no evento de 1998 **(b)** lama retrabalhada após consolidação e erosão do depósito no evento de 1998 **(c)** reportagem de jornal de maio de 2003 e **(d)** surfista preso do pacote de LF. Fotos cedidas por Lauro Calliari.

No Balneário, o turismo é uma importante fonte de renda e, com os episódios de lama na praia, há a redução dos atributos exaltados pelos turistas, como por exemplo o

comprometimento da trafegabilidade de pedestres e veículos na praia (Fig. 12b). Em especial, os surfistas se encontram em perigo (Fig. 11c e d), pois a formação de correntes longitudinais originadas devido aos gradientes laterais de energia de onda, fazem com que estes sejam transportados diretamente para a zona de LF. Uma vez que os surfistas se encontram neste local, eles podem ser imobilizados ou enterrados no depósito de lama, sofrendo risco de hipotermia e até afogamento [Calliari *et al.* 2009].



**Figura 12:** Deposições de lama na praia; (a) bolas de lama formadas depois da consolidação e erosão do depósito submerso. Fonte: Mirlean *et al.* 2020. (b) Deposição recente de LF na face de praia, evento de 2020. Foto de Camilla Bellini.

As alterações na faixa de praia e zona de surf alteram a disponibilidade de nutrientes inorgânicos dissolvidos. Odebrecht *et al.* [2010] discutem que a concentração de silicatos, amônia e fosfatos decresce enquanto as concentrações padrão de nitrato e nitrito aumentam. Esta alteração causa a variação das espécies fitoplanctônicas, como por exemplo, o declínio da abundância de *Asterionellopsis glacialis* e um significativo aumento na abundância de outras espécies [Odebrecht *et al.* 2010], além da obstrução do aparelho respiratório da fauna bentônica [Calliari *et al.* 2001]. A zona de surfe também é considerada como uma área para o desenvolvimento de juvenis de várias espécies [Beck *et al.* 2001; Monteiro-Neto *et al.* 2003; Rodrigues & Vieira 2010], algumas de importância econômica para pescadores artesanais [Mont'Alverne *et al.* 2012].

A seguir são reunidas algumas informações disponíveis sobre recentes eventos de lama na praia.

#### **4.1.1.1. Evento de 1998**

Durante o ano de 1998, pequenos depósitos de lama ocorreram a partir do meio do mês de janeiro e se intensificaram fortemente em março e abril [Calliari *et al.* 2020]. Este foi o maior evento de deposição de LF em 109 anos e afetou 13km da faixa de praia [Calliari *et al.* 2020], causando um forte impacto na fauna e ao turismo da região, interditando a praia por aproximadamente 14 meses [Calliari *et al.* 2009].

Em sua tese, Machado [2013] discute o evento de lama na praia de março de 1998, caracterizando as condições meteo-oceanográficas no momento de sua deposição. A autora avalia também um episódio de remobilização ocorrido em abril de 1999. Na madrugada do dia 10 de março de 1998 uma forte tempestade atingiu a região. Ondas com altura significativa próxima a 3.5m e período de pico em torno de 10s suspenderam, transportaram e depositaram a LF na antepraia, zona de arrebentação e faixa litorânea da praia.

Odebrecht *et al.* [2003] associa este evento à alta precipitação ocorrida na região, de forma anômala em uma fase de El Niño. Segundo Möller *et al.* [2010], em função da posição geográfica da Lagoa dos Patos, eventos intensos de El Niño Oscilação Sul (ENOS) provocam grandes variações interanuais de descarga fluvial e de vento, modificando os processos de salinização ou dessalinização da lagoa, que podem persistir por vários meses. Altas descargas fluviais, combinadas com ventos de nordeste, estão associadas com os eventos de El Niño [Möller *et al.* 2010], acarretando em um regime de fortes vazantes e exportando grandes quantidades de material em suspensão para a plataforma continental interna adjacente. A carga de sedimentos em suspensão varia, respectivamente, de 30 mgl<sup>-1</sup> a 70 mgl<sup>-1</sup> em anos de La Niña e El Niño, podendo alcançar volumes maiores em períodos de descarga alta.

Além deste fenômeno extraordinário, também ocorria uma operação de dragagem no Porto de Rio Grande. Durante o primeiro semestre de 1998, 640.000 m<sup>3</sup> e 2.3 milhões m<sup>3</sup> de sedimento com altas concentrações de silte e argila, respectivamente, foram lançados no canal do estuário e na antepraia (-13m), em direção nordeste da desembocadura da lagoa [Calliari *et al.* 2020].

Mirlean *et al.* [2021] relaciona os depósitos ocorridos em janeiro de 1998 as operações de dragagem que ocorreram nos dois anos anteriores, onde 3.396.000m<sup>3</sup> de

sedimento foram dragados e lançados em direção nordeste a 13m de profundidade e a 2km de distância da praia.

Calliari *et al.* [2009] coletaram testemunhos localizados em áreas com profundidade menores do que 7m. Os resultados mostraram um conteúdo de lama da ordem de 93% (47% de argila e 46% de silte) e uma densidade média de 1230 kg/m<sup>3</sup>, com laminações arenosas (espessura média de 0.10m) e transições abruptas. Um testemunho localizado a 11,5 metros de profundidade apresentou um teor de lama de 95% (51% de argila, 44% de silte) e 5% de areia. No entanto, a densidade média ficou em 1430 kg/m<sup>3</sup>, indicando um maior grau de compactação do que nos testemunhos mais rasos [Machado 2013].

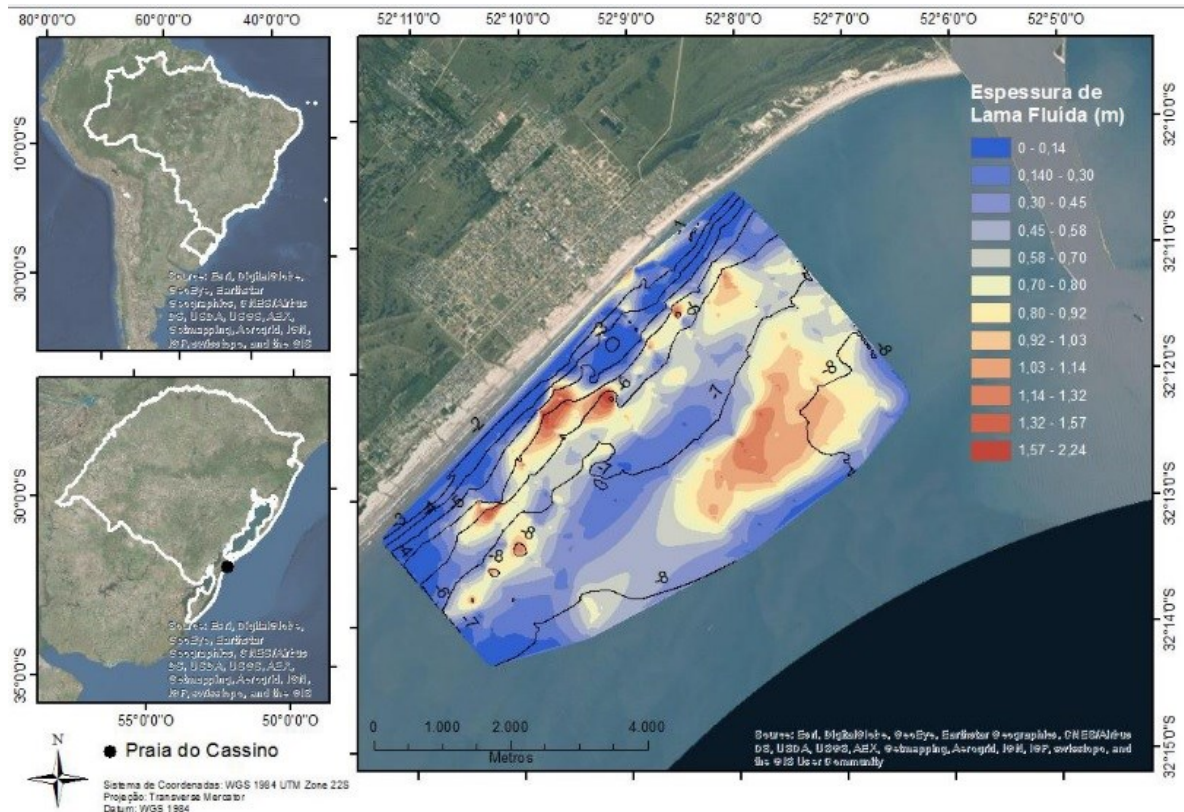
#### **4.1.1.2. Evento de lama na praia em 2014 e sua evolução (2014-2017)**

O evento de deposição de lama na praia do Cassino ocorreu em abril de 2014, mantendo-se em 2015, e perdurando de forma mais acentuada até meados de 2016 [Oliveira *et al.* 2020]. Calliari *et al.* [2020] ressalta que, entre dezembro de 2013 e janeiro de 2014, foram dragados cerca de 1.400.000m<sup>3</sup> de sedimentos e lançados a 19m de profundidade. Oliveira *et al.* [2020] ressalta a ampliação dos molhes, mudança de sua geometria e o aprofundamento do canal (via dragagem) como intervenções humanas recentes e comenta que as derivações destas modificações ainda não estão bem definidas para a região.

Oliveira *et al.* [2020] afirmam que o período de atenuação de energia de onda na antepraia foi finalizado apenas no inverno de 2016, tendo se iniciado em meados de janeiro de 2014, antes mesmo dos depósitos subaquosos se movimentaram em direção à porção subaérea da praia.

Em fevereiro de 2016, Colleoni [2016] realizou levantamentos geofísicos para detectar a posição do depósito de LF na antepraia do Cassino. A expressão visual deste depósito era observada desde 2014 e prolongava-se através da zona de arrebentação até o pós-praia por uma extensão de 5km. O depósito se estendia até os 9m de profundidade e apresentava orientação SO-NE, em forma de manchas (Fig. 13). Os resultados mostraram espessuras máximas de 2.13m, com dois depocentros. Entre as profundidades de 3 e 6m foi evidenciado a presença de um banco lamoso linear prolongando-se para o sul, o qual ocupava praticamente toda extensão da área urbanizada da praia. Em direção ao mar e a norte desta

área, entre as profundidades de 6.5 a 7.5m estava definida outra deposição, cuja espessura máxima atingia aproximadamente 1.5m.



**Figura 13:** Mapa de espessura de LF na antepraia do Cassino para o ano de 2016. Fonte: Colleoni 2016.

Oliveira *et al.* [2020] analisou, através de levantamentos com drone e imagens orbitais o monitoramento e evolução do depósito, a partir de 2014. Em 2015, os autores atribuem o incremento de LF sofrido pelo trecho de praia mais ao norte ao deslocamento do depósito já existente da antepraia para a praia subaérea. É importante ressaltar a atenuação de energia de onda no local mesmo durante eventos de alta energia de onda desde 2014 até meados de 2016. No período de 2015 e 2016 houve um El Niño muito forte [Ferreira *et al.* 2017], tendo aumentado a vazão estuarina quando o depósito de lama já estava depositado na praia do Cassino.

O levantamento realizado por Oliveira *et al.* [2020] teve início a partir do monitoramento feito por Colleoni [2016], que indicou o estado do depósito subaquoso na época. O trabalho de Oliveira *et al.* [2020] demonstra em fotografias obtidas *in loco*, o significativo impacto ambiental sofrido pela praia e indica três momentos distintos da



evolução do depósito de lama: (a) desde sua chegada na praia, com aspecto mais fluído; (b) passando pelo processo de consolidação e, por fim, (c) formação de dunas arenosas e vegetadas anômalas. Estas dunas não possuem as mesmas características das dunas embrionárias, comumente encontradas na primavera e verão no local e ocupavam uma posição nunca vista na história recente da praia. Os autores afirmam que sua formação e recobrimento por cobertura vegetal só foi possível devido ao próprio depósito de lama, e sobretudo pela persistência na atenuação de energia de onda na praia subaérea.

Oliveira *et al.* [2020] analisaram a variabilidade da linha d'água neste período e indicaram projeção da costa, tanto do limite da linha d'água quanto das dunas. Dunas muito próximas a linha d'água, atestam alteração, em períodos anteriores, no espraiamento das ondas. Os autores afirmam que a formação das dunas anômalas pode ter relação com as ações de remoção de sedimentos realizada pela Prefeitura Municipal.

Durante o monitoramento realizado por Oliveira *et al.* [2020], os autores perceberam que as ondas foram o principal responsável pelo transporte da LF para a praia, durante a deposição inicial em abril de 2014, e nos momentos onde as ondas transportaram material instável da antepraia e zona de surfe para a praia subaérea. Em 2016, o depósito já não estava sendo retroalimentado e as ondas se encarregaram de sua remobilização.

Oliveira *et al.* [2020] analisa o regime de ondas de 2016 a 2017 e ressalta seis eventos meteo-oceanográficos de alta energia de onda ( $H_s > 3\text{m}$ ) na costa do RS, sendo pelo menos um evento considerado como evento extremo ( $H_s > 5\text{m}$ ). Os autores utilizaram os dados da bóia do Rede Ondas, situada a cerca de 10km da costa na altura da área de estudo a cerca de 15m de profundidade e da boia Rio Grande (PNBOIA) situada em águas mais profundas, a 100km da costa na altura do balneário Mostardense.

A tabela 7 descreve brevemente as condições de onda e o tempo de permanência da condição de mar para cinco eventos de alta energia que atingiram a costa do Rio Grande do Sul (RS). O terceiro evento de alta energia de onda que os autores deram destaque ocorreu na última semana de julho de 2016, entre 26 e 29 de julho, sendo este um dos mais relevantes para este processo de regeneração da praia. Os autores interpretam que, este depósito de LF na antepraia bloqueava a energia de onda e se rompeu com o evento de alta energia. O deslocamento parcial do depósito de LF submerso para a praia emersa trouxe a energia de onda novamente ao sistema praial. Após este evento, a ação das ondas foi mais efetiva, pois

com o retorno da zona de surfe, houve a remobilização dos depósitos de LF remanescentes no ambiente.

**Tabela 7:** Resumo das condições de onda para eventos de alta energia no período de 2016 a 2017. Fonte: Oliveira *et al.* 2020.

<b>Data</b>	<b>Altura Significativa de onda (<math>H_s</math>)</b>	<b>Pico de onda</b>	<b>Tempo de permanência desta condição de mar</b>
16 a 19 /05/2016 2016:	>5m (PNBOIA)	10 a 12	60h
Maior energia na costa entre 17 e 18 de maio	>3m (Rede Ondas)	13 a 15	12h
9 a 12 /06/2016: Maior energia entre 10 e 11/06	>5m (PNBOIA)	-	30h
	>3m (Rede Ondas)	10 a 13	3h
20/10/2016	>3m (Rede Ondas)	10 a 13	4h
	>6m (PNBOIA)	-	48h
27 a 29/10/16	>3m (Rede Ondas)	15	48h
	$H_{max}=5.1m$		
10/12/2017	>4m (PNBOIA)	-	4h

No auge deste evento, na madrugada do dia 28 de outubro, a altura significativa chegou a 9.5m. As ondas tiveram altura máxima de cerca de 10m durante 72h, chegando a 14.8m de altura. Segundo Oliveira *et al.* [2019], este foi o mais intenso evento de alta energia de ondas dos últimos 40 anos na costa central e sul do Rio Grande do Sul. A atuação deste evento extremo erodiu grande parte das pequenas dunas anômalas que ainda restavam na praia emersa.

Oliveira *et al.* [2020] ressaltam que esta sequência de eventos de alta energia de onda ocorreu dada a diminuição do estado de El Niño muito forte. No verão 2016-2017 os dados do PNBOIA em águas mais profundas não atestaram eventos de alta energia de onda, com menor agitação marinha, se comparada ao outono-inverno-primavera de 2016 [Oliveira *et al.* 2020].

Ações de manejo na temporada de veraneio, como abertura de drenagens e valetas para separar áreas de pedestres em relação a vias para circulação de veículos automotores e a limpeza dos depósitos de lama ainda encontrados, contribuíram no processo de recuperação da praia [Oliveira *et al.* 2020]. Em 2017, a praia do Cassino retomou suas características

comumente encontradas, tais como a presença de bancos e cavas e a quebra de ondas na zona de surfe ao longo de toda costa.

Portanto, após o evento de lama na praia em 2014, apenas no segundo semestre de 2016 e início de 2017 a praia pôde ser considerada recuperada e sob condições normais. Assim, é importante ressaltar que o evento de lama na praia iniciou em janeiro de 2014 com pequenas deposições e ocorreu de forma massiva em março e abril de 2014. Desde então, o processo descrito aqui se trata da evolução e retrabalhamento deste depósito. Após a deposição inicial (exemplos nas Fig. 9b e 12b), a LF na porção emersa logo vai perdendo conteúdo de água, formando fendas e ganhando consolidação (Fig. 14). Após um tempo maior de exposição e consequente erosão e retrabalhamento pelos processos de *swash*, há a formação de bolas de lama, indicando o estágio final do depósito (exemplo na Fig. 11b). Este processo pode levar anos, dependendo do volume de lama depositado e da intensidade dos ciclones extra-tropicais, que irão retrabalhar este depósito [Calliari *et al.* 2020].



**Figura 14:** Estágio de evolução do depósito de LF, ressecamento inicial da camada de LF depositada sob a porção aérea da praia do Cassino. Fonte: própria.

#### 4.1.1.3. Eventos de 2018-2020

Após a deposição de lama na praia em 2014 e sua perduração na faixa de praia até meados de 2016, uma série de eventos ocorreram. O significativo impacto ambiental resultante deste evento anterior impactou profundamente o setor de turismo do Balneário. Ocorreu a mobilização popular com suporte de ONGs, e questionamentos acerca da formação

da lama e o papel exercido pela dragagem foram levantados. Uma das condicionantes para a licença de dragagem em 2018 foi o monitoramento e investigação destes fenômenos. Portanto, surgiu o projeto de Monitoramento do Bolsão de Lama da Antepraia da Praia do Cassino, associado ao Porto de Rio Grande, ao Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCOSTA) e a Universidade Federal do Rio Grande (FURG). De forma resumida, os principais objetivos do projeto foram, paralelamente à dragagem, monitorar as condições oceanográficas, as ocorrências de LF na região e avaliar se o sítio de despejo atual pode ser um fator na formação da LF na antepraia, de forma multidisciplinar. O projeto monitorou parâmetros oceanográficos através de boias estrategicamente posicionadas na plataforma continental interna (Boia RS-04 e RS-05 ativa por um breve período). Saídas de campo regulares para o monitoramento dos depósitos de LF na antepraia foram realizados entre 2018 a 2020. Os dados utilizados neste trabalho são um resultado parcial deste monitoramento, cujos resultados ainda estão sendo trabalhados.

Garcia *et al.* [2021] mostram que, no período entre 2018 e 2020, houve deposição de LF na Praia do Cassino nas seguintes datas: 07 de dezembro de 2018; 03 de março de 2019; 05-07 de julho de 2019; 17-18 de janeiro de 2020, 20-21 de fevereiro de 2020, 03 de abril de 2020, 07 de julho de 2020. Os autores afirmam que todos os depósitos de lama citados acima ocorreram após a passagem de uma frente fria forte ou depois de passagens de ciclone extra-tropical na região.

O processo de dragagem foi iniciado no final de outubro de 2018. Mirlean *et al.* [2021] ressaltam que, a dragagem iniciou com o mecanismo de *overflow* liberado, sendo assim, em menos de 30 dias havia a primeira deposição de LF no prisma de praia. Em seguida, a Procuradoria Geral da República – Ministério Público Federal impediu a dragagem de continuar por cerca de um mês e meio [Mirlean *et al.* 2021].

Torres [2000] explica que as dragas hidráulicas são o tipo mais utilizado para a dragagem de canais de navegação. No processo de dragagem, ao aspirar o sedimento, trazem junto uma grande quantidade de água. Conforme os tanques das barcas e de dragas auto-transportadoras vão se enchendo, é necessário eliminar esta água excedente fazendo-a transbordar para fora da embarcação. Este processo chama-se *overflow*.

Para assegurar máximo rendimento no processo de dragagem nas dragas de sucção Hopper, a retenção do material sólido é prioridade e se fazem necessários mecanismos que

expulsem o excedente de água da cisterna da draga. Desta forma, a água extra é separada e retorna ao mar através do mecanismo de transbordamento e expulsão *overboard* [IADC 2014]. Os autores afirmam a parte sólida e arenosa decantará para o fundo da cisterna, entretanto este processo leva tempo e depende também do movimento da embarcação. Um tipo de sistema de *overflow* fornece os meios para separar os sólidos e a água, reduzindo a turbulência da mistura de rejeito e permitindo tempo suficiente para a parte sólida (areia, cascalho) se estabeleça no fundo. Em seguida, a água separada é drenada de volta ao mar através do *overboard*. FAO [2010] define esta mistura como água do mar relativamente decantada e com baixa turbidez e Vlasblom [2007] a denomina como mistura pobre (*poor mixture*) ou mistura com baixa densidade.

Vlasblom [2007] explica que, anteriormente, o mecanismo de *overboard* era, antigamente, instalado acima do nível do mar. Entretanto, com o aumento na necessidade de proteção ambiental a instalação deste mecanismo agora é feito em direção ao casco, submerso. O autor ressalta que, como resultado das perdas no processo do *overflow*, as partículas de areia fina entrarão no fluxo do *overboard* mais facilmente do que as partículas mais grossas. Em casos onde ocorre a decantação separada desta mistura de baixa densidade, Vlasbom [2007] afirma que parte da mistura de argila, areia e cascalho será lançado através do *overflow*. O fluxo do *overboard* normalmente possui  $d_{50} < 75 \mu\text{m}$ . O autor explica que não são todas dragas de sucção que possuem a cisterna específica para o processo de decantação e, neste caso, a mistura de baixa densidade será lançada diretamente da cisterna principal em direção ao mar através do mecanismo *overboard*, muitas vezes automatizado por uma válvula controle. Novamente, este controle por válvula não atende as demandas ambientais atuais e, portanto, está banida em diversos países [Vlasbom 2007].

Garcia [2020] indica através dos dados dos sensores de uma das dragas que, entre outubro e dezembro de 2018, um volume de 221.656,71 m<sup>3</sup> foram lançados no ambiente através do uso de *overflow* e *overboard*. Especificamente, Garcia [2020] mostra a ocorrência de *overflow* em dois períodos distintos: de 02 de novembro a 07 de dezembro de 2018 e de 06 de novembro de 2019 a 25 de janeiro de 2020, marcado pelo final da operação de dragagem. Garcia [2020] indica que, durante 2019, uma segunda draga foi utilizada. Através dos mecanismos de *overflow* e *overboard*, 2.130.449 m<sup>3</sup> de sedimento em suspensão foram introduzidos no ambiente. O autor indica que o lançamento ocorreu de forma concentrada na

área próxima à desembocadura da lagoa e em mar aberto. Garcia *et al.* [2021] sugerem que a ocorrência de depósitos de LF em janeiro e fevereiro de 2020 estão relacionados à água doce natural do sistema da Lagoa dos Patos.

Mirlean *et al.* [2021] acreditam que os volumes de sedimento lançados no ambiente através destas práticas explicam os eventos de lama na praia. Os autores citam o trabalho de Pereira *et al.* [2011], indicando que apenas o volume de sedimentos da primeira draga neste pequeno intervalo de tempo (outubro a dezembro de 2018) seria capaz de afetar 3,25 km de praia.

O papel da dragagem na deposição de lama na costa da praia de Cassino ainda é uma questão sob investigação. As demais informações geradas por este projeto ainda estão sob processo de análise.

## **4.2. Lama na praia: natural ou antrópica?**

Machado [2013] fez um levantamento histórico das ocorrências de lama na praia do Cassino. A autora cita a primeira ocorrência de lama na Praia do Cassino data de 1901 [Calliari & Griep 1999] sendo registrada pelo jornal Correio Mercantil de Pelotas, no dia 20 de janeiro de 1901. A segunda ocorrência do fenômeno foi noticiada pelo Jornal Rio Grande, em 28 de dezembro de 1954. Segundo o jornal: “a Praia do Cassino foi invadida por uma extensa camada de lama, onde os banhistas enterram pés, pernas e até o próprio corpo até o peito” [Calliari & Fachin 1993].

A literatura [Villwock & Martins 1972; Villwock *et al.* 1972] destaca a análise da sedimentologia e mineralogia dos sedimentos finos dos depósitos lamíticos da região do pós-praia entre o Cassino e a Querência, em comparação com os sedimentos finos da porção meridional da Lagoa dos Patos. Estes possuem propriedades texturais semelhantes, sendo possível concluir que os sedimentos da região do pós-praia provinham da descarga lagunar. Borzone & Griep [1991] enfatizam que parte do sedimento síltico-argiloso e argilo-síltico proveniente da lagoa seria depositado na região costeira adjacente à desembocadura, formando depósitos de LF, inclusive na cava dos bancos arenosos [Machado 2013]. Villwock & Martins [1972] e Martins *et al.* [1978] relacionam as ondas de tempestade de alta energia com longos períodos à erosão do material sedimentar, o colocando em suspensão [Machado 2013].

Machado [2013] afirma que, de 1972 a 2010, mais de 20 eventos de deposição ao longo da Praia do Cassino foram registrados, sendo que desde 1998 pelo menos um evento anual ocorreu com exceção dos anos de 2005, 2006 e 2007.

A partir das datas de ocorrência de lama, Machado [2013] realizou um estudo sobre as condições sinóticas que atuavam na região de interesse quando estes depósitos ocorreram, ou seja, qual o sistema atmosférico responsável pela geração de ondas de tempestade. Dos 12 casos de deposição ocorridos de 1998 até 2010, 75% estão associados a ciclones e 25% a anticiclones. Com relação às estações do ano, 50% dos casos de deposição ocorreram no outono, 42% no verão e 8% no inverno. No geral, os ciclones com maior “poder de destruição” se formam próximo ao litoral do Uruguai, sobre o continente, em 35°S. Esses sistemas não mudam muito latitudinalmente, se afastando um pouco para o oceano. Na maioria das vezes, não produzem grandes pistas, mas geram ventos com intensidade moderada e certa duração, contribuindo assim para as fortes ressacas que atingem o litoral sul do RS. Dos seis eventos que ocorreram no outono, cinco foram gerados por ciclones e um por anticiclone. No verão, dos cinco eventos registrados, quatro tiveram o ciclone como mecanismo gerador. Em quatro casos somente (32%), a máxima intensidade do vento no mês de interesse coincidiu com o dia do evento estudado para o mesmo mês. A autora concluiu que as deposições não ocorrem com eventos extremos de vento. 58% das deposições ocorreram com a intensidade do vento dentro do intervalo esperado para a média de cada mês.

A pluma carregada de sedimentos finos em suspensão é introduzida à plataforma continental, onde as menores granulometrias, com maior coesão, tendem a se depositar junto ao fundo. Especificamente nesta região, a ação do vento na pluma da lagoa induz forte vorticidade sudoeste (Fig. 15), espalhando os sedimentos ao sul da desembocadura. Os sedimentos finos transportados nessa pluma floculam e depositam nas adjacências, sob forma de LF [Calliari & Fachin 1993]. O sedimento característico da Lagoa dos Patos foi encontrado na plataforma continental interna e classificado como Fácies Patos, constituída por sedimentos areno-sílticos e areno-argilosos, provenientes do sistema de drenagem holocênico que desemboca na Lagoa dos Patos, misturada com as areias da plataforma continental interna [Borzzone & Griep 1991; Calliari & Fachin 1993; Machado 2013].



**Figura 15:** Imagem LANDSAT TM5 de 08/04/1984 demonstrando a vorticidade induzida pelo vento na pluma de sedimentos introduzida na plataforma continental pela Lagoa dos Patos. Fonte: Calliari *et al.* 2009.

Muitos são os trabalhos que enfatizam a Lagoa dos Patos como a grande exportadora de material fino para a plataforma interna adjacente, entre eles: Villwock & Martins 1972; Martins *et al.* 1979; Borzone & Griep 1991; Calliari *et al.* 2000; Pereira *et al.* 2002; Calliari *et al.* 2009; Vinzon *et al.* 2009 [Machado 2013]. Por muito anos a hipótese da origem da LF presente na antepraia do Cassino se relacionava ao sedimento introduzido de forma natural à plataforma. Entretanto, novas interpretações e dados recentes analisados sob uma perspectiva multidisciplinar indicam que outros fatores podem estar contribuindo nas deposições de lama na praia, tendo em vista que a frequência de eventos está aumentando nas últimas décadas [Calliari *et al.* 2020].

Calliari *et al.* [2020] indicam que o maior evento de deposição de lama na praia nos últimos 109 anos ocorrido em 1998 [Calliari *et al.* 2000] pode ser associado as operações de dragagem do Porto de Rio Grande, sendo ampliado pela ocorrência de El Niño. Neste processo de dragagem (Tab. 8), o sedimento dragado era realocado dentro do próprio estuário e em uma porção rasa da plataforma (cerca de 13m). Desde então, houveram evoluções no processo de dragagem, o sedimento dragado deve ser conduzido a um sítio de despejo localizado a cerca de 20m de profundidade. Entretanto, novos eventos de deposição de lama na praia seguem ocorrendo.



**Tabela 8:** Períodos de dragagem no canal de acesso ao Porto de Rio Grande e as datas dos eventos de deposição de lama na praia. Fonte: Mirlean *et al.* 2020.

<b>Operações de Dragagem</b>	<b>Depósitos de lama na praia</b>
Março e Abril de 1998	Final de Março de 1998
Dezembro de 2013 a Janeiro de 2014	Início de Março de 2014
Outubro, Novembro e Dezembro de 2018	Início de Dezembro de 2018
Novembro de 2019 e Janeiro de 2020	Início de Janeiro de 2020

Calliari *et al.* [2020] afirmam que os padrões de sedimentação após as operações de dragagem indicam que o processo de dragagem e a descarga dos sedimentos finos dragados em áreas do estuário e antepraia da praia do Cassino podem gerar e ampliar o processo de formação de LF. O mecanismo de *overflow* e *overboard* gerado pelas dragas Hopper devem ser evitados ou minimizados pois aumentam a concentração natural de sedimentos finos em suspensão.

Para além de apontar responsáveis, esta discussão visa expor e compreender os fatores que influenciam o processo formação da LF na antepraia do Cassino. O volume de material a ser dragado, a estação do ano na qual a dragagem ocorre e as normas que viabilizam o processo são fatores que devem ser levados em consideração nesta discussão. Existe a possibilidade do processo natural de formação de LF ser amplificado nos momentos de dragagem do canal de navegação, ao utilizar o mecanismo de *overflow* e *overboard*. A mistura de baixa densidade com  $d_{50} < 75\mu\text{m}$  citado por Vlasbom [2007] é, na verdade, LF ou a suspensão diluída com um  $d_{50}$  de silte fino, segundo a classificação de Wentworth [1922] e, ao entrar no ambiente pode interagir formando flocos e se agregar sob a forma de LF. Desta forma, é necessário ampliar o conhecimento e investigar os fatores que causam maior impacto na disponibilidade desta camada se manter em suspensão e avançar em direção à praia, ao entrar em contato com a plataforma interna.

A discussão pode ser fomentada ao analisarmos para além da preocupação ambiental, compreendo o prejuízo do turismo e comércio local quando estes eventos de lama na praia ocorrem próximos ou durante a temporada de verão. Neste contexto, se torna calorosa a discussão sobre quais papéis possuem mais peso e a quem recai a responsabilidade da temporária e esporádica destruição ambiental que ocorre em alguns quilômetros da faixa de praia. Por exemplo, os momentos em que o ato de dragar o canal de navegação podem

interferir e amplificar a quantidade de material em suspensão na coluna d'água: a remobilização do fundo pode ressuspender as camadas de sedimento fino já consolidado (com possíveis contaminações por metais pesados) e aumentar a quantidade de sedimentos finos na descarga da Lagoa dos Patos. No contexto da região, o mecanismo de *overflow* e *overboard* seria o responsável por injetar uma corrente de alta turbidez com a mesma densidade característica da LF no ambiente.

Entretanto, a discussão se torna polarizada ao extremo quando se entende que apenas um dos fatores é o único responsável pela fonte e formação da LF, chegando a um impasse. Um caminho é abrir a possibilidade de que a fonte e formação da LF pode ser multifatorial, natural e antrópica, visando quantificar cada papel e se mantendo aberto a dinamicidade do ambiente (eventos de El Niño, períodos de maior vazão do estuário, entre outros). Verdades absolutas raramente existem na ciência e a cada nova pesquisa o assunto ganha complexidade e somos capazes de integrar os múltiplos fatores que existem no ambiente. Assim, neste caminho existe uma conversa cujo o foco é proteger o ambiente e a população que necessita deste local.

Paralelamente a este contexto, é de grande relevância investir na pesquisa direcionada para a navegação em LF. A camada de LF presente no canal de navegação é um dos motivadores que torna necessário os frequentes procedimentos de dragagem. Assim, o Brasil deve se espelhar em países europeus que passaram pelo processo de adquirir conhecimento sobre o comportamento e as características desta camada. É necessário compreender como ocorre o processo de assoreamento no canal de navegação do Porto de Rio Grande, o terceiro maior porto do país. Estudando qual o potencial de navegação em LF, as dragagens de manutenção do calado navegável podem não ser mais necessárias, tendo em vista que portos como Zeebrugge (Bélgica) navegam com segurança em camadas de LF espessura variável ao longo do canal de navegação com um máximo de 5m de espessura [Pion 2017; Martens *et al.* 2012; Buchanan 2015; Van Craenenbroeck & Wolf 1991].

Investigar o potencial de navegação em LF do canal do porto de Rio Grande se torna uma pesquisa essencial e realizada paralelamente ao monitoramento dos depósitos de LF na antepraia da Praia do Cassino. Além de tornar o porto como possível referência brasileira neste campo de pesquisa, a navegação segura em LF é um investimento a longo prazo mais econômico e amigável ao meio ambiente que a alternativa.

Assim, o monitoramento da LF intermitente da antepraia da praia do Cassino deve continuar com a intenção de explorar as características únicas deste depósito e investigar como ocorrem as dinâmicas de formação e migração. A ocorrência de LF em uma praia dominada por ondas, submetida a um regime de micromaré, cuja fonte e dinâmica destes depósitos ainda é desconhecida, deve ser explorada pela sua própria importância e ineditismo, de forma a ampliar a compreensão da dinâmica local e sua interação com os depósitos de LF.

## Capítulo V: Material e Métodos

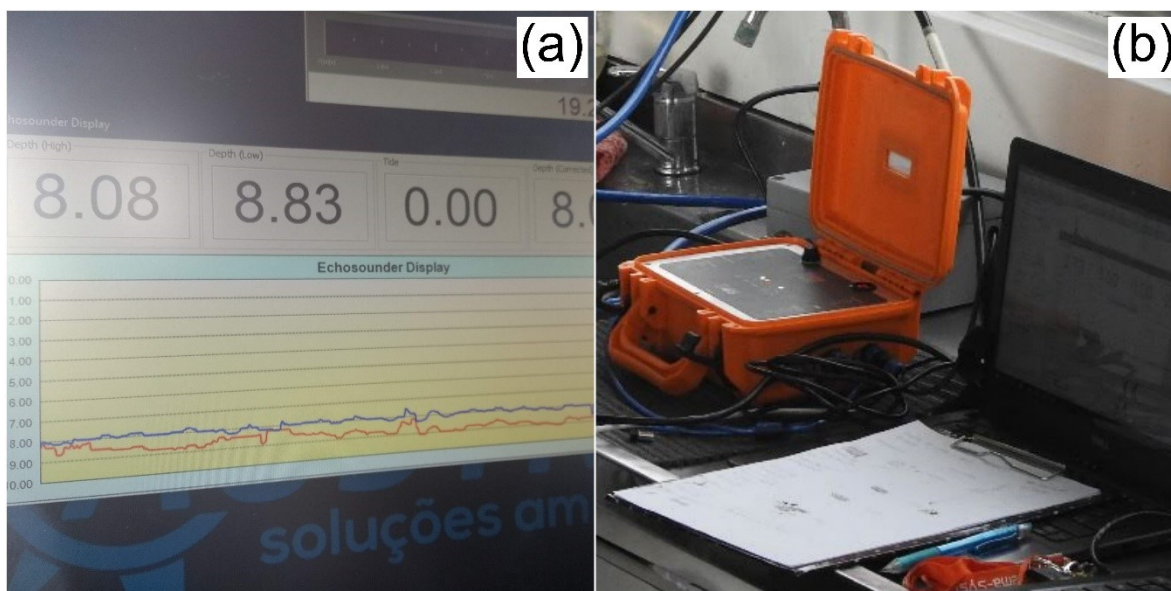
**E**ste capítulo está dividido em duas seções. Inicialmente, é relatado o processo de coleta dos dados e descrito o processo de calibração do método direto. Em seguida, é relatado o pós-processamento e estatística aplicada aos dados.

### 5.1. Processo de coleta dos dados

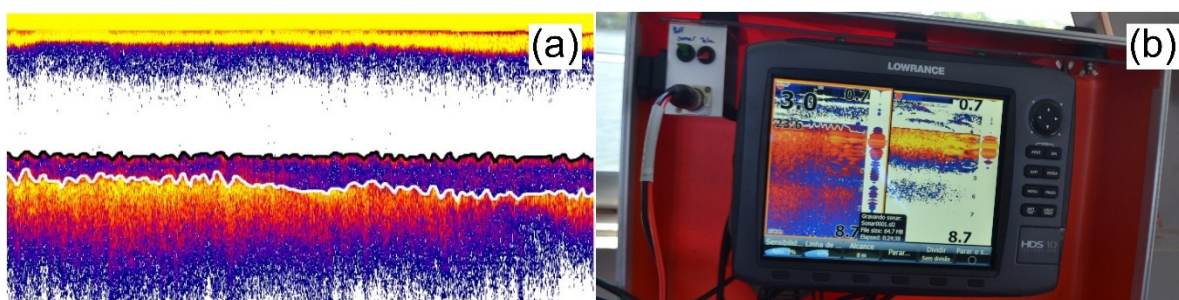
Ao todo foram realizadas 12 saídas de campo ao longo de dois anos, monitorando a área de estudo apresentada na figura 8. O objetivo da coleta é, de forma concomitante, observar o registro na ecossonda do sinal de LF e amostrar diretamente a estrutura vertical de densidade.

Em cada saída, o levantamento com a ecossonda foi contínuo, percorrendo as dez linhas propostas com aproximadamente 8km de comprimento e distantes 1km entre si. Foram utilizados dois equipamentos distintos e em datas separadas, a TGE® – Echossounder Datalogger nas frequências 200 kHz (HF1) e 33 kHz (LF1) com resolução vertical de 1cm e software de aquisição Hydromagic, associada ao GPS AtlasLink GNSS Smart Antenna com precisão horizontal de 30cm (Fig. 16) e a ecossonda Lowrance® HDS Gen 2 nas frequências

200 kHz (HF2) e 50 kHz (LF2) associada ao GPS Furuno com precisão horizontal de 5m (Fig. 17). Em nenhum evento de coleta foram utilizados os dois equipamentos, simultaneamente.



**Figura 16:** Ecossondas de dupla frequência utilizadas: **(a)** Exemplo de padrão característico para a LF marcado em linha azul a frequência de 200 kHz e em linha vermelha a frequência de 33 kHz; **(b)** Ecossonda TGE – Echosounder Datalogger operando. Fonte: acervo pessoal.



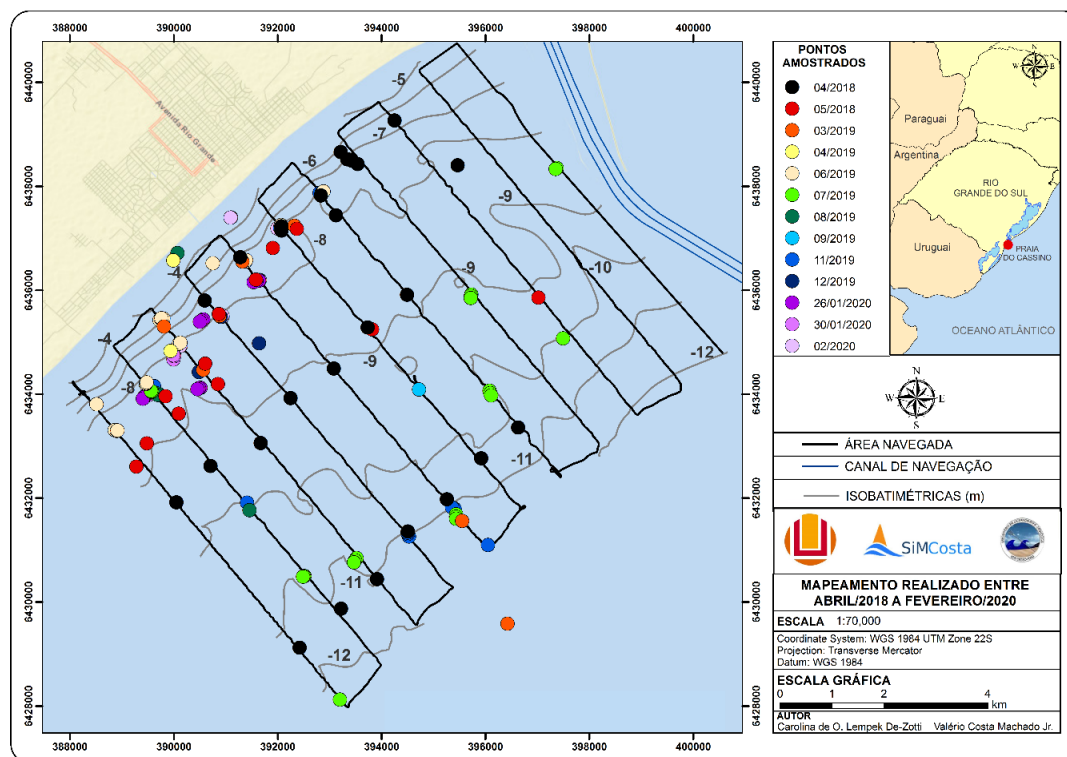
**Figura 17:** Ecossondas de dupla frequência utilizadas: **(a)** Exemplo de padrão característico para a LF marcado em linha preta a frequência de 200 kHz e em linha branca a frequência de 50 kHz. Fonte: Colleoni 2016; **(b)** Ecossonda Lowrance® HDS Gen 2 operando. Fonte: acervo pessoal.

Na Tabela 9 são apresentadas as datas de coleta, quais equipamentos foram utilizados em cada evento e quantos pontos foram amostrados com a sonda de medição direta (Rheotune®, STEMA Systems), totalizando ao longo de todo monitoramento 91 pontos (Fig. 18).

**Tabela 9:** Informações sobre as saídas de campo: data e forma de amostragem.

Data da Saída de Campo	Ecossonda de dupla frequência		Densímetro	Pontos amostrados
	HF1 e LF1	HF2 e LF2		
2018	29/03; 04/04; 06/04		X	26
	24/05; 25/05		X	13
2019	30/03	X	X	7
	17/04; 18/04	X	X	2
	03/06; 04/06	X	X	9
	10/07; 11/07		X	10
	06/08	X	X	2
	18/09; 19/09	X	X	1
	28/11	X	X	7
	18/12	X	X	3
2020	26/01; 30/01*	X	X	6
	28/02	X	X	5

\*Coleta da amostra de calibração do densímetro.



**Figura 18:** Pontos amostrados com o densímetro ao longo dos dois anos de monitoramento.

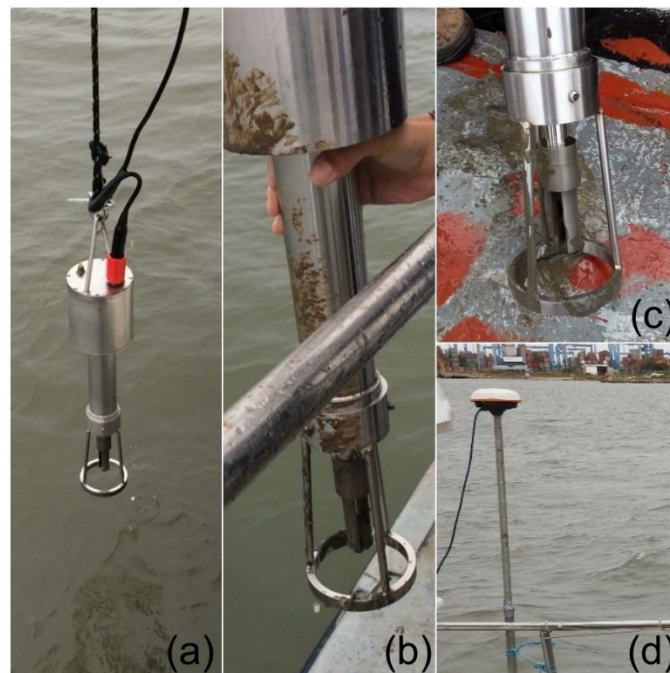
Cada evento de coleta, exibido na tabela 9 como uma linha independente, mapeou a malha amostral proposta na figura 8. Ao todo, duas embarcações foram utilizadas nestes dois anos de levantamento (embora nunca simultaneamente): a lancha “Larus” da FURG e uma embarcação terceirizada do tipo rebocador, a “4 irmãos”. Devido a grande área de estudo, normalmente o levantamento da malha amostral completa acontecia ao longo de dois dias. Em nenhuma saída foi utilizado um sensor inercial para correção de movimentos induzidos por ondas. Para tentar minimizar o efeito que a onda induziu aos dados, a escolha das condições meteoceanográficas foi bem pensada e o um filtro passa baixa foi aplicado nos dados em seu pós-processamento. Cada saída contou com uma janela de tempo extremamente calma e relativamente constante, com menos de 5 nós de vento e ondulação menor que 0.5m. O barco navegou em baixa velocidade (inferior a 6 nós) para assegurar a qualidade do retorno do sinal da ecossonda e para que não hajam danos ao transdutor, de forma que o ruído da mesma interfira minimamente no retorno do sinal.

Em todas saídas o trasdutor foi colocado a 1m do casco da embarcação, acoplado na lateral do barco em um suporte de metal e situado próximo do través da embarcação e tendo o GPS fixado na outra extremidade do mesmo cano de metal (Fig. 19). Próximo a este local estava localizado o suporte para subida e descida do densímetro, visando com que a coleta do dado seja simultânea e o mais próxima possível. Eventualmente, em águas menos profundas o registro se tornava confuso, indicando que a embarcação devia retornar pois a qualidade do dado estava prejudicada devido a profundidade rasa do local (menor que 3m). Portanto, este limite variou de acordo com a morfodinâmica praial em cada saída, mas sempre priorizando a qualidade do dado coletado.

Antes de cada saída de campo ser iniciada, ainda no píer de atracagem, a sonda de medição Rheotune® tinha sua profundidade calibrada. Na corda onde o equipamento é preso para realizar a perfilagem, foram feitas duas marcações: a primeira se inicia na base do garfo vibratório (Fig. 20c) até a medida de 1m e a segunda até o 2m da corda. O equipamento desce até a primeira marcação na corda e, por sua vez, o operador indica ao software a profundidade de 1m. Novamente, o equipamento desce manualmente até a profundidade de 2m e o operador calibra a profundidade do software em 2m. Desta forma, a profundidade do densímetro é calibrado em cima da plataforma de atracagem e em um ambiente calmo.



**Figura 19:** Exemplos de acoplagem das eco sondas à embarcação **(a)** na lancha “Larus” o equipamento acoplado em um suporte junto ao costado, com o GPS acoplado a outra extremidade do cano **(b)** no rebocador “4 irmãos” o transdutor da eco sonda junto ao costado e o GPS acoplado da mesma forma **(c)** exemplo de como o transdutor vai preso a extremidade submersa do cano.



**Figura 20:** **(a)** e **(b)** Sonda de medição direta; **(c)** detalhe para o garfo vibratório; **(d)** sistema de aquisição de dados GPS. Fonte: acervo pessoal.

Navegando seguindo a malha amostral proposta, coletando dados com a eco sonda, um operador era responsável por observar a tela de registros da eco sonda. O registro



característico da LF é o “padrão eco duplo”, ou seja, quando há a separação das linhas de alta (200 kHz) e baixa (33 ou 50 kHz) frequências, indicando que existem duas interfaces com gradientes de densidade distintos, como se observa nos primeiros quadros das figuras 16 e 17. Quando o sinal era reconhecido, o operador avisava à tripulação e o motor da embarcação parava, sendo realizada a coleta direta de dados com o densímetro. Um ponto de coleta é representado por aproximadamente três descidas da sonda de medição Rheotune® (STEMA Systems) em um mesmo ponto.

A sonda de medição direta desce da embarcação em direção ao leito e, a medida que avança a coluna d’água, produz um perfil de densidade atravessando a camada de LF, parando ao encontrar uma camada sedimentar com maior dureza, na qual não consegue penetrar. Neste período de dois anos, 254 perfis brutos de densidade foram adquiridos na área de estudo.

### 5.1.1. Corroboração do registro de lama fluida

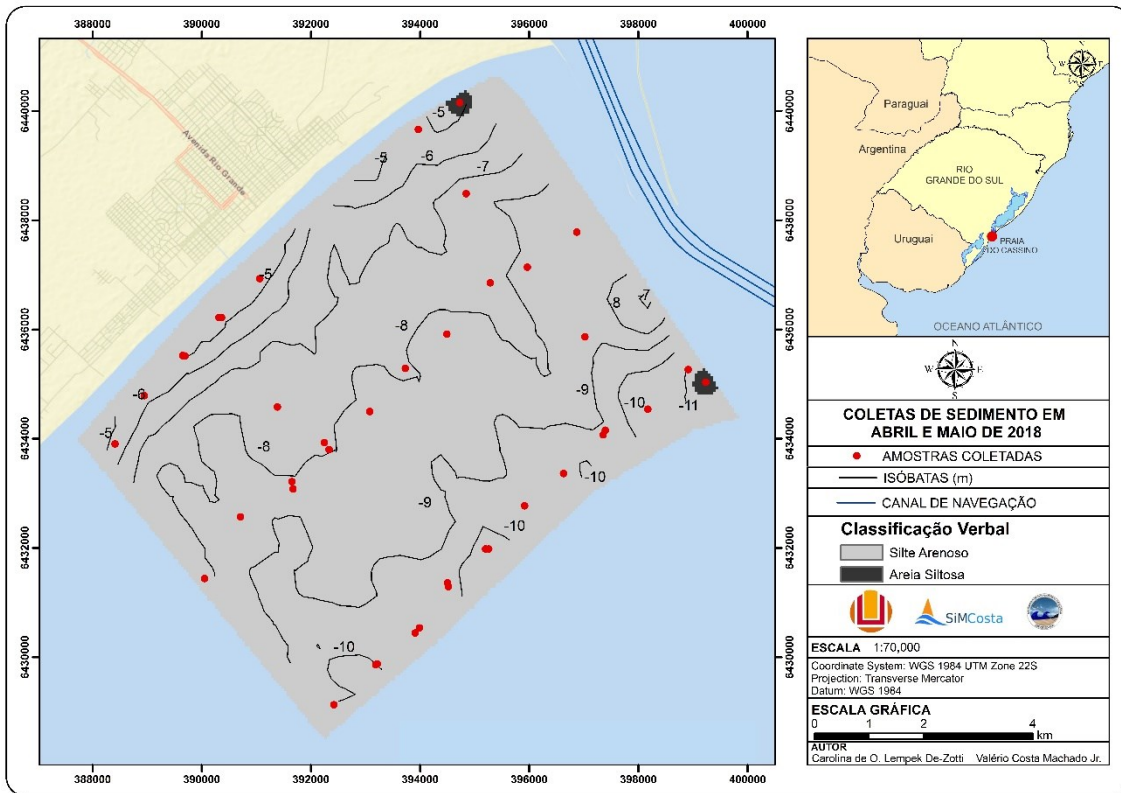
Para corroborar o registro indireto da ecossonda foram coletadas amostras sedimentológicas em abril e maio de 2018, utilizando a draga BoxCorer. Em laboratório, foram submetidas a análise granulométrica a laser, utilizando o Analisador de Tamanho de Partículas MICROTAC S3000/3500, pertencente ao Laboratório de Engenharia Costeira (LEC/EE - FURG). A tabela 10 resume os resultados das 40 amostras coletadas, indicando o valor médio e desvio padrão do conjunto de amostras.

**Tabela 10:** Resultados da análise granulométrica das amostras de abril e maio de 2018.

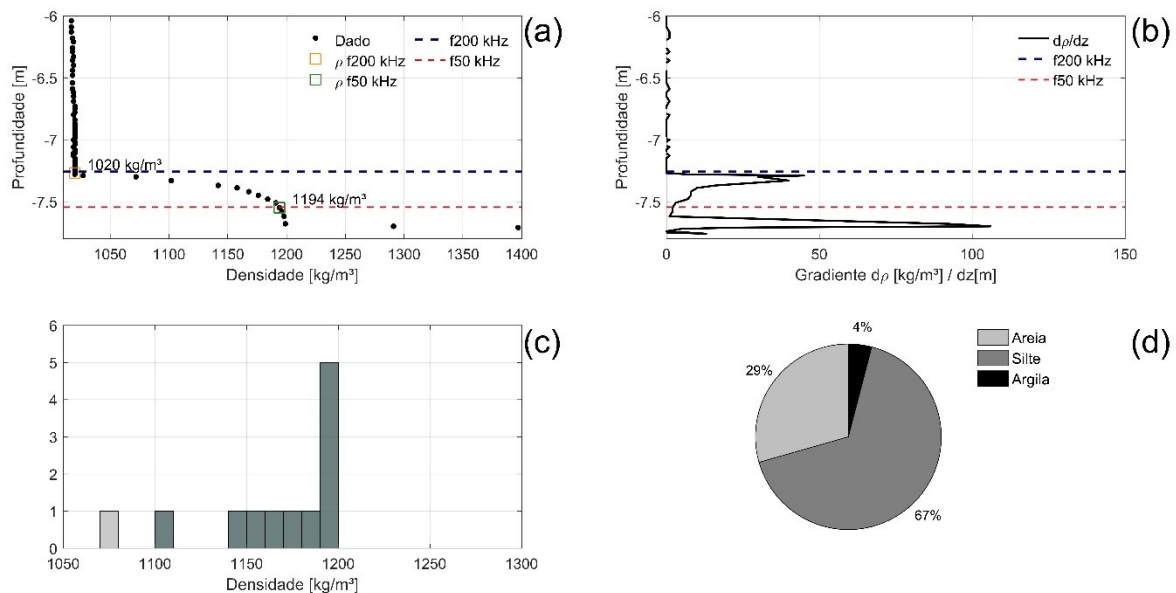
	<b>Areia (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Argila (%)</b>
<b>Média</b>	27.9	68.7	3.4
<b>Desvio Padrão</b>	13.3	12.7	1.9

A figura 21 mostra a variação espacial das amostras, classificadas verbalmente segundo Folk & Ward [1963], demonstrando que a composição do fundo síltico arenoso com pouca argila. A homogeneidade superficial do fundo nestas datas, integrada ao mapeamento com a dupla frequência e o densímetro, corrobora o registro do sinal acústico em duas situações: presença (Fig. 22) e ausência (Fig. 23) de LF. No geral, os mapeamentos realizados por este trabalho em abril e maio de 2018 foram caracterizados pela ausência de LF

entretanto, algumas manchas esporádicas de lama ocorreram, como o perfil da figura 22. Nos arredores desta coordenada, a 7m de profundidade, foi identificada espessura inferior a 0.4m.

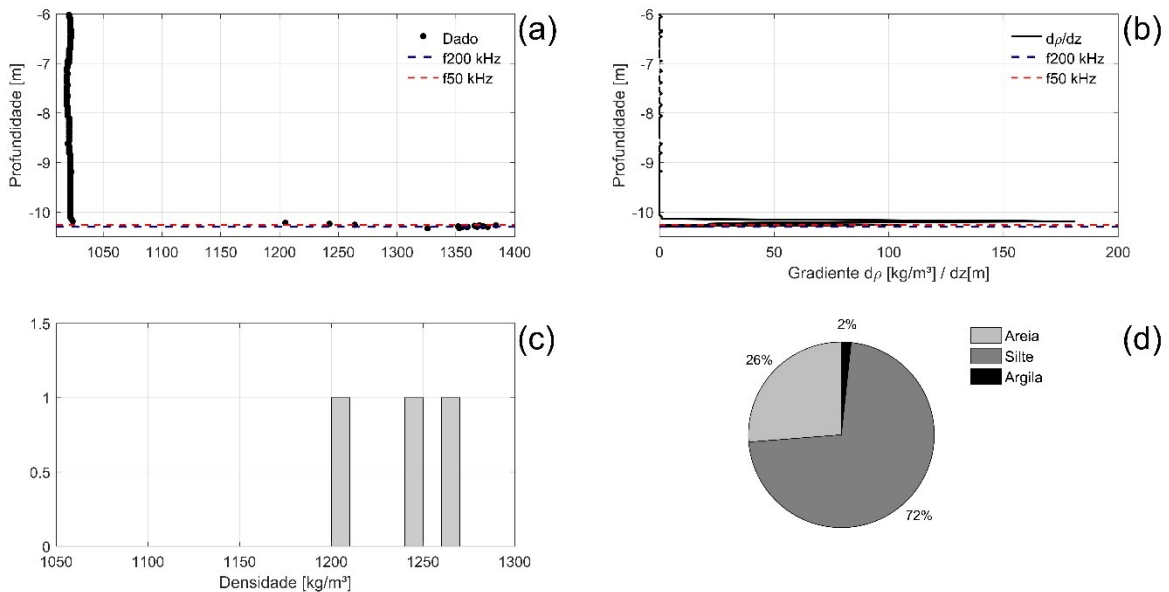


**Figura 21:** Localização das amostras sedimentológicas coletadas em abril e maio de 2018.



**Figura 22:** Caracterização da presença de LF em 04 de abril de 2018. **(a)** Perfil de densidade mostrando a presença de LF e **(b)** gradiente de densidade associado à coleta. Os pontos em preto

representam os dados do densímetro, a linha tracejada em azul é o horizonte de reflexão da alta frequência 200 kHz e a linha em vermelho é o horizonte de reflexão da baixa frequência. As densidades respectivas que vão de encontro ao horizonte identificado pela dupla frequência estão representadas por quadrados. **(c)** histograma mostrando todas as densidades amostradas, em cinza claro e em cinza escuro as densidades pertencentes ao intervalo de LF utilizado neste trabalho. **(d)** gráfico em pizza da distribuição granulométrica associada à perfilagem.



**Figura 23:** Caracterização da ausência de LF em 04 de abril de 2018. **(a)** Perfil de densidade mostrando a presença de LF e **(b)** gradiente de densidade associado à coleta. Os pontos em preto representam os dados do densímetro, a linha tracejada em azul é o horizonte de reflexão da alta frequência 200 kHz e a linha em vermelho é o horizonte de reflexão da baixa frequência. **(c)** histograma mostrando todas as densidades amostradas, em cinza claro **(d)** gráfico em pizza da distribuição granulométrica associada à perfilagem.

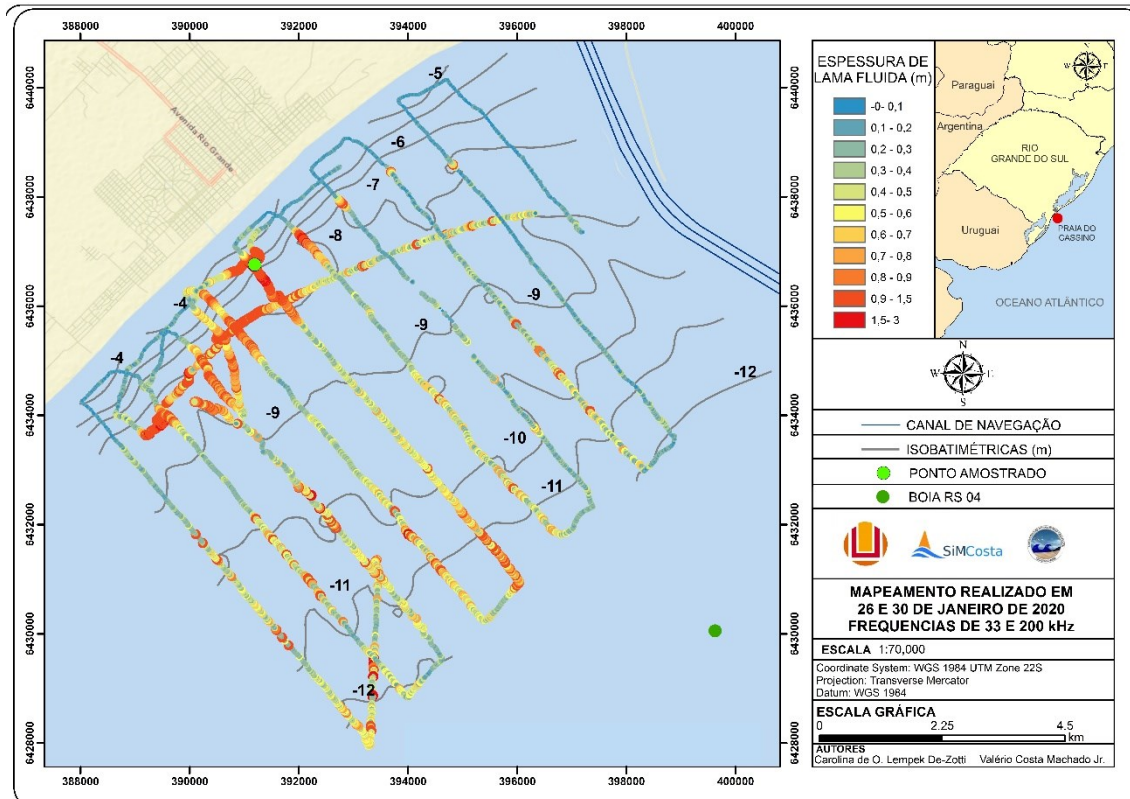
## 5.1.2. Calibração dos dados diretos

O manual do equipamento, fornecido pelo fabricante, explica que a utilização do equipamento deve ser realizada uma calibração, utilizando a água e o sedimento do local de estudo. Os passos apresentados a seguir foram adaptados das instruções dos manuais (STEMA Systems).

### 5.1.2.1. Coleta da amostra local

Em 26 de janeiro de 2020 foi realizado um levantamento da área de estudo que serviu como base para a escolha do ponto amostral. Em 30 de janeiro de 2020 ocorreu a saída para a coleta do material de calibração, sendo o local escolhido representado em verde claro na Figura 24, no qual se observa uma espessura de lama fluida superior a um metro. Neste local,

foram realizados três perfis de densidade com a sonda de medição direta, simultaneamente ao levantamento contínuo da ecossonda utilizando HF1 e LF1.



**Figura 24:** Mapa de localização do ponto de coleta de material (sedimento e água) para a calibração da sonda de medição direta. Fonte: própria.

O procedimento de coleta seguiu como referência o manual “Stema Density Probe Appendix 2: Tune calibration” disponibilizado pelo fabricante do equipamento. A figura 25 (a e b) ilustra os lançamentos da draga Box Corer para coleta do sedimento, sendo o mesmo armazenado em dois tambores de plástico com tampa, de capacidade de 90 e 30 litros (Fig. 25c). Foi coletada água superficial do local e armazenada em diversos galões de 5 litros (Fig. 25d). O material foi posteriormente levado ao laboratório.



**Figura 25:** (a) e (b) Coleta e (c) armazenagem de sedimento e (d) água da antepraia da praia do Cassino no dia 30/01/2020 para calibração da sonda de medição direta. Fonte: acervo pessoal.

### 5.1.2.2. Etapa em laboratório

Inicialmente a densidade inicial da amostra foi determinada a partir do método analítico. Portanto, a amostra reservada no tambor de armazenagem foi homogeneizada e coletadas triplicatas de uma subamostra, respectivamente pesadas em balança de precisão (0,0001g), representando o peso total da subamostra. O sedimento foi levado para a estufa à 105°C por tempo suficiente para que seu peso se tornasse constante e uma nova pesagem foi realizada, correspondendo ao peso seco.

A densidade ( $\rho_{sed}$ ) foi determinada pela expressão [Rocha 2010 adaptado de Winterwerp & Van Kesteren 2004]:

$$\rho_{sed} = C + \left(1 - \frac{C}{\rho_{quartzo}}\right)\rho_w, \quad (\text{eq. 1})$$

Onde  $\rho_{quartzo} = 2650 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_w$  é a densidade da água e a concentração,  $C$ , é dada por:

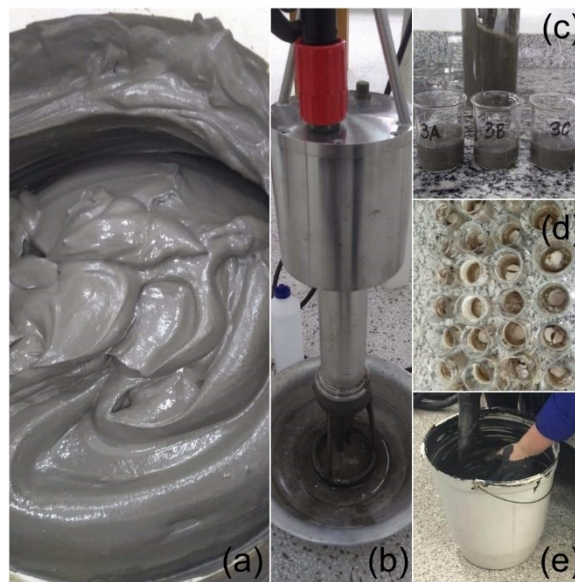
$$C = \frac{\rho_{quartzo}}{1 + \left(\frac{\rho_{quartzo}}{\rho_w W}\right)}, \quad (\text{eq. 2})$$

Sendo o conteúdo de água,  $W$ , descrito por:

$$W = \frac{(\text{Peso total} - \text{Peso seco})}{\text{Peso seco}}. \quad (\text{eq. 3})$$

A densidade da água foi calculada a partir dos dados de temperatura (°C) e salinidade (psu) da boia RS-04 (<https://simcosta.furg.br/home>) representada em verde escuro na figura 24, em operação concomitantemente durante o período de coleta do material. Esta boia está fundeada nas proximidades do local onde o sedimento foi coletado e os dados estão disponíveis na rede de boias oceanográficas pertencente ao projeto SiMCOSTA – Brasil.

Com o valor inicial de densidade da amostra foram estabelecidos os intervalos de densidade alvo para calibração, iniciando o processo que ocorreu ao longo do dia 18 de fevereiro de 2020. A figura 26 ilustra as etapas do procedimento. O recipiente com o material deve possuir altura e área suficientes para cobrir a altura do sensor do equipamento de forma que este fosse inserido e movimentado sem o contato direto com o fundo ou as laterais do mesmo. Entre cada leitura do sensor, o sedimento foi manualmente misturado e homogeneizado no recipiente.



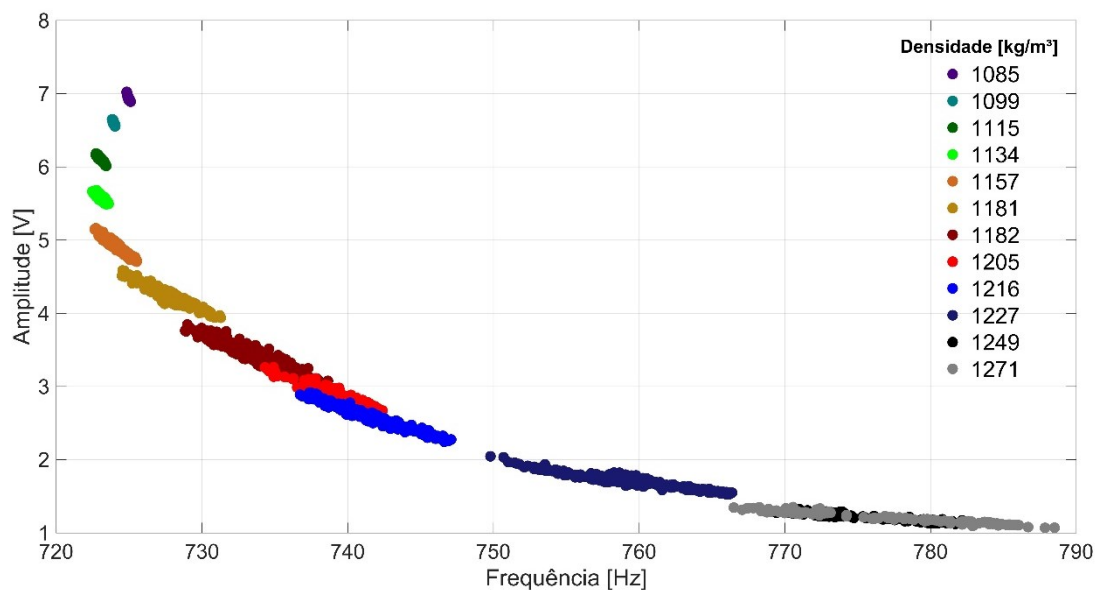
**Figura 26:** Processo em laboratório de calibração da sonda de medição direta; **(a)** amostra de lama com densidade de  $1227 \text{ kg/m}^3$  no recipiente aguardando inserção do equipamento **(b)**; **(c)** retirada de alíquotas em triplicata para determinação analítica da densidade – peso total; **(d)** amostras após serem levadas à estufa e pesadas em balança de precisão – peso seco; **(e)** detalhe no recipiente de 5 litros onde a amostra foi homogeneizada para inserção do equipamento. Fonte: acervo pessoal.

O procedimento iniciou com a amostra mais densa e, aos poucos diluindo-a em direção às menores densidades. A diluição foi baseada em uma tabela fornecida pelo Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (PENOCOPPE - DRHIMA/Poli – Universidade Federal do Rio de Janeiro).

Com o equipamento inserido no recipiente com lama em determinada densidade, três leituras consistentes e individuais de frequência e amplitude foram realizadas. Para cada densidade alvo, amostras em triplicata eram retiradas para terem sua densidade calculada analiticamente segundo as eq. 1, eq. 2 e eq. 3 acima descritas.

Ao todo foram 11 densidades alvo, ou seja, 10 procedimentos de diluição amostradas em triplicata com suas correspondentes leituras em triplicata, somando 33 arquivos de com domínio de frequência, amplitude e densidade. Posteriormente, os dados mais bem ajustados ao conjunto foram selecionados e cada densidade lida foi corrigida analiticamente.

Testes prévios mostraram a dificuldade de manter a consistência das leituras em densidades menores que  $1170 \text{ kg/m}^3$ . Para assegurar a qualidade dos dados foi necessária maior quantidade de leituras. É importante ressaltar que o procedimento ainda é feito manual e, da forma como é conduzido, dura cerca de 12h ou mais. Por exemplo, durante a calibração atual, algumas densidades foram amostradas 6 vezes devido a dificuldade de homogeneização e consequente consistência na leitura do arquivo de densidades mais fluidas. Desta forma, se totalizam 51 arquivos de frequência e amplitude para o intervalo de densidade de  $1085 \text{ kg/m}^3$  a  $1274 \text{ kg/m}^3$ . No ambiente de calibração, 13 leituras foram selecionadas para representar o intervalo de densidade  $1085 \text{ kg/m}^3$  a  $1274 \text{ kg/m}^3$ . A curva de calibração resultante é mostrada na figura 27, totalizando 13 pontos escolhidos dentro do intervalo de densidade.



**Figura 27:** Curva de calibração resultante. Fonte: própria.

Estes arquivos foram interpolados dentro do domínio frequência  $\times$  amplitude  $\times$  densidade. Linhas de regressão linear para cada agrupamento de frequência e amplitude foram calculadas, assegurando a qualidade dos dados.

Os perfis brutos coletados foram imediatamente corrigidos de forma que, quando seus valores de frequência e amplitude coincidiam com os do domínio de calibração criado, o valor de densidade era substituído pelo valor corrigido analiticamente.

Como consequência desta correção, o perfil resultante calibrado consiste de valores de densidade calibrados dentro do intervalo de 1085 kg/m<sup>3</sup> a 1274 kg/m<sup>3</sup> e, para valores fora deste intervalo, foram mantidos os valores da leitura dos brutos. Exemplos dos perfis calibrados são as figuras 22a e 23a, já apresentadas.

## **5.2. Integração dos dados e processamento estatístico**

Os dados da ecosonda foram pós-processados para retirada de erros (“*spikes*”) e foi aplicado um filtro de passa baixa para retirada de ruídos e diminuição da interferência da oscilação de onda. Os dados brutos coletados pelo densímetro passaram individualmente pela calibração. A relação entre os dados é obtida através da coordenada geográfica.

No processamento estatístico, a correlação de Pearson foi aplicada para a relação da profundidade inicial e final do depósito de LF, respectivamente. A profundidade inicial do depósito lamoso é formada pela relação entre a profundidade registrada pela alta frequência 200 kHz (contraste de impedância acústica) e pela profundidade na qual a sonda identifica a mudança abrupta de densidade no pacote. A profundidade final do depósito é formada pela relação entre a profundidade registrada pela baixa frequência (33 e 50 kHz) e pela profundidade na qual a sonda identifica a última densidade do perfil.

Esta correlação também foi aplicada para a relação entre as profundidades obtidas pelas diferentes frequências (200, 50 e 33 kHz) e as profundidades correspondentes dos vários extratos de densidade (intervalo entre 1080 e 1275 kg/m<sup>3</sup>).

As análises estatísticas tem como intenção verificar o quanto as multi-frequências se associam aos valores de profundidade registrados pela sonda, tanto em diferentes níveis de densidade quanto identificando o topo e o fundo do pacote lamoso.



A correlação de Pearson fornece o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que é uma medida de ajuste de um modelo estatístico linear e varia de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, mais correlacionado é o modelo e melhor se ajusta à amostra.

Para aprofundar a relação entre os dois equipamentos, foram calculados o erro médio, erro médio relativo, erro médio quadrático, o índice de espalhamento e a inclinação média quadrática [Mello *et al.* 2010]. Para isso, se assume que o dado obtido pelo densímetro é o mais próximo do real, pois é uma amostra medida diretamente do pacote de LF.

O erro médio, ou viés (eq. 4), mostra a diferença dos valores médios medido e modelado. Neste caso, o valor medido corresponde ao dado obtido pelo densímetro ( $\bar{S}$ ) e o valor modelado corresponde ao dado da ecosonda ( $\bar{E}$ ). A. Se este valor é inferior a 1, neste caso, ecosonda tende a subestimar o densímetro e caso o valor seja superior a 1, ocorre o contrário, a ecosonda superestima a sonda.

$$Viés = \bar{E} - \bar{S} \quad (eq. 4)$$

Além deste, o erro médio relativo (eq. 5) é similar ao anterior, fornecendo uma porcentagem que indica a incerteza dos dados.

$$Viés\ Relativo = \frac{\bar{E}}{\bar{S}} - 1 \quad (eq. 5)$$

O erro médio quadrático (RMSE) avalia a precisão dos resultados, indicando a magnitude do erro dos valores modelados em relação aos valores medidos utilizando o número amostral (N) do conjunto de dados. Neste caso, quantifica a diferença entre a profundidade obtida pela ecosonda e pelo densímetro (eq. 6). Quanto mais próximo de 0 o valor deste erro, maior a similaridade entre as medidas da ecosonda ( $\bar{E}$ ) e do densímetro ( $\bar{S}$ ).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{E} - \bar{S})^2} \quad (eq. 6)$$

O índice de espalhamento (SI) é definido como o erro RMS normalizado pela média dos valores observados e é dado pela equação 7. Esse parâmetro mede, em última análise, o grau de confiança que se pode ter nos resultados da ecosonda.

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{S}} \quad (eq. 7)$$

A inclinação quadrática média (SS) também conhecido como declividade de regressão não tendenciosa (eq. 8), é o resultado de uma análise de regressão na qual nenhum dos dois conjuntos de dados (ou seja, nem o modelo, nem as medições) é considerado como

“perfeito”, mas que contribuem igualmente para o erro. Numa situação ideal,  $S=1$ . Se  $SS>1$  o modelo tende a super-avaliar valores grandes (ou subavaliar valores pequenos) observados, enquanto o oposto ocorre quando  $SS<1$ .

$$SS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N E^2_i}{\sum_{i=1}^N S^2_i}} \quad (\text{eq. 8})$$

## Capítulo VI: Artigo Científico

**O** manuscrito, de autoria de Carolina de O. L. De-Zotti, Elaine S. Goulart, Lauro J. Calliari e Débora M. Machado, é intitulado “*Detection of Fluid Mud Deposits in a Shoreface Using Geophysical Methods and Direct Measurements*” e foi submetido para publicação no periódico “*Geo-Marine Letters*”.

## **Detection of Fluid Mud Deposits in a Shoreface Using Geophysical Methods and Direct Measurements**

De-Zotti, C. O. L.<sup>1\*</sup>; Goulart, E. S.<sup>1</sup>; Calliari, L. J.<sup>1</sup>; Machado, D. M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal University of Rio Grande (FURG), Institute of Oceanography, Post-graduated Program in Oceanology, Av. Itália km 8, Rio Grande, 96203-900 RS, Brazil.

<sup>2</sup> Federal University of Rio Grande (FURG), School of Engineering, Av. Itália km 8, Rio Grande, 96203-900 RS, Brazil.

\*dezotti.carolina@gmail.com; elainegoulart@gmail.com; lcalliari@log.furg.br; deboramach@gmail.com

### **Abstract**

The shoreface of Cassino beach (Rio Grande do Sul, Brazil) is an exceptional environment for the development of fluid mud deposits since it is located on a microtidal coast, dominated by waves and with a high degree of exposure. The present article aims to recognize the fluid mud deposit and its boundaries by associating geophysical methods with the direct measurements of the vertical density structure of the deposit. From 2018 to 2020, twelve field surveys were conducted simultaneously associating the density profiles with records of the dual-frequency echo sounder. Pearson's correlation was applied to determine the coherence between the detection of the fluid mud boundaries by both devices. The density intervals best recognized by each frequency used were identified. The range of densities from 1080 to 1100 kg/m<sup>3</sup> was recognized by the high frequency. The density of 1150 kg/m<sup>3</sup> had a better association with the low frequency of 50 kHz, and the density range of 1225 to 1250 kg/m<sup>3</sup> was associated with the frequency of 33 kHz. The densimeter combined with the dual-frequency echo sounder 200 kHz and 33 kHz had a better overall performance. This integrative approach successfully detected the presence, boundaries, and thickness of the fluid mud deposit. Complementary resources can be added to understand how the particularities of this environment interact with these layers.

**Keywords:** tuning fork; density; acoustic measurements; dual-frequency

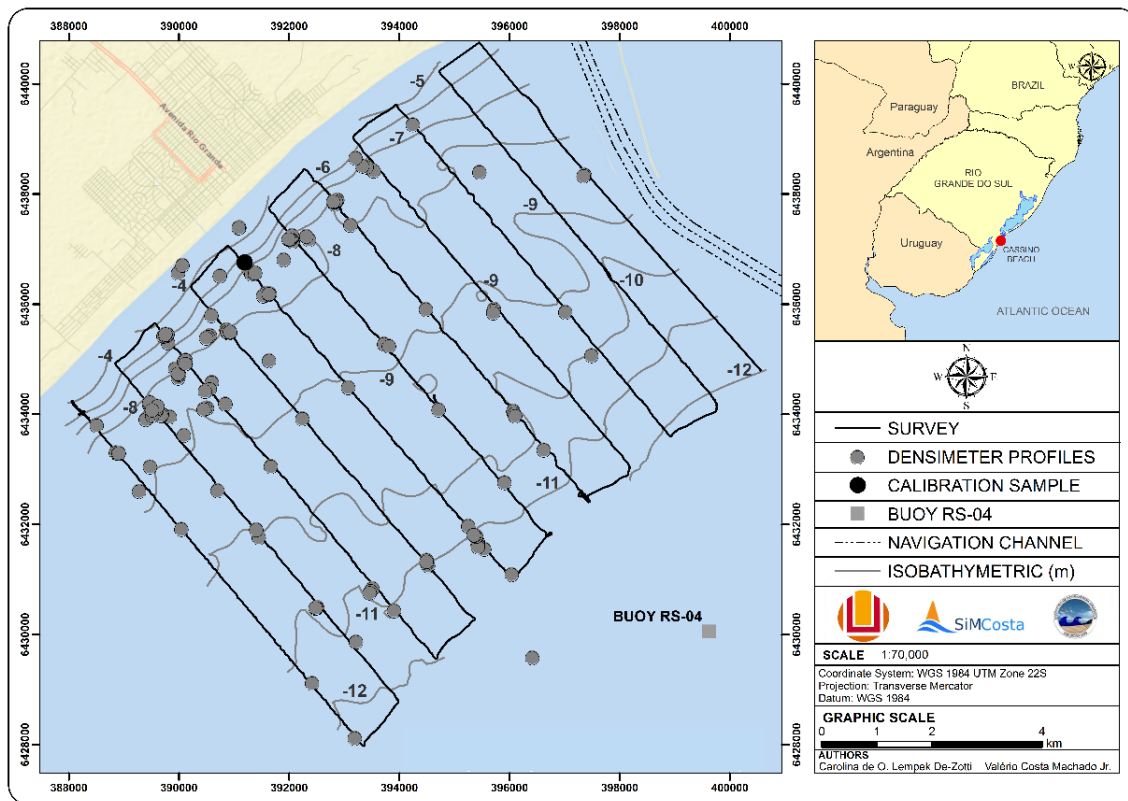
## 1. Introduction

Fluid mud can be defined as an aqueous suspension of a high concentration fine-grained sediment with an average density between 1080 and 1200 kg/m<sup>3</sup>. This layer has not yet formed an interconnected matrix of bonds strong enough to eliminate the potential for mobility leading to a persistent suspension (McAnally *et al.* 2007a). Fluid mud (FM) develops when there is sufficient fine-sediment supply and periods of low-intensity flow and is often associated with the lutocline (the abrupt change in sediment concentration with depth) (McAnally *et al.* 2007a; Carneiro *et al.* 2020). The accumulation of FM in the navigation channel of ports affects safety and makes nautical depth maintenance difficult.

The first criteria used for defining the nautical bottom was mud density, (e.g., in the Port of Rotterdam and the Port of Zeebrugge) (McAnally *et al.* 2007b), hence, tools were developed to measure the density *in situ* (Kirichek *et al.* 2020). The depth and thickness of the FM layer can also be determined by geoacoustical methods, for instance, using the dual-frequency single beam echo sounder (Winterwerp and Van Kesteren 2004). The geoacoustic methods constitute a set of indirect, non-destructive, and viable procedures for investigating submerged wide areas (Telford *et al.* 1990). The return of the acoustic measurement is generally associated with gradients on the density profiles (Welp and Tubman 2017). However, when the site presents a well-formed lutocline, it can produce multiple false bottoms (Carneiro *et al.* 2020), therefore requiring the use of direct measurements.

FM is also common in lakes, other channels, and coastal waters (McAnally *et al.* 2007a). In the beach environment, mud deposits are more frequent in tide-dominated beaches fronted by wide intertidal mudflats (Short 1999, 2006; Wang *et al.* 2002). The formation of FM banks in the shoreface of wave-dominated beaches is rare. In wave-dominated shallow-water sandy regions episodically overlain by mud deposits, FM can move towards the beach and possibly even onto the backshore during strong wave energy events (Matheu *et al.* 1995; Calliari *et al.* 2000; Holland and Elmore 2008; Calliari *et al.* 2020).

Cassino beach is located in the southernmost part of Brazil, Rio Grande do Sul state (RS) (Figure 1) and has an uninterrupted extension of 220 km long (Calliari *et al.* 2020). It is a high-energy dissipative beach composed mainly of fine quartz sand with multiple shore parallel sand bars, subjected to a microtidal regime, and exposed to strong winds and meteor-driven water level variations (Guedes *et al.* 2011; Möller *et al.* 2001).



**Fig 1** The survey lines transversal to the beach and location of the density profiles on the shoreface of Cassino Beach (the Rio Grande do Sul, Brazil) were obtained during the period from April 2018 to February 2020. Mud and water samples were collected for calibration of the densimeter. The water temperature and salinity were acquired from the buoy RS-04 (SiMCOSTA)

The Patos Lagoon system connects to the Brazilian Continental Shelf through an inlet fixed by two jetties 4 km long and the south jetty marks the beginning of the Cassino beach (Vinzon *et al.* 2009; Calliari *et al.* 2020). To the south of the port access channel, episodic FM banks occur on the shoreface. Sporadically, strong wave energy events transport these deposits to the nearshore and eventually onto the beach (Calliari *et al.* 2000; Vinzon *et al.* 2009; Holland *et al.* 2009; Calliari *et al.* 2020).

The Patos Lagoon system drains a vast area of the state of Rio Grande do Sul and the northeast of Uruguay. Herein, the suspended matter is mainly composed of silt and clay (Calliari *et al.* 2009). The amount of suspended matter exported to the shoreface and inner shelf as a plume is large but not elevated enough to generate a hyperpycnal plume (Calliari *et al.* 2020). This export was considered exclusive and the natural source of mud for the

deposits on the adjacent inner shelf (Calliari *et al.* 2020). However, the occurrence of FM deposits on the beach is frequently increasing. Calliari *et al.* (2020) argue that there is a relationship between the occurrence of FM on the beach and the main dredging operations in the navigation channel and consider these operations a substantial contributing factor to the formation of mud banks. These FM events can be highly unpredictable as the mud transport seems to depend not only on the actual meteorological conditions but also on previous events and mud characteristics (Calliari *et al.* 2009).

The deposits on the shoreface are intermittent and occur in the form of pockets of FM interbedded with fine sand; its thickness is variable and displays mobility both along and across the shoreface. Describing the variability of FM deposits and precisely identifying their limits on a high-energy shoreface is somewhat unprecedented. The integration of indirect and direct measurements acquired with the echo sounder and densimeter enabled the determination of the horizontal and vertical characteristics of the FM pockets. This present work aims to identify the boundaries of the FM deposit and recognize the vertical structure of density through the simultaneous association between the acoustic methods and densimeter measures.

## **2. Materials and Methods**

Each field survey followed predetermined navigation lines. The outline of the FM deposits was made using a dual-frequency echo sounder. In order to understand and validate the acoustic response of the FM deposit, direct measurements of density were made simultaneously. In Figure 1, the gray points are the locations of the density profiles obtained along the navigation lines where the echo displacement of high-frequency (HF) and low-frequency (LF) was recorded. Thus, the data obtained simultaneously can be integrated, observing the FM response recorded by the dual-frequency echo sounder and the densimetric profile.

### *2.1. Data acquisition*

From 2018 to 2020, twelve field surveys were carried out following ten profiles with an approximate length of 8 km spaced 1 km apart, between the depths of 2 and 13 m on the Cassino beach shoreface (Figure 1). Fluid mud data was acquired through remote and direct

simultaneous measurements. In 9 of the 12 campaigns, the dual-frequency single beam echo sounder (TGE®) was used at 200 kHz as high frequency (HF1) and 33 kHz as low frequency (LF1) with a vertical resolution of 1 cm. The system was linked to the Hydromagic acquisition software and a GPS AtlasLink GNSS Smart Antenna with a precision of 30 cm. The remaining 3 surveys used the echo sounder Lowrance® HDS Gen 2 at 200 kHz as high frequency (HF2) and 50 kHz as low frequency (LF2), linked to a GPS Lowrance with a precision of 5 m. Digital low-pass filters eliminated spikes and reduced the wave effect. It should be noted that in October 2018, the dredging process began at the navigational channel of the Port of Rio Grande, continuing until the final field campaign.

In each survey, when a consistent FM signal was identified by the displacement of the dual-frequency record, the vessel immediately stopped. Three density profiles were performed as close as possible to the navigation lines and, 124 density profiles were collected associated with the HF1 and LF1 and, 130 profiles with the HF2 and LF2, respectively.

## 2.2. Indirect Method

The operating principle of the echo sounder is the propagation of acoustic waves through the water column until the signal reaches an acoustic interface which it cannot penetrate. The acoustic impedance marks an abrupt change in the sediment property causing the reflection of the acoustic pulse back to the transducer (Quaresma *et al.* 2011). The dual-frequency echo sounder recognizes the FM deposits by indicating a displacement of the echo signal or a double echo (Odhiambo and Stephen, 2004). The HF usually identifies the first acoustic impedance gradient characterized by the transition between water and lutocline. This reflector is used to identify the top of the FM layer. The LF has sufficient energy to go through the first gradient but does not penetrate the second acoustic impedance gradient between FM and the sediment in a more consolidated state. The reflected signal indicates the end of the FM deposit. Each frequency used will have different responses in acoustic impedance contrasts because of the different degrees of compaction in the vertical structure of the bed. The thickness of the deposit is calculated by the difference between elevations, i.e., the final and initial depths of the FM deposit identified by the dual-frequency echo sounder and the densimeter, respectively. Surface sediment samples of the area were collected in 2018 using the box corer grab sampler to corroborate the response of the echo



sounder signal. In the laboratory, a laser particle size analyzer processed the samples (MICROTAC S3000/3500).

### 2.3. Direct Method

The densimeter RheoTune® (STEMA Systems) is a metallic sensor tuning fork that vibrates at a predetermined frequency (Menandro *et al.* 2015). The instrument manually descends the water column penetrating the FM layer until it encounters a more consolidated sedimentary horizon. The probe records the amplitudes triggered by the mechanical vibrations in the frequency range of 500–800 Hz (Kirichek *et al.* 2020); the output data recorded is frequency, amplitude, and density. The field surveys aimed to observe the displacement in the echo sounder signal register and, simultaneously, make a density profile of the vertical structure of the deposit.

Each particular mud has to pass through calibration to obtain reliable results (Carneiro *et al.* 2020; Groposo *et al.* 2014). A representative local sample of sediment and water was retrieved in a field campaign using a box corer grab sampler (Figure 1). The procedure followed the guidelines presented in Fonseca *et al.* (2018). The mud sample was tested at thirteen different densities obtained through a dilution process. The range of densities used was from 1085 to 1274 kg/m<sup>3</sup>. The density of each sample was assessed by comparing the wet and dry weights (before and after drying the samples at 100 °C for 24 h) (Groposo *et al.* 2014; Carneiro *et al.* 2017; Fonseca *et al.* 2018; Carneiro *et al.* 2020). The density of water was calculated based on the temperature (25.2°C) and salinity (31.42 PSU) at the site provided by the buoy RS-04 (<http://www.simcosta.furg.br/home>). The densities of water and the mineral particles were 1020 and 2650 (quartz) kg/m<sup>3</sup>, respectively. Each measure of the tuning fork in a particular density generated a cluster of frequency and amplitude, which was adjusted to a linear trendline. The interpolation of all regression lines created a calibration domain of frequency × amplitude × density that was applied to edit the 254 profiles of raw density data collected *in situ* (Fonseca *et al.* 2018; Carneiro *et al.* 2020). In the post-processed profile density data, the range used to identify the FM layer was the same as the calibration.

#### 2.4. Density and boundaries of the fluid mud deposit

The measures of each method were compared to determine the coherence between them. In this case, the upper FM layer represented the depth at which the HF signal is reflected and the depth of the first reading in the densimeter profile. Herein, a value close to or greater than 1080 kg/m<sup>3</sup> was used for the depth of the density profile. The lower limit of the FM deposit represented the respective depths of the LF signal reflection and the density transition between the FM and a more consolidated layer. Pearson's correlation was applied to the parameters. To evaluate the uncertainty of the results, relative bias (Eq. 1) and root mean square error (RMSE) (Eq. 2) were calculated (Melo *et al.* 2010). The equations consider  $\bar{E}$  as the average echo sounder depth,  $\bar{S}$  as the average densimeter depth, and N as the number of samples.

$$\text{Relative Bias} = \frac{\bar{E}}{\bar{S}} - 1 \quad (1)$$

The RMSE (Eq. 2) quantifies the difference between the initial and final depths, respectively.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{E} - \bar{S})^2} \quad (2)$$

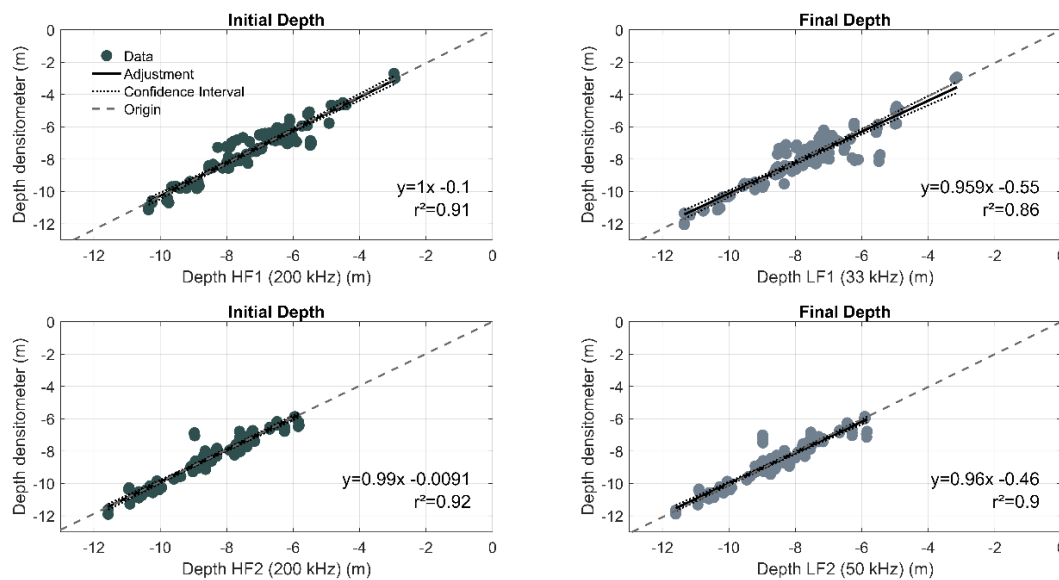
### 3. Results

Regarding grain size, the results of sediment samples collected at the shoreface of Cassino beach showed, on average, 27.9% of sand, 68.7% of silt, and 3.4% of clay, with a mean particle diameter of 31  $\mu\text{m}$ .

Concerning the echo sounder results, the ability to delineate the FM deposit and the level of agreement between this method and the densimeter was first evaluated. The relation representing the initial limit of the FM deposit was formed by the respective depths at which the HF signal was reflected and the densimeter identification of the initial density gradient, i.e., the first rheological transition. The relation representing the final limit of the FM deposit was composed of the depth of the LF reflector and the transition identified by the densimeter, i.e., second rheological transition. Figure 2 shows the correlations obtained by relating each frequency of the echo sounder and its respective densimeter measurements. Two sets of data were analyzed: densimeter and the dual-frequency echo sounder (HF1 and LF1) with 124

profiles; and densimeter and the dual-frequency echo sounder (HF2 and LF2) with 130 profiles.

Analyzing the initial depth in Fig. 2, both echo sounders in the HF were able to identify the top of the FM layer according to the respective measure of the densimeter, generating correlation coefficients greater than 95%. The similarity in the coefficient between both devices also indicates the consistency of the measure. In the identification of the lower boundary of the FM deposit, both LFs presented correlation coefficients greater than 85%, also indicating a satisfactory correlation between the echo sounder and densimeter, showing that both LFs can successfully delineate the lower boundaries of the deposit.



**Fig 2** Regression between echo sounders with different frequencies and their respective densimeter measures, considering a confidence interval of 95% and  $r^2$  as the coefficient of determination

Table 1 shows the relative bias and mean quadratic error (RMSE) values obtained for the data. The first relation between HF1 and the densimeter measurements had an RMSE of 0.51 and a relative bias of 3%. A negative bias indicated that the echo sounder was underestimating approximately 3% of the measurements obtained by the densimeter. The second relationship between HF2 and the densimeter had an RMSE of 0.41 and a relative bias of 1%. The positive signal indicated the overestimation made by the echo sounder in identifying the top of the FM layer. Although HF1 and HF2 have the same frequency, the penetration power of the two devices is different because of the distinct capacities of the

transducers to penetrate the lutocline layer. For instance, in cases of a well-defined lutocline, HF2 may reflect its signal at lower densities with less error when compared to HF1 equipment.

**Table 1:** Values of relative bias and Root Mean Squared Error (RMSE).

<b>Variable</b>	<b>Relative Bias (%)</b>	<b>RMSE (m)</b>
<u>Initial Depth:</u>		
Depth densimeter and depth HF1	-3.04	0.51
<u>Final Depth:</u>		
Depth densimeter and depth LF1 (33 kHz)	-2.91	0.65
<u>Initial Depth:</u>		
Depth densimeter and depth HF2	1.04	0.41
<u>Final Depth:</u>		
Depth densimeter and depth LF2 (50 kHz)	-0.83	0.42

Regarding the identification of the end of the FM layer, both relative biases were negative. Both LFs underestimated the densimeter measures for the final depth, demonstrating a lack of penetration power into the FM deposit compared to the densimeter. Although the relative bias had insignificant absolute values, this infers that the FM deposit was slightly thicker than was indicated by the echo sounder data. Perhaps this suggests the existence of an earlier interface of suspended material that the HF was unable to delineate. The RMSE values had a magnitude of 0.51m for HF1 and 0.65m LF1. Since the initial proposal of this survey was to preliminarily delimit the deposits these errors can be considered low.

Table 2 shows the average thickness found by the echo sounders and their respective measure in the densimeter. The densimeter and dual-frequency HF1 and LF1 measured the same average thickness in the FM deposit. The relative bias showed an underestimation of the FM layer made by the dual-frequency echo sounder. However, by integrating the response of the average thickness with the relative bias and the RMSE (Table 2), it is possible this difference will be compensated by the average values. In comparison, the echo sounder HF2 overestimated the densimeter's identification of the FM upper layer, and the LF2

underestimated the final depth identifying only half the average thickness quantified by the densimeter. These results are most likely related to the environmental context and will be addressed in the discussion.

**Table 2:** The average thickness of the FM layer, calculated by the difference of the final minus the initial depth.

	<b>HF1 and LF1</b>	<b>Densimeter</b>	<b>HF2 and LF2</b>	<b>Densimeter</b>
Average Thickness (m)	0.61	0.61	0.12	0.24

Table 3 shows the mean density value in which each frequency was reflected (HF1, LF1, HF2, and LF2). The mean densities were calculated at the point where the initial and final depths occurred to understand which density is better recognized by each frequency. The densities reflected in both HF's were similar and show the consistency of the devices. The determination of the lower boundary of the FM deposit was a more difficult task. The LF2 signal penetrated to an approximate average density of 1234 kg/m<sup>3</sup> and the LF1 to an approximate average density value of 1253 kg/m<sup>3</sup>. Due to the specific energy of each frequency, it is consistent that LF1 was able to reach layers with a higher degree of consolidation.

**Table 3:** The average density reflected in both HF and LF.

	<b>HF1</b>	<b>LF1</b>	<b>HF2</b>	<b>LF2</b>
Average Density (kg/m <sup>3</sup> )	~1119	~1253	~1126	~1234

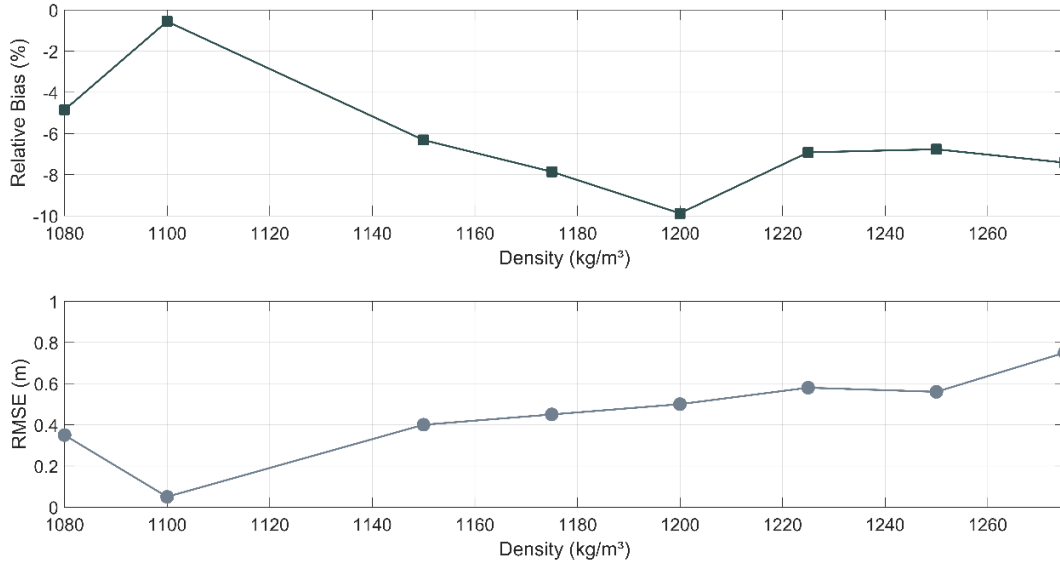
The separation of the density data into intervals distributed in the range of 1080 to 1275 kg/m<sup>3</sup> aimed to understand the relationship between the penetration of the different frequencies in the FM structure. For instance, what specific density is best recognized by each frequency? For each density, the depths of the reflectors were related to their corresponding densimeter measure. Table 4 summarizes the density ranges and their relative bias and RMSE. Figure 3 gives a partial graphic representation of Table 4. The results show the HF reflector had lower values of relative bias and RMSE in the range of 1080 and 1100

kg/m<sup>3</sup> inferring that the HF effectively recognizes the top of the FM layer. In relation to the LF's, both presented a constant trend in the RMSE (Table 4); in this case, the relative bias may be more useful. The density layer of 1225 kg/m<sup>3</sup> was best recognized by LF1 with a relative bias of 0.72%. For LF1, the range of densities from 1200 to 1275 kg/m<sup>3</sup> had relatively constant RMSE values. Therefore, the average density of 1253 kg/m<sup>3</sup> is associated with the amplitude of densities presented in Table 4.

Analyzing the separation of the density data into intervals (Table 4) it can be observed that the density of 1150 kg/m<sup>3</sup> was best recognized by LF2 with a relative bias of 0.34%. This frequency also presented descending values of RMSE ranging from 1225 kg/m<sup>3</sup> to 1250 kg/m<sup>3</sup>, demonstrating that the LF2 can penetrate deeper into FM deposits. Interpreting the results presented in both Tables 1 and 4, the LF2 can identify the density of 1234 kg/m<sup>3</sup> with smaller errors. In contrast, the relative bias negative value at the level of 1250 kg/m<sup>3</sup> indicates that the echo sounder penetrates at shallower depths than the densimeter. In addition, the density of 1100 kg/m<sup>3</sup> had low RMSE and one of the smallest relative biases associated with HF1.

**Table 4:** Values of relative bias and RMSE for predetermined density ranges.

Density (kg.m <sup>-3</sup> )	Depth HF and densimeter depth		Depth LF1 and densimeter depth		Depth LF2 and densimeter depth	
	Relative Bias (%)	RMSE	Relative Bias (%)	RMSE	Relative Bias (%)	RMSE
1080	-4.86	0.35	-8.53	0.51	5.06	0.40
1100	-0.56	0.05	2.35	0.84	3.69	0.25
1150	-6.32	0.40	4.99	0.55	0.34	0.27
1175	-7.86	0.45	-4.23	0.77	-1.53	0.22
1200	-9.88	0.50	-1.85	0.72	4.29	0.31
1225	-6.92	0.58	0.72	0.64	4.55	0.35
1250	-6.77	0.56	-2.4	0.62	-4.36	0.24
1275	-7.42	0.75	-2.77	0.69	-2.64	0.25



**Fig 3** Relative bias (upper) and root mean squared error (RMSE) (bottom) in association with the high-frequency reflector

#### 4. Discussion

The initial objective of this study was to identify the boundaries of the FM deposit and recognize the vertical structure of density through the simultaneous association between the acoustic methods and densimeter measures. Table 2 considers the difference in the ability of the echo sounders to recognize FM deposits. The results show that the HF1 and LF1 and the densimeter had a very similar average thickness value, indicating coherence between the two devices. HF1 and LF1 underestimated the densimeter reading with a similar negative bias, -3.04% and -2.91%, respectively. Thus, the underestimated percentage may enable similar average thickness values, even if the initial (HF1) and final (LF1) depths of the echo sounder readings are not the same as the densimeter. Figure 2 corroborates this conclusion, given the 86% correlation coefficient for the bottom boundary of the FM deposit. The HF2 and LF2 recognized only half the average thickness identified by the densimeter. The HF2 overestimated the initial depth of the FM deposit concerning the densimeter reading, i.e., HF2 identified the acoustic impedance gradient after the densimeter identified the density gradient. The LF2 underestimated the final depth, that is, the densimeter reading delineated the bottom of the FM deposit after the LF2. It seems that, under certain conditions, sediment characteristics may change near the density range of 1150 kg/m<sup>3</sup> and, when that happens, the LF2 signal cannot penetrate further into the deposit.

Analyzing the performance of the LF2, the results indicate that it best recognized a density range of 1150 kg/m<sup>3</sup> and 1225 kg/m<sup>3</sup> to 1250 kg/m<sup>3</sup>. The reason for this unexpected finding is unclear but can be partially interpreted based on the environmental context of which the data was collected. The dual-frequency LF2 was used in surveys conducted in April and May 2018 and in June 2019. During 2018 there was no mud event on the beach profile. The surveys showed a minimum amount of FM in some sporadic locations. The field campaign using HF2 and LF2 occurred in the early winter of June 2019. The study area is known for its well-defined seasons, with rainy winters, cold front passages (6-15 days), and extratropical cyclones (Calliari *et al.* 2020). Therefore, during the survey using LF2, the scarcity of FM influenced the low average thickness. Homogeneity of the water column is a characteristic situation of this period of the year due to the intensity of the meteorological parameters. Consequently, there may not have been a well-marked acoustic impedance gradient for the echo sounder to recognize, hence, the response between the two frequencies occurred at nearby depths. The behavior of the material most probably caused the variation of measure detection between the densimeter and the echo sounder. Preceding the lutocline layer, the suspended material with lower densities composes the diluted suspension. In this period, the Patos Lagoon system intensively leaks fine sediments. The amount of suspended material from the inner shelf is enriched in a mixed water column due to the great turbulence. As a result, the consolidation of sediments is hindered, forming the diluted suspension. Therefore, the densimeter may have been able to detect this layer but it was not detected by the HF2.

In a well-mixed water column, the absence of a well-marked acoustic impedance gradient causes proximity in the frequency reflection. Consequently, the echo sounder registers the low thickness of the FM deposit. This explanation seems probable when analyzing the data in Table 4: LF2 successfully identified the densities of 1150 to 1175 kg/m<sup>3</sup>. The RMSE values for LF2 showed a decreasing trend associated with the density range of 1225 to 1275 kg/m<sup>3</sup>. The average density of the FM deposit was approximately 1234 kg/m<sup>3</sup> (Table 3); thus, this density can be recognized with confidence. The two distinct density ranges that LF2 better recognized as the bottom of the FM deposit are intriguing. It suggests that detection is subject to the density profile at the time and is especially dependent on the range and concentration of suspended sediments in the water column. For example, when



there is a shallow well-defined lutocline forming an intense gradient in the density profile, the LF2 can interpret the significant energy return as a false bottom. The echo sounder registers minimum thickness since the signal is reflected at lower densities, such as 1150 kg/m<sup>3</sup>. In cases when the profile has a poorly defined lutocline, the LF2 can penetrate the deposit until approximately 1275 kg/m<sup>3</sup>, suggesting that, this density may be associated with a rheological transition.

The average density found by the LF2 corroborates the results presented in Calliari *et al.* (2009). The authors studied a deposition event that occurred in 1998. Cores located in areas with a depth less than 7m presented a mud content of 93% and an average density of 1230 kg/m<sup>3</sup>, with sandy laminations (mean thickness of 0.10 meters) and abrupt transitions. These results reveal the sandy lamination layers interbedded with the FM, thereby representing an obstacle to the LF2 signal. Based on the published literature, Table 5 assembles the particle size distribution for environments with the presence of FM in Brazil.

**Table 5:** Summary of the grain size distribution of the fluid mud deposit in Brazil.

Sample	Grain Size			Reference
	Silt	Clay	Sand	
Port of Itajaí (SC)	80%	15%	5%	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Port of Santos (SP)	65%	15%	20%	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Amazon North Channel (AM)	85%	10%	5%	Vinzon and Gallo 2016
Sedimentation column (Itajaí, SC)	82%	14%	5%	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Port of Tubarão (ES)	61%	19%	20%	Soares 2019*
Cassino Beach (RS)	69%	3%	28%	This study

\*The mean value of grain size was calculated by the authors based on the publication.

Comparing these environments with the Cassino shoreface, there is a drastic difference in the presence of clay and a high content of fine to very fine sand. Here, the

maximum value of clay in the samples was 10%. This is important to note, since the clay content in the sample plays an essential role in the flocculation and matrix formation processes of cohesive sediment and cohesion maintenance in the FM deposit (Winterwerp and Van Kesteren, 2004). In the present work, the amplitude of sand content varied from 8% to 63% in some samples, having an average sand content of 28%. The higher sand content significantly decreases the organic matter content and thus, modifies the rheological properties of the sample, for instance, the viscosity and yield point tend to increase (Wurpts 2005). The mud samples with the presence of organic matter can significantly alter their rheological characteristics (Shakeel *et al.* 2020). Mcanally *et al.* (2007a) argue that, in energetic environments, the larger particles (fine sand) are occasionally trapped in the FM layers and decanted inside the deposit.

At Cassino beach, the FM and very fine sand depositions are interbedded successively according to the active hydrodynamic regimes. Cores collected in 2004 and 2005 (Calliari *et al.* 2007; Calliari *et al.* 2020) showed the mud deposits in shallower regions (<-10m) had superficial FM interbedded with sand laminations. Cores located at greater depths (up to -14m) exhibited compacted mud interbedded with a diverse sand thickness. Such a pattern could represent periods of a rapid supply of mud and a subsequent advance of the transgressive sheet relic sand over the recent FM deposits. This creates a heterogeneity of the vertical structure since the actual average grain size remains primarily a mixture of silt and sand, changing the behavior of the FM deposits. Thus, the enrichment of sandy laminations mixed in the samples could indicate a severe rework which can only be attributed to the wave action (Calliari *et al.* 2009).

The thickness of sand between the FM deposits is the deciding factor whether the sandy laminations will become an obstacle for the LF signal. The amount of sand overlying on the FM deposit is a function of the capacity and magnitude of the meteo-oceanographic parameters. The sand thickness between the deposits may represent a significant gradient of acoustic impedance causing the incorrect determination of the bottom of the FM deposit. Both of the LFs could be reflecting in sandy laminations before reaching the bottom of the FM deposit *in situ*. The LF1 is more capable of penetrating these sandy layers, although its penetration is dependent on the acoustic impedance gradient. The densimeter needs to

penetrate less rigid bottoms (soft muds); if the amount of sand in the layer is too thick, the equipment will have its descent obstructed.

Since the densimeter and HF1 and LF1 were able to quantify the same average thickness, it can be concluded that the FM deposit was correctly delineated by integrating the two devices. The sedimentary interface below the FM layer may be composed of sandy laminations with enough sand content to block the acoustic signal and prevent the penetration of the densimeter. It is supposed that if there is an adjacent layer of mud, it may have different characteristics and behavior. According to prior knowledge of the area, sand represents the most obvious sedimentary material exchange. Table 1 shows that the HF1 and LF1 underestimated the densimeter. For the LF1 penetration, the potential increase in the amount of sand near the bottom of the FM deposit probably formed the second well-marked gradient for the acoustic signal. However, for the densimeter, this gradient was not considered an obstacle capable of preventing the penetration of the device into the sedimentary layer, thereby causing the mismatch in readings and allowing the densimeter to penetrate further into the deposit, reaching more consolidated density levels. For LF2, the amount of interbedded sand may have been a determining factor in weakening the penetration of the LF2 signal. Therefore, in future research, it is important to assess the vertical sand content and thickness of the laminations capable of influencing the LF response.

Table 6 presents a summary of the densities identified as horizons by the different frequencies used in Brazil in the FM research. Carneiro *et al.* (2020) demonstrated that the frequency of 200 kHz is the correct identifier of lutocline in environments where there is a density gradient of approximately 500 kg/m<sup>3</sup>. Lutocline behavior is time-dependent and FM thicknesses can change according to hydrodynamic conditions such as tide, currents, and wind speed (Mehta *et al.* 2014). In this present study, the lowest errors in readings occurred at lower densities, between 1080 and 1100 kg/m<sup>3</sup>.

Carneiro *et al.* (2020) suggested that the closeness of the dual-frequency (HF as 210kHz and LF as 28kHz) was similar to the return of the smallest thicknesses found by the densimeter. The authors found that the density in the Amazon North Channel had higher values than the rest of the analyzed samples. Lutocline was possibly the only well-marked gradient in this environment; hence, the homogeneity between acoustic impedance gradients approximated the reflectors of the dual-frequency. The LF 28 kHz used by Carneiro *et al.*

(2020) had greater penetration in the sediment than the frequencies in this work (33 and 50 kHz).

**Table 6:** Summary of dual-frequencies used in surveying FM in Brazil and the horizons where HF and LF are reflected with an associated density.

Sample	HF (kHz)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	LF (kHz)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thickness (m) LF-HF	Ref.
		HF		LF		
Port of Itajaí (SC)	200	1021	24	1327	0.345	Carneiro <i>et al.</i> 2020*
Port of Santos (SP)	200	1046	28	1245	0.315	Carneiro <i>et al.</i> 2020*
Amazon North Channel (AM)	210	1136	28	1402	0.192	Carneiro <i>et al.</i> 2020*
Sedimentation column (Itajaí)	200	~1140	33	Column bottom	1.19	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Scenario A Sedimentation column (Itajaí)	210	~1170	33	~1170	0.02	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Scenario B Sedimentation column (Itajaí)	200	~1119	33	~1253	0.61	This study
Cassino Beach (RS)	200	1050	38	1150 to 1200	0.18 to 0.90	Soares 2019
Port of Tubarão (Vitória, ES)	200	~1200	50	~1200	0.03	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Sedimentation column (Itajaí)	200	~1030	50	~1220	0.82	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Scenario B Sedimentation column (Itajaí)	200	~1060	50	~1200	0.38	Carneiro <i>et al.</i> 2020
Scenario C Sedimentation column (Itajaí)	200	~1126	50	~1234	0.12	This study

\*Represents mean values.

The LF2 data for the Cassino shoreface also showed low thicknesses of FM. This was due to two possible scenarios: near-absence of FM thickness in April and May 2018, except for a few sporadic locations where the density of 1250 kg/m<sup>3</sup> was recognized by LF2, and; the characteristic scenario of winter (June/2019) with a homogeneous water column rich in suspended material where LF2 identified densities of 1150 kg/m<sup>3</sup> (Table 4).

Soares (2019) correlated direct measurements obtained by a densimeter with indirect methods when evaluating FM in the Port of Tubarão (Espírito Santo - Brazil). A linear correlation was performed between the depths of 38 kHz as LF and the corresponding depths of specific densities in the deposit. The best values of the correlation coefficient ( $r^2$ ) were found where the specific masses of 1150 and 1175 kg/m<sup>3</sup> occur. The author also identified the acoustic signal frequency of 200 kHz at a minimum density of 1100 kg/m<sup>3</sup>.

There is great variability in the FM characteristics within the environments of Brazil. Table 6 summarizes the research made relating the dual-frequency echo sounders with the densimeter measures. Carneiro *et al.* (2020) proved that the LF 28 kHz used in the Port of Santos could identify FM layers with greater consolidation while Soares (2019) related the LF 33 kHz used in Port of Tubarão to recognizing densities of 1150 to 1200 kg/m<sup>3</sup>. In this work, the LF 33 kHz recognized the mean density of 1254 kg/m<sup>3</sup> and a density interval of 1225 to 1275 kg/m<sup>3</sup>. Comparing the LF 28 kHz and 33 kHz, the first penetrates layers with higher degrees of consolidation. This statement is true for the FM on the navigation channel of Port of Tubarão since the higher density recognized by the LF 33 kHz was 1200 kg/m<sup>3</sup>. However, for Cassino beach, the density of which the LF 33 kHz penetrated was higher (1253 kg/m<sup>3</sup>) than the LF 28 kHz (1245 kg/m<sup>3</sup>) used in the Port of Santos.

The Cassino shoreface is an exposed beach dominated by waves and has well-marked seasons: these factors cause the spatial variability of these intermittent deposits. Additionally, anthropic contributions resulting from dredging operations are important as a primary source of material and may influence the spatial and temporal variability of deposits according to time and dredged areas.

## **5. Conclusion**

The FM deposit present at the shoreface of Cassino Beach was successfully identified by integrating different devices and methods. Combined with the direct measurements of the

vertical density profile using the densimeter, the dual-frequency echo sounder 200 kHz and 33 kHz had a better overall performance.

The reason for the uncertainties in LF2 could be the variable thickness of the sandy laminations interbedded with FM. The behavior of the LFs acoustic signal interacting with the sandy laminations or achieving an acoustic impedance gradient of this nature must be studied in-depth, as well as the quantification of the thickness capable of masking the supposed underlying FM deposits. The investigation of how sandy laminations influence the behavior of the FM deposit is also of interest.

Delineating the density boundaries in these deposits is somewhat unprecedented. This is the first step in understanding the rheological properties of these shoreface FM deposits. Since the characteristics of FM are time-dependent, the study of the deposits in this particular environment will require greater detail and a combination of different methods and capabilities. FM deposits are rare in an environment like this: open, exposed, high-energy, and subjected to a microtidal regime. This environment is subordinated to weather events of great magnitudes, with a dynamicity of hours and so different from other places where FM accumulation occurs and is studied. Other strategies need to be developed due to these peculiarities. Different protocols must be created to deepen the knowledge about the rheological properties of this FM. Furthermore, it is important to integrate and properly understand how the oceanographic parameters influence the FM deposits.

This work successfully delineated the FM deposit present in the shoreface of Cassino beach by integrating the dual-frequency echo sounder 200 kHz and 33 kHz with a densimeter. The use of the densimeter is extremely important in this stage of the research. It provides sampling of the vertical structure of density *in situ*, expanding our knowledge of the FM deposits of this distinct and dynamic environment. The density range best identified by the frequency of 200 kHz is 1080 to 1100 kg/m<sup>3</sup>. Concerning the low frequency of 33 kHz, the density range identified with lower errors is 1225 to 1250 kg/m<sup>3</sup>. The low frequency of 50 kHz should be used with caution in this environment.

## **6. Acknowledgments**

The authors appreciate the funding and support in the fieldwork of the Monitoring System of Brazilian Coast (SiMCOSTA) and its team. We thank the Brazilian National

Council for Scientific and Technological Development (CNPq) for the scholarship granted and the resources provided by Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) to support the Graduate Program in Oceanology.

# Capítulo VII: Síntese da Discussão e Conclusões

**E**ste capítulo inicialmente apresenta uma breve síntese dos resultados e discussão do trabalho, evidenciados no artigo científico. Em seguida, são expostas breves considerações gerais que exprimem parcialmente o conhecimento adquirido de forma empírica nos demais âmbitos da pesquisa e levantam novos questionamentos acerca da LF presente na antepraia da praia do Cassino. Finalmente são apresentadas as conclusões desta dissertação.

## 7.1. Síntese da Discussão

Este trabalho identificou com sucesso os depósitos intermitentes de LF da antepraia da Praia do Cassino (RS, Brasil) utilizando métodos indiretos e diretos. A espessura média identificada pelo densímetro e a ecossonda de dupla frequência 200 kHz (HF1) e 33 kHz (LF1) foi similar. O uso de métodos indiretos neste contexto nos possibilita cobrir uma vasta área de estudo, como a antepraia da Praia do Cassino, portanto integrar ambos equipamentos é a metodologia mais indicada para detectar este depósito. No geral, a ecossonda de dupla



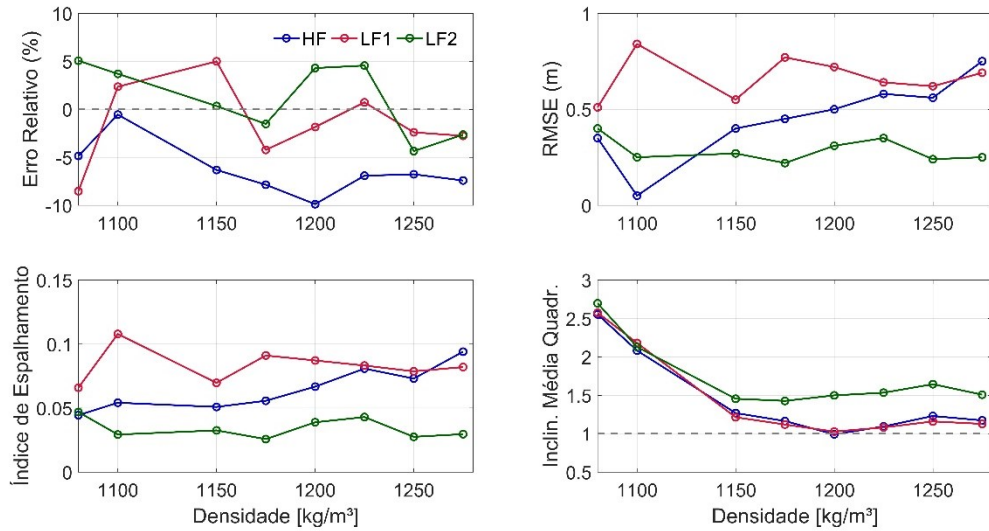
frequência 200 kHz (HF2) e 50 kHz (LF2) identificou apenas metade do pacote lamoso identificado pelo densímetro (D).

Foi possível relacionar a estrutura vertical de densidade do depósito de LF aos horizontes identificados pela geofísica rasa de diferentes frequências. A densidade média reconhecida pela HF1 foi de 1119 kg/m<sup>3</sup> e pela LF1 foi de 1253 kg/m<sup>3</sup> (Tab. 11). A densidade média reconhecida pela HF2 foi de 1126 kg/m<sup>3</sup> e pela LF2 de 1234 kg/m<sup>3</sup>. As densidades médias reconhecidas por ambos equipamentos na alta frequência possuem valores muito similares e reforçam a capacidade de detecção desta frequência nesta faixa de densidade. Conforme a literatura, a LF1 é capaz de penetrar até maiores densidades, comparada à LF2.

**Tabela 11:** Resumo das estatísticas para o pacote de LF segundo ambos monitoramentos com a ecossonda de dupla frequência e o densímetro. Na sequência da esquerda para a direita: Densidade média, desvio padrão da densidade, erro médio, erro médio relativo, erro médio quadrático (RMSE), índice de espelhamento (SI) e inclinação média quadrática (SS).

Conjunto de Variáveis	$\bar{\rho}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma(\rho)$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\bar{E}$ (m)	$\bar{E}_r$ (%)	RMSE (m)	SI	SS
<u>Prof. Inicial:</u> D x HF1	1119	31.51	-0.22	-3.04	0.51	0.071	0.968
<u>Prof. Final:</u> D x LF1	1253	25.69	-0.23	-2.91	0.65	0.084	0.971
<u>Prof. Inicial:</u> D x HF2	1126	40.04	0.08	1.04	0.41	0.045	1.017
<u>Prof. Final:</u> D x LF2	1234	40.75	-0.07	-0.83	0.42	0.049	0.999

Com o objetivo de compreender como a estrutura vertical da densidade no pacote lamoso influencia o retorno do sinal acústico das diferentes frequências, oito densidades dentro do intervalo 1080 a 1275 kg/m<sup>3</sup> foram analisadas (Fig. 28). A faixa de densidade 1080 a 1100 kg/m<sup>3</sup> foi mais bem identificada pela alta frequência 200 kHz, apresentando valores de coeficientes de determinação (Tab. 12) e demais parâmetros estatísticos satisfatórios.



**Figura 28:** Resumo das estatísticas (erro médio relativo, RMSE, índice de espalhamento e inclinação média quadrática) sobre a capacidade da ecossonda de dupla frequência identificar determinadas densidades dentro do intervalo selecionado de 1080 a 1275 kg/m<sup>3</sup>. Em azul temos as informações para a alta frequência 200 kHz de ambos equipamentos, em vermelho os valores para a baixa frequência de 33 kHz (LF1) e em verde os valores para a baixa frequência de 50 kHz (LF2).

**Tabela 12:** Valores de R<sup>2</sup> obtidos a partir da correlação entre as profundidades encontradas na sondagem de 200kHz e as profundidades correspondentes às densidades de 1080, 1100 e 1150 kg/m<sup>3</sup>

Densidade	1080	1100	1150
R <sup>2</sup> HF1	0.96	0.88	0.88
R <sup>2</sup> HF2	0.98	0.97	0.71

A faixa de densidade 1225 a 1250 kg/m<sup>3</sup> é melhor identificada pela baixa frequência 33 kHz, apresentando menores erros associados, como explicado no artigo. A baixa frequência 50 kHz identifica a densidade 1150 kg/m<sup>3</sup> com menor erro médio relativo, entretanto o RMSE da densidade 1175 kg/m<sup>3</sup> e da faixa de densidade 1250 a 1275 kg/m<sup>3</sup> apresentam valores mais próximos a zero, indicando que também podem ser identificados corretamente pela baixa frequência. Devido à variabilidade sazonal da região, a ecossonda de dupla frequência 200 kHz e 50 kHz poderia ser utilizada em condições específicas. Para sua utilização na antepira de um ambiente dinâmico, é possível testá-la acoplada a um turbidímetro, visando compreender se está é capaz de identificar os limites da camada da lutoclina.

Caso a navegação em LF seja considerada, a ecossonda também pode ser testada no canal de navegação. Ferket *et al.* [2016] em um estudo preliminar, examinaram a camada de LF formada no período de monções e determinaram que a navegação em LF no porto de Cochin (Índia) deve possuir como densidade máxima 1170 kg/m<sup>3</sup>, correspondente ao limite seguro mais raso.

Soares [2019] e Pion [2017] mapearam os depósitos lamosos dos portos de Tubarão e Itajaí, respectivamente, a fim de iniciar os estudos de navegação em LF nestes locais. A tabela 13 mostra os valores de R<sup>2</sup> obtidos a partir da correlação entre as profundidades do levantamento na baixa frequência encontradas e as profundidades mapeadas associadas ao densímetro, na mesma faixa de densidade analisada (de 1080 a 1275 kg/m<sup>3</sup>). Quanto mais o valor de R<sup>2</sup> se aproxima de 1, melhor a correlação entre profundidades.

**Tabela 13:** Valores de R<sup>2</sup> obtidos a partir da correlação entre as profundidades encontradas na sondagem de baixa frequência e as profundidades correspondentes à diversas faixas de densidade, comparando trabalhos pretéritos brasileiros com este estudo.

Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Período de cada estudo	R <sup>2</sup>					Ref
		1150	1175	1200	1225	1250	
38 kHz	fev/18	0,78	0,81	0,76	0,42	0,16	Soares 2019
	abr/07	0,01	-	0,06	-	0,01	
33 kHz	mai/07	0,47	-	0,74	-	0,76	Pion 2017
	jul/07	0,54	-	0,50	-	0,16	
	nov/07	0,80	-	0,79	-	0,001	
33 kHz	2019*	0.88	0.85	0.85	0.74	0.82	Este trabalho
	jan/fev/20						

\*Referência tabela 9.

Soares [2019] conclui que a mesma faixa de densidade 1150 a 1200 kg/m<sup>3</sup> obteve a melhor correlação com os levantamentos da baixa frequência 38 kHz. O autor discute que esta frequência mostrou uma aproximação razoável à profundidade real da camada de LF, identificada pelo densímetro. Caso a integração de métodos diretos e indiretos seja aplicada para identificação da profundidade náutica neste local, uma densidade crítica de 1150 a 1200 kg/m<sup>3</sup> associada a uma tensão de escoamento crítica de 50 Pa significaria aumentar o potencial navegável de alguns centímetros a 0.95m ao longo do canal de navegação. Entretanto, o autor considera que a tensão de escoamento crítica de 100 Pa está associada a

densidade de  $1240 \text{ kg/m}^3$  e poderiam ser utilizadas, aumentando ainda mais a segurança da profundidade náutica.

De maneira geral, os dados de Pion [2017] mostram que os melhores valores de  $R^2$  foram encontrados na correlação entre as profundidades obtidas com a baixa frequência 33 kHz e a profundidade das densidades de  $1150 \text{ kg/m}^3$  e  $1200 \text{ kg/m}^3$ , sendo estes os valores que mais devem se aproximar da densidade de referência para definição do fundo náutico para a região do Complexo Portuário de Itajaí. O autor afirma que a variação observada nos valores ideais de massa específica crítica era esperada, uma vez que as características da lama se alteram por efeito de sazonalidade e em função da dragagem por injeção de água. A área da bacia de evolução do Complexo Portuário do Itajaí é sujeita à dragagem para manutenção de cotas por injeção de água e não se dispõe de uma cronologia exata da execução deste procedimento, apenas uma estimativa global de volume removido da área de estudo. Deste modo, as intervenções da draga podem ter impacto nas conclusões apresentadas. Além disso, quanto à análise de perfis densimétricos em correlação com as cotas da ecossondagem de baixa frequência, é importante destacar que os perfis densimétricos foram coletados em datas diferentes às datas em que foram realizadas as batimetrias, podendo causar imprecisões nos resultados.

Pion [2007] destaca a variabilidade do sinal de 33 kHz de acordo com o mês do ano. Em abril de 2007 os valores de  $R^2$  se aproximam de 0, indicam a desconexão entre os dados do densímetro e os dados batimétricos, ressaltando a necessidade de utilização simultânea dos dois equipamentos. Nos levantamentos realizados em maio e novembro de 2007, foram encontradas regiões em que a camada de LF superou 2.5m. Em maio a densidade identificada foi de  $1250 \text{ kg/m}^3$  ( $R^2=0.76$ ) e em novembro  $1150 \text{ kg/m}^3$  ( $R^2=0.80$ ), tendo baixa correlação com a densidade  $1250 \text{ kg/m}^3$  ( $R^2=0.01$ ). Nos levantamentos realizados nos meses de março e julho, a camada de LF não apresentou espessura superior a 0,5m na maior parte da região de interesse. Em julho de 2007 a baixa frequência 33 kHz mapeou com melhor correlação a densidade de  $1150 \text{ kg/m}^3$  ( $R^2=0.54$ ). O autor atribuiu a variabilidade dos dados de junho à injeção de água decorrente do processo de dragagem, realizada nos espaços náuticos do Complexo Portuário de Itajaí, estimada em dois milhões de metros cúbicos para o ano de 2007 e ocorrida neste período.

As correlações apresentadas para a Praia do Cassino são fortes (próximas a 1) no intervalo de densidades 1150 a 1200 kg/m<sup>3</sup>. Como esta área de estudo é mais exposta que as demais e sujeita a alterações meteo-oceanográficas bruscas, é possível que existam padrões claros que não foram observados devido à união de todos os dados. Assim, se levanta o questionamento de, caso a determinação das faixas de densidade fosse realizada em um intervalo mensal, talvez fosse possível identificar o padrão sazonal da região.

Este trabalho demonstra o potencial de expansão de conhecimento que a união entre a ecosonda de dupla frequência e o densímetro possibilitam em relação à pesquisa em LF. Em ambientes amplos como a antepraia da praia do Cassino, é essencialmente importante utilizar os métodos indiretos, de forma a agilizar o mapeamento desta grande área. O densímetro assume um importante papel, amostrando a estrutura vertical do pacote de LF. Sem este instrumento não entenderemos a relação da transição reológica do pacote lamoso com o sinal acústico.

A utilização de testemunhos *in situ* com a intenção de compreender como a espessura e o teor de areia presentes nas lentes de areia influenciam o retorno do sinal acústico e a penetração do densímetro, assim como qual o teor limite que os equipamentos são capazes de permitir. Esta pesquisa é especificamente importante para definir se o limite inferior da camada real de LF coincide com os limites inferiores detectados por este trabalho.

De maneira geral, é indicado continuar o monitoramento da camada de LF com as duas metodologias para iniciarmos também a compreensão do padrão sazonal associado a camada de LF, aumentar a robustez dos dados e amostrar lamas com diferentes históricos pretéritos, tendo em vista que a LF possui propriedade tixotrópica. Posteriormente, acompanhar e esquematizar o ciclo da LF, desde sua formação, deposição junto ao fundo, processo de consolidação e finalmente, sua remobilização são tópicos que valem a pena ser estudados devido sua extrema importância. A realização de monitoramentos mais frequentes e, especialmente durante períodos que antecedem e englobam todo o espaço temporal das dragagens realizadas no canal de acesso ao porto de Rio Grande podem fornecer dados únicos e que, associados as condições oceanográficas da área nos permitem avançar no conhecimento destes depósitos.

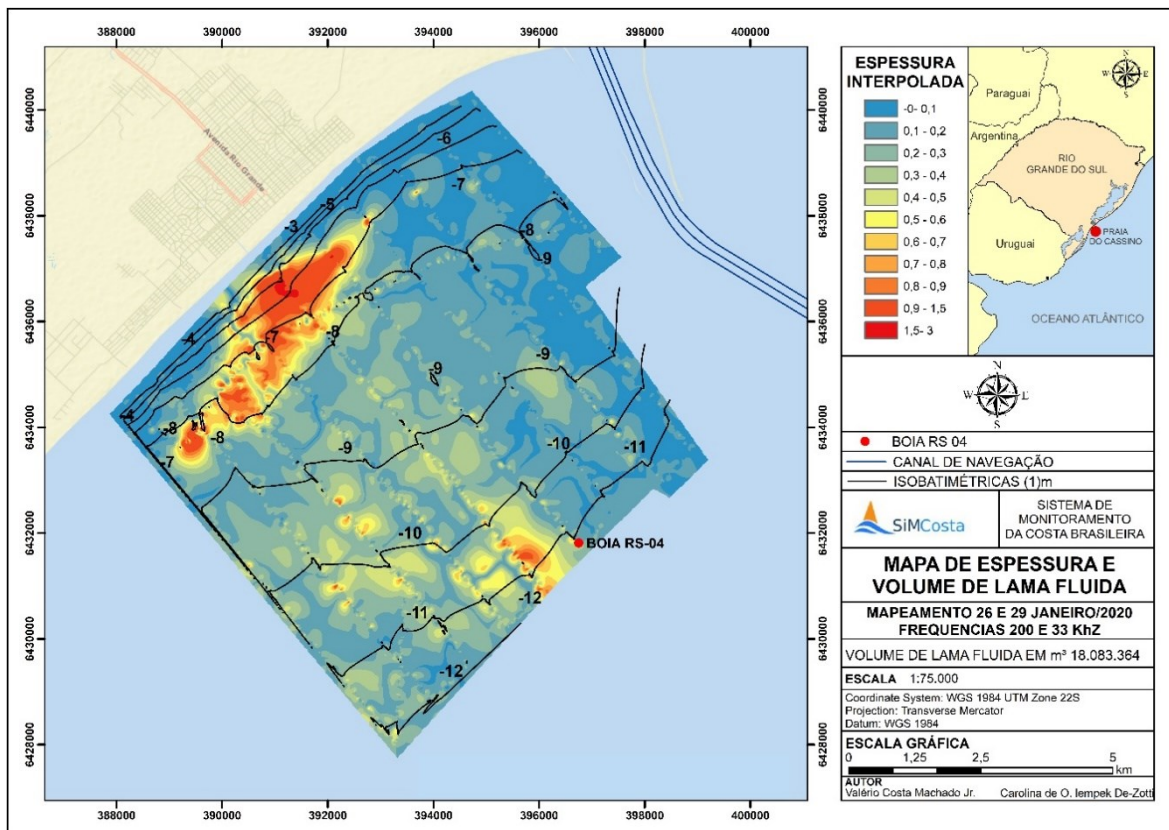
Dentro deste monitoramento contínuo é importante integrar novos instrumentos a fim de aprimorar e responder os incessantes novos questionamentos. A questão do teor e

espessura de areia é um questionamento prático e metodológico que deve ser inicialmente respondido. Neste trabalho, o foco maior ocorreu em uma parcela de LF de densidade superior a  $1080 \text{ kg/m}^3$ , desta forma, se deve considerar acoplar um turbidímetro capaz de medir a concentração do material em suspensão próximo a profundidade refletida pela alta frequência 200 kHz em cada monitoramento. Compreender como ocorre a dinâmica do material em suspensão e da camada superior de LF permite caracterizar os gradientes de densidade que ocorrem próximos a lutoclina, identificar a camada de suspensão diluída e adentrar nas questões de agregação e floculação.

Portanto, não será possível compreender como a dinâmica oceanográfica da região influencia a camada de LF se, anteriormente, não explorarmos como ocorre a transição da coluna d'água para a agregação dos flocos de LF que formam as camadas mais consolidadas. Estas são perspectivas de pesquisas futuras que contribuirão com questionamentos maiores: Qual a fonte da LF? Existe migração da camada de LF? A ação das ondas é capaz de fluidizar estes depósitos? Como efetivamente ocorre a evolução de um depósito de LF em um ambiente dominado por ondas?

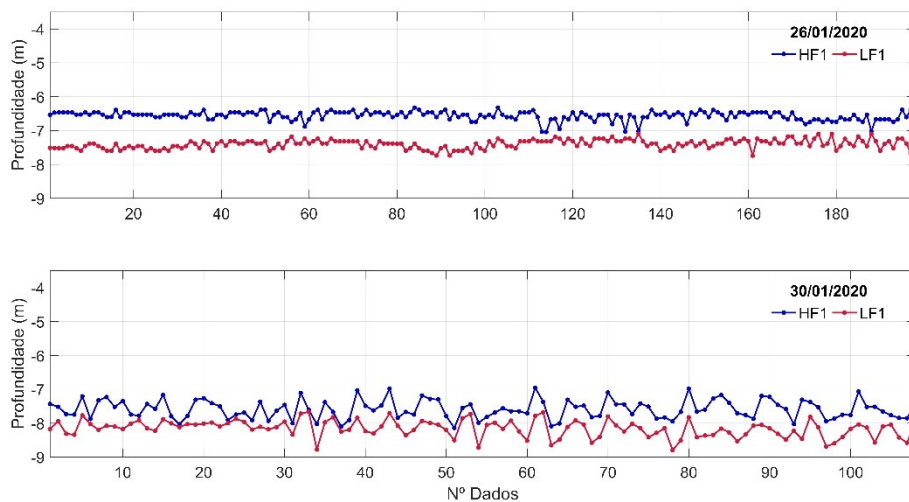
## **7.2. Considerações Gerais**

Este tópico tem como objetivo explorar questões relacionadas ao conhecimento empírico adquirido. O monitoramento revelou que os depósitos normalmente estão dispostos sob a forma de manchas, possuem espessura e diâmetro variáveis (Fig. 29) e apresentam alta dinamicidade, como será discutido a frente. O conhecimento adquirido neste monitoramento elucidou a tendência de acúmulo de maiores espessuras, nas cavas dos bancos arenosos entre as profundidades de 6 a 8m, e uma predisposição a zona central a sul da área de estudo (Fig. 29). A figura 29 é um exemplo do mapeamento da espessura de LF, interpolada baseado nos dados coletados nos dias 26/01/2020 e 30/01/2020 com a ecossonda de dupla frequência 200 kHz e 33 kHz e o densímetro. Neste mapa é possível perceber uma grande mancha de LF com espessuras da ordem de 0.9 a 1.5m, indicado pelos tons avermelhados, entre as profundidades de 4 e 8m. Futuramente, é importante amostrar diariamente ou várias vezes ao dia um mesmo depósito de LF para observar seu comportamento.



**Figura 29:** Mapa de espessura de LF para a antepraia da praia do Cassino com dados dos mapeamentos realizados dias 26/01/2020 e 30/01/2020. Fonte: própria.

Além do levantamento da área, o monitoramento realizado no dia 26 de janeiro de 2020 estabeleceria o local de coleta de água e sedimentos para calibração do densímetro, portanto os arredores do “ponto 04” foi o escolhido como local de coleta futura (391589.887E 6436177.077S). O quadro superior da figura 30 demonstra a espessura de LF nesta data enquanto o quadro inferior mostra a espessura de LF para a data na coleta de sedimento para calibração do densímetro (dia 30/01).

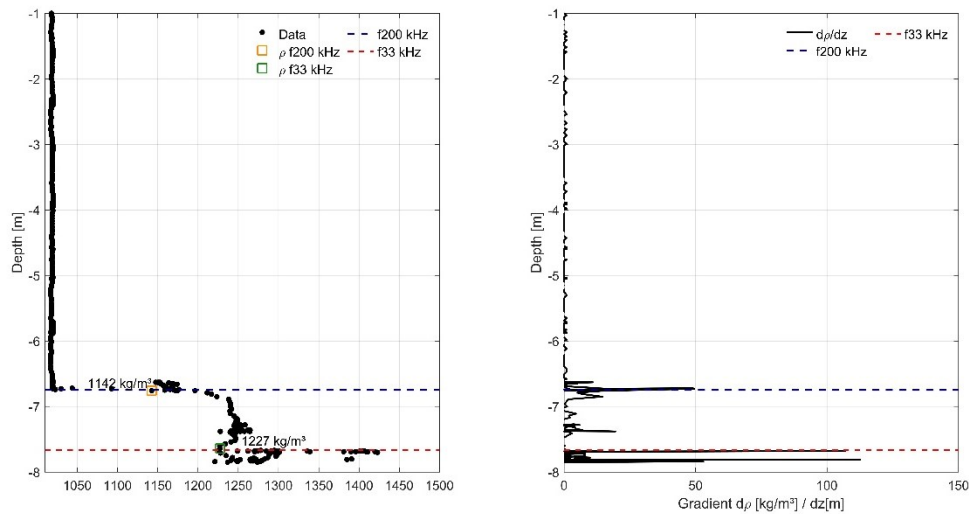


**Figura 30:** Espessura da camada de LF obtida pela ecossonda de dupla frequência 200 kHz e 33 kHz no “Ponto 04” amostrado no dia 26 de janeiro de 2020 e no dia 30 de janeiro de 2020. A linha azul representa o sinal refletido na alta frequência 200 kHz e a linha vermelha representa a baixa frequência 33 kHz.

A figura 31 mostra o perfil e gradiente de densidade associado ao “Ponto 04”. No primeiro quadro (esquerda) é possível observar nos pontos pretos o perfil de densidade amostrado pelo densímetro, apresentando uma espessura de LF de 1m aproximadamente. A linha tracejada em azul corresponde a profundidade de reflexão da alta frequência 200 kHz. O quadrado laranja corresponde ao ponto de densidade 1142 kg/m<sup>3</sup>, cuja profundidade corresponde à profundidade de reflexão da alta frequência. A linha tracejada vermelha está associada a profundidade de reflexão da baixa frequência 33 kHz. O quadrado verde possui densidade 1227 kg/m<sup>3</sup> e possui a mesma profundidade que a profundidade de reflexão do sinal de baixa frequência. O segundo quadro (direita) identifica o gradiente de densidade associado ao perfil, identificando também as profundidades de reflexão da ecossonda de dupla frequência.

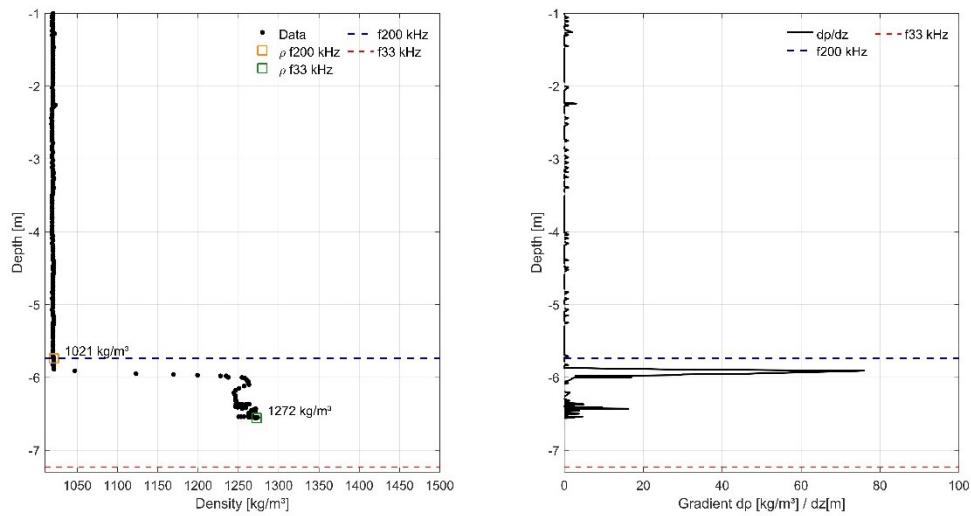
É possível observar que ambas frequências refletem em grandes gradientes de densidade. A alta frequência 200 kHz encontra o gradiente de 50 kg/m<sup>3</sup>/m que caracteriza a lutoclina e é refletida. A baixa frequência 33 kHz encontra um gradiente maior, de 100 kg/m<sup>3</sup>/m e é refletida. Logo abaixo do ponto de reflexão, o densímetro foi capaz de detectar outro gradiente bem marcado e levemente superior ao anterior (106 kg/m<sup>3</sup>/m) antes de detectar o final do pacote de LF.





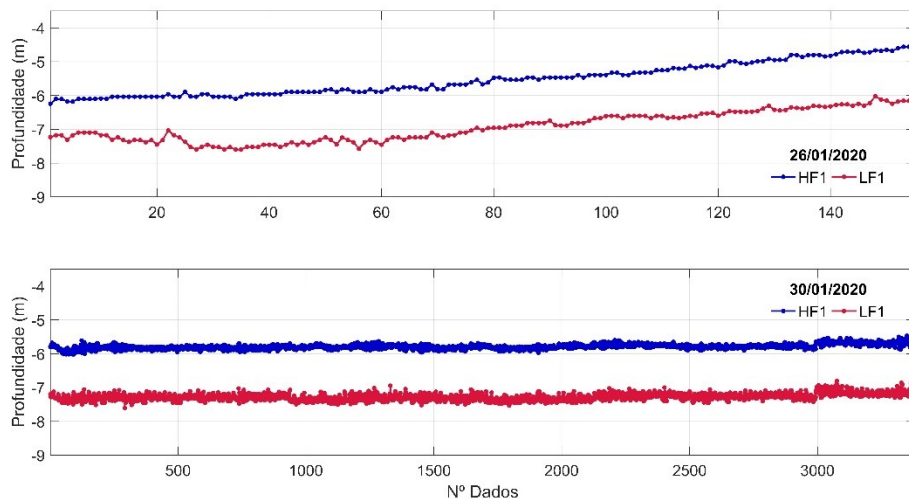
**Figura 31:** Perfil de densidade (esquerda) e gradiente de densidade (direita) do ponto de coleta "Ponto 04" amostrado dia 26/01/2020. A linha tracejada em azul corresponde a profundidade de reflexão da alta frequência 200 kHz no ponto laranja de densidade 1142 kg/m<sup>3</sup>. A linha tracejada vermelha está associada a profundidade de reflexão da baixa frequência 33 kHz, refletida na densidade 1227 kg/m<sup>3</sup>.

Entretanto, no dia 30 de janeiro de 2020, ao retornarmos ao local para coleta do material, encontramos redução de cerca de 0.5m na espessura de LF em apenas 4 dias (Fig. 30, quadro inferior). Em campo, procuramos um local próximo que possuísse maior espessura de LF e encontramos o local cujo perfil de densidade está exposto na figura 32 (391191.457E 6436758.496S). Analisando o perfil de densidade, se percebe que a ecossonda de dupla frequência penetrou muito mais no pacote de LF que o densímetro. Entretanto o equipamento, ao descer, encontrava um obstáculo e tombava, indicando que havia encontrado o fundo. Desta forma, se pode entender que, próximo da densidade de 1272 kg/m<sup>3</sup>, havia um obstáculo ou transição reológica que o densímetro não foi capaz de penetrar. O perfil foi repetido outras duas vezes e o mesmo ocorreu. A alta frequência 200 kHz refletiu em uma densidade baixa 1021 kg/m<sup>3</sup> porém próxima do gradiente de 80 kg/m<sup>3</sup>/m representante da lutoclina. Observando o quadro da direita, existem outros gradientes menores que 20/kg/m<sup>3</sup>/m, que não são fortes o suficiente para refletir a baixa frequência 33 kHz.



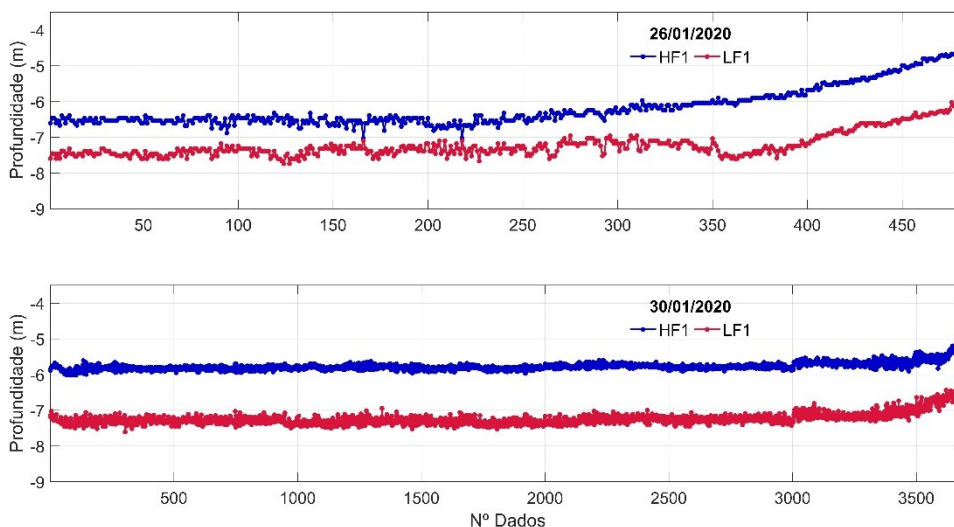
**Figura 32:** Perfil de densidade (esquerda) e gradiente de densidade (direita) do ponto de coleta para calibração do densímetro, amostrado dia 30/01/2020. A linha tracejada em azul corresponde a profundidade de reflexão da alta frequência 200 kHz no ponto laranja de densidade 1021 kg/m<sup>3</sup>. A linha tracejada vermelha está associada a profundidade de reflexão da baixa frequência 33 kHz, refletida na densidade 1272 kg/m<sup>3</sup>.

A figura 33 apresenta a espessura identificada pela ecossonda de dupla frequência no mesmo local. O quadro superior mostra o pacote com aproximadamente 1m de espessura na data 26/01/2020. O quadro inferior mostra sua evolução no dia 30/01/2020. No entanto, a profundidade se mantém na mesma cota, indicando alteração no perfil praiar.



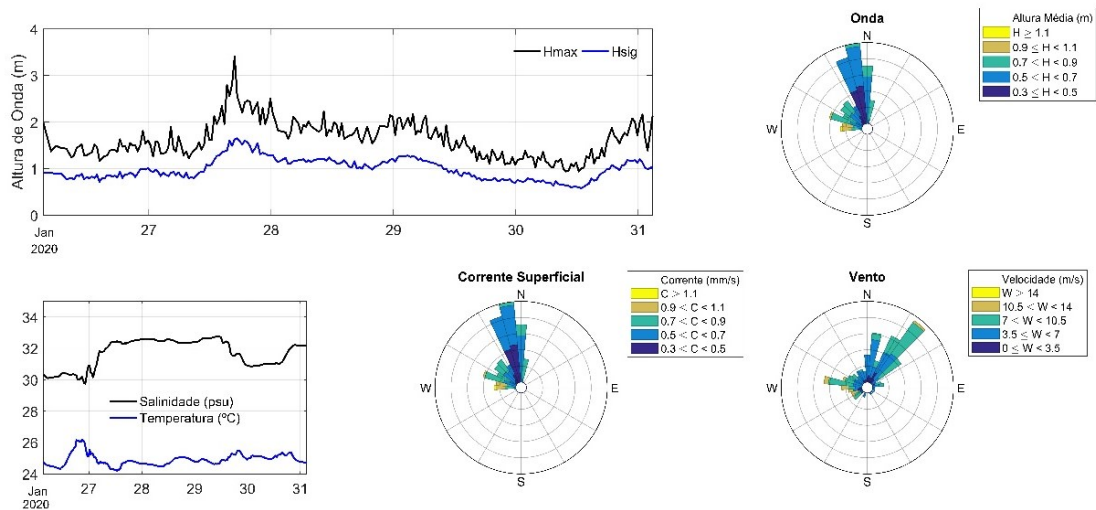
**Figura 33:** Espessura da camada de LF no ponto de calibração do densímetro, amostrado no dia 26 de janeiro de 2020 e no dia 30 de janeiro de 2020. A linha azul representa o sinal refletido na alta frequência 200 kHz e a linha vermelha representa a baixa frequência 33 kHz.

A figura 34 mostra o trecho de sondagem de dupla frequência entre a coordenada do “Ponto 04” (coletado 26/01) e a coordenada do ponto amostrado para calibração do densímetro (30/01) em ambos levantamentos. É possível observar consistência de 1m de espessura em ambos quadros.



**Figura 34:** Espessura da camada de LF entre as coordenadas do “Ponto 04”, amostrado dia 26/01/2020, e o ponto de calibração do densímetro, amostrado no dia 30/01/2020. A linha azul representa o sinal refletido na alta frequência 200 kHz e a linha vermelha representa a baixa frequência 33 kHz.

A figura 35 apresenta um resumo das condições meteo-oceanográficas na boia RS-04 para o período de 26 a 31 de janeiro de 2020, tidas como normais para a estação de verão na região. Na manhã do dia 27/01/2020, o vento nordeste soprava com intensidade menor que 10 m/s muda de direção no sentido anti-horário para sudoeste, passando para intensidade média de 10.7m/s. A altura significativa de onda aumenta para 1.23m e, às 17h atinge sua altura máxima de 3.41m. Até a meia noite deste dia a altura significativa de onda aumenta para 1.43m e a velocidade do vento diminui para 8.3m/s. O vento muda sua direção para sudeste na manhã do dia 28/01 e perde intensidade (6.2m/s). A altura significativa de onda diminui gradativamente ao longo do dia e no dia 29/01, a altura significativa de onda é inferior a 1m e o vento é nordeste com intensidade menor que 4 m/s. No dia 30/01 é realizada a coleta do material com condições calmas de vento e mar.



**Figura 35:** Condições meteo-oceanográficas para o período de 26 a 30 de janeiro de 2020. Dados retirados da boia RS-04 (SIMCOSTA).

Assim, a diferença, em apenas 4 dias, na espessura do depósito de LF se relaciona com a alteração no padrão de ventos no sentido anti-horário, sendo desencadeado pelo vento sudoeste que, soprando por menos de 24h, provocou aumento da altura de onda ( $H_{\max} = 3.41\text{m}$ ). Integrar os registros meteo-oceanográficos permitirá compreender quais parâmetros possuem maior influência na variabilidade espacial da estrutura vertical da camada de LF.

### 7.3. Conclusões

De forma geral, aliada ao densímetro, a ecossonda de dupla frequência 200 kHz e 33 kHz possui melhor desempenho. A ecossonda de dupla frequência 200 kHz e 50 kHz pode ser utilizada junto a um sensor de turbidez a fim de explorar se esta é capaz de delimitar uma lutoclina bem definida nos levantamentos subsequentes. Explorar o teor e espessura de areia capazes de barrar o sinal acústico da dupla frequência seria de extrema valia, tendo em vista a riqueza de areia fina disponível no local e a conhecida dinâmica das “lentes de areia” que se formam intercaladas ao depósito de LF.

A fim de diminuir os erros associados ao monitoramento, recursos adicionais podem ser incluídos, como por exemplo, sensores de movimento (MRU). Estudar a velocidade de propagação do sinal acústico no sedimento lamoso presente no local e ter dados precisos da variação da maré na antepraia e momento da coleta de dados são recursos que não foram considerados neste trabalho, entretanto são valiosos para tornar a detecção mais rigorosa.

Este ambiente é subordinado a eventos meteorológicos de grandes magnitudes, com uma dinamicidade de horas e tão diferente dos outros locais onde o acúmulo de LF ocorre e é estudado. Monitorar frequentemente o depósito de LF presente na antepraia da Praia do Cassino é de extrema importância e o ponto de partida para sua compreensão. Os depósitos de LF se desenvolvem em forma de manchas, são intermitentes, possuem espessura e diâmetro variáveis e tendência de acúmulo nas cavas dos bancos arenosos, principalmente entre as profundidades de 6 a 8m e entre a região central e sul do Balneário. Devido a essas peculiaridades, outras estratégias precisam ser desenvolvidas, com o objetivo de criar um protocolo específico para aprofundar o conhecimento (sobre as propriedades reológicas da LF) sem ignorar sua interação entre as variáveis, integrando o conhecimento oceanográfico com os parâmetros da LF.

O depósito de LF presente na antepraia da Praia de Cassino foi identificado com sucesso integrando diferentes métodos. Foi possível relacionar a estrutura vertical de densidade do depósito de LF aos horizontes identificados pela geofísica rasa de diferentes frequências. A faixa de densidade melhor identificada pela frequência de 200 kHz é de 1080 a 1100 kg/m<sup>3</sup>. Em relação à baixa frequência de 33 kHz, a faixa de densidade identificada com menores erros é de 1225 a 1250 kg/m<sup>3</sup>. A baixa frequência de 50 kHz deve ser utilizada com ressalvas neste ambiente. Sendo assim, este trabalho demonstrou que existe confiabilidade no dado obtido a partir da integração de metodologias diretas e indiretas. A utilização do densímetro é essencial nesta etapa da pesquisa pois proporciona a amostragem da estrutura vertical de densidade *in situ*, ampliando o conhecimento dos depósitos de FM deste ambiente tão distinto e dinâmico.

## Capítulo VIII: Referências Bibliográficas

Allen GP, Sauzay G, Castaing P (1977) Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde estuary, France. In *Estuarine processes* (pp. 63-81). Academic press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-751802-2.50013-8>

Allison MA, Lee MT, Ogston AS, Aller RC (2000) Origin of Amazon mudbanks along the northeastern coast of South America. *Mar. Geol.* 163:241-256 [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(99\)00120-6](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(99)00120-6)

Allwright D (2002) The vibrating tuning fork fluid density tool. Study Group Report, Smith Institute, London.

Anthony EJ, Gardel A, Gratiot N, Proisy C, Allison MA, Dolique F, Fromard F (2010) The Amazon-influenced muddy coast of South America: A review of mud-bank-shoreline interactions. *Earth Sci Rev* 103:99-121 doi:10.1016/j.earscirev.2010.09.008

Anthony EJ, Gardel A, Gratiot N (2014) Fluvial sediment supply, mud banks, cheniers and the morphodynamics of the coast of South America between the Amazon and Orinoco river mouths. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 388(1), 533-560 <https://doi.org/10.1144/SP388.8>

Arejano TB (1999) Análise do Regime de Ventos e Determinação do Potencial de Deriva de Areia no Extremo Sul do Litoral do Rio Grande do Sul - Brasil. Dissertação de Mestrado em Geociências, UFRGS, Porto Alegre, R.S., Brasil.

ATT (2005) In: Admiralty Tide Tables, vol. 1. UK Hydrographic Office, Taunton, UK, 354 pp

Azhikodan G, Yokoyama K (2018) Sediment transport and fluid mud layer formation in the macro-tidal Chikugo river estuary during a fortnightly tidal cycle. *Estuar Coast Shelf Sci* 202:232-245. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.01.002>

Barnes HA, Hutton JF, Walters K (1989) An introduction to rheology. Elsevier.

Bastos AC., Loureiro DV, Paixão SP (2009) Utilização de Métodos Geofísicos para Mapeamento de Lama Fluida no Porto de Tubarão, Vitória, Espírito Santo, Brasil. Anais do 11º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Salvador, Brasil, 634-636.

Beardsley RC, Candela J, Limeburner R (1995) The M2 Tide on the Amazon Shelf. *Journal of Geophysical Research* 100(100):2283-2319.

Beck MW, Heck Jr KL, Able KW, Childers DL, Eggleston DB, Gillanders BM, Halpern B, Hays CG, Hoshino K, Minello TJ, Orth RJ, Sheridan PF, Weinstein MP (2001) The identification, conservation, and management of estuarine and marine nurseries for fish and invertebrates. *BioScience* 51 (8), 633-641.

Bianchi TS (2013) Estuarine Chemistry. In: Day JW, Kemp WM, Yáñez-Arancibia A, Crump BC (Eds.). *Estuarine Ecology* (2<sup>nd</sup> ed., pp 39–85). London, United Kingdom: Wiley-Blackwell.

Borzzone CA, Griep GH (1991) Características do Sedimento Superficial Infralitoral da Região Costeira Adjacente à Desembocadura da Lagoa dos Patos, RS, Brasil. *Pesquisas*, 18(1): 71-78.

Bouysse P, Kudrass HR, Le Lann F (1977) Reconnaissance sedimentologique du plateau continental de la Guyane française (mission Guyamer 1975). *Bull. B.R.G.M IV* (2), 141-179.

Buchanan L (2005) Difficulties of surveying in fluid mud, the effects of bathymetry of suspended sediments in the water column. *Hydro-International*, Volume 9, Number 6.

Calliari LJ, Fachin S (1993) Laguna dos Patos. Influência nos Depósitos Lamíticos Costeiros. *Pesquisas em Geociências*, 20:57-69.

Calliari LJ, Klein AHF (1993) Características Morfodinâmicas e Sedimentológicas das Praias Oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. *Pesquisas*, 20(1):48-56.

Calliari LJ, Griep MF (1999) Uma análise histórica dos efeitos produzidos por modificações antrópicas no estuário da Lagoa dos Patos – Natural versus Provocado. In: FLORES, F.F.(ed). *Por uma história multidisciplinar do Rio Grande*. Edigraf FURG, Brasil. 97-105.

Calliari LJ, Speranski NS, Torronteguy M, Oliveira MB (2000) The mud banks of Cassino beach, Southern Brazil: characteristics, processes and effects. *J Coast Res* 29:1–9

Calliari LJ, Holland KT, Pereira PS et al (2007) The influence of mud on the inner shelf, shoreface, beach, and surfzone morphodynamics — Cassino, Southern Brazil. In: *Coastal Sediments '07*. American Society of Civil Engineers, Reston, pp 1455–1465

Calliari LJ, Winterwerp JC, Fernandes, EH, Cuchiara D, Vinzon SB, Sperle M, Holland KT (2009) Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon - Cassino beach sedimentary system *Continental Shelf Research* 29(3): 515-529.

Calliari LJ, Machado AA, Marroig P, Vinzón SB, Gianuca N (2020) Mud deposits at Cassino beach: role of dredging. *Geo-Mar Lett* 40:1031-1043. <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00619-6>

Carneiro JC, Fonseca DL, Vinzón SB, Gallo MN (2017) Strategies for measuring fluid mud layers and their rheological properties in ports. *J Waterw Port Coast Ocean Eng ASCE* 143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000396](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000396)

Carneiro JC (2018) Estudo das camadas de lama fluida em portos e canais de navegação. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Oceânica) COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Carneiro JC, Gallo MN, Vinzón SB (2020). Detection of fluid mud layers using tuning fork, dual-frequency echo sounder, and chirp sub-bottom measurements. *Ocean Dyn*, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01346-8>

Chhabra, R. P. (2010) Non-Newtonian fluids: an introduction. In *Rheology of complex fluids* (pp. 3-34). Springer, New York, NY.

Clay CS, Medwin H (1977) *Acoustical Oceanography: Principles and Applications*, John Wiley and Sons, New York. *Journal of Sound and Vibration*, Volume 60, Issue 4, p. 615-616.



Clayes S (2006) Evaluation and combination of techniques used to determine the Nautical Bottom - A call for rheology based instruments. Evolutions in hydrography. Antuerpia, Belgium. p. 141-144

Coastal Engineering Studies (2007) Townsville Ocean Terminal Project. City Pacific Limited.

Colleoni A (2016) Mapeamento do Bolsão de Lama na Praia do Cassino, RS, Brasil. Monografia (Graduação em Oceanologia) Universidade Federal de Rio Grande.

Cowell PJ, Hanslow DJ, Meleo JF (1999) The shoreface, in: Short, A.D. (Ed.), Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. Wiley, Chichester, p. 379.

Cuchiara DC (2008) Modelagem Numérica do Comportamento das Ondas no Sul do Brasil e suas Interações com os Depósitos Lamíticos na Praia do Cassino. Tese (Doutorado em Oceanografia Física, Química e Geológica), Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil. 255p

Davies JL (1980) Geographical Variation in Coastal Development. Longman, Londres. 212 p.

Day JH (1981) Summaries of current knowledge of 43 estuaries in southern Africa. (pp 251–330). In: Day JH (Ed.), Estuarine Ecology with particular reference to Southern Africa. Cape Town, South Africa: AA Balkema.

Delaney PJV (1962) Considerações sobre a fisiografia e a geologia da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Escola de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Avulso no. 2, p. 07-31.

De-Zotti, COL (2018) Quantificação de sedimentos de um depósito de lama fluida através de métodos geofísicos. Monografia (Graduação em Oceanologia) Universidade Federal do Rio Grande.

Diaferia G, Kruiver PP, Vermaas T (2013) Validation study of SILAS, Final report, Deltares, Delft the Netherlands, 1207624-000-BGS- 0006

Dyer KR (1986) Coastal and Estuarine Sediment Dynamics. New York John Wiley and Sons Ltd 342 p.

Eisma D, Augustinus PGEF, Alexander C (1991) Recent and subrecent changes in the dispersal of Amazon mud. Neth. J. Sea Res. 28(3): 181-192.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2010) Chapter 6 Dredging in Fishing harbour planning, construction and management. ISBN 978-92-5-106696-6, 65-86p.

Ferket B, Heredia Gomez M, Rocabado I, De Sutter R, Van Hoestenbergh T, Kwee J, Werner C, Verwilligen J, Vos S, Vantorre M, Nair P, Lamba P, Sharma S, Marthi S, Manso F (2017) Assessment of siltation processes and implementation of nautical depth in the Port of Cochin, India. In CEDA Dredging Days (pp. 1-13).

de Figueiredo SA, Goulart ES, Calliari LJ (2019) Effects of closure depth changes on coastal response to sea level rise: Insights from model experiments in southern Brazil, *Geomorphology*, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106935>

Folk RL, Ward WC (1957) Brazos river bar: a study of significant of grain size parameters. *J Sed Petrology*, v. 27, n. 1, p. 3-26.

Fonseca DL, Cunha PM, Carneiro J, Gallo M, Vinzón SB (2018) Assessing rheological properties of fluid mud samples through tuning fork data. *Ocean Dyn.* 69:51-57. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1226-9>

Fontein WF, Byrd RW (2007) The nautical depth approach, a review for implementation. In: WODCON XVIII ANNUAL DREDGING SEMINAR. WEDA

Franz G, Pinto L, Ascione I, Mateus M, Fernandes R, Leitão P, Neves R (2014) Modelling of cohesive sediment dynamics in tidal estuarine systems: Case study of Tagus estuary, Portugal. *Estuar Coast Shelf Sci* 151:34-44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2014.09.017>

Garcia CAE (1997) Environment and Biota of the Patos Lagoon estuary. Tides and Currents. In: Seeliger, U.; Odebrecht, C.; Castello, J. P. eds. *Subtropical Convergence Environments: the coast and sea in the southwestern Atlantic*. Berlin. Springer-Verlag. p.18.

Garcia FAP (2020). Relatório dos sensores das dragas durante as atividades de dragagem em Rio Grande (RS) – 2018 a 2020. Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira, 158 p.

Garcia FAP, Evangelista H, Möller OO (2021) Comments on “Dredging in an estuary causes contamination by fluid mud on a tourist ocean beach. Evidence via REE ratios” by N. Mirlean, L. Calliari, and K. Johannesson in *Marine Pollution Bulletin* 159 (2020) 111495. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111495>

Gensac E, Gardel A, Lesourd S, Brutier L (2015) Morphodynamic evolution of an intertidal mudflat under the influence of Amazon sediment supply–Kourou mud bank, French Guiana, South America. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 158:53-62. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.03.017>

Grabemann I, Uncles RJ, Krause G, Stephens JA (1997) Behaviour of turbidity maxima in the Tamar (U.K.) and Weser (F.R.G.) estuaries. *Estuarine Coastal Shelf Sci* 45:235–246

Granboulan J, Feral A, Villerot M, Jouanneau JM (1989) Study of the sedimentological and rheological properties of fluid mud in the fluvio-estuarine system of the Gironde estuary. *Ocean Shore Manage.* 12(1), 23–46. [https://doi.org/10.1016/0951-8312\(89\)90041-6](https://doi.org/10.1016/0951-8312(89)90041-6)

Groposo V, Mosquera RL, Pedocchi F, Vinzón SB, Gallo M (2014) Mud density prospection using a tuning fork. *J Waterw Port Coast Ocean Eng* 141:04014047. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000289](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000289)

Guedes RMC, Calliari, LJ, Holland KT, Plant NG, Pereira PS, Alvez FNA (2011) Short-term sandbar variability based on video imagery: Comparison between Time-Average and Time-Variance techniques. *Mar Geo (Print)*, v. 289, p. 122-134, 2011

Harari J, de Camargo R (2003). Numerical simulation of the tidal propagation in the coastal region of Santos (Brazil, 24 S 46 W). *Cont Shelf Res*, 23(16), 1597-1613. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(03\)00143-2](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(03)00143-2)

Healy T, Wang Y, Healy J-A. (Eds.), 2002. *Muddy Coasts of the World: Processes, Deposits and Functions*. *Proceedings in Marine Science* nr. 4. Elsevier Science BV, Amsterdam, ISBN 0-444-51019-2 xiv±542 pp.

Heath KM (2009) Fluid mud formation in the Petitcodiac River, New Brunswick, Canada. *Dissertação de Mestrado*. Universidade de Boston. 131p.

Holland KT, Elmore PA (2008) A review of heterogeneous sediments in coastal environments. *Earth Sci. Rev.* 89, 116–134.

Holland TK, Vinzon SB, Calliari LJ (2009) A field study of coastal dynamics on a muddy coast offshore of Cassino Beach, Brazil. *Cont Shelf Res.* 29: 503–514. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.09.023>.

Hughes Clarke JE (2000) Present-day methods of depth measurements: Continental shelf limits, in Cook PK & Carleton CM, eds, *The scientific and legal interface*: Oxford University Press, p. 139-159.

IADC - Internacional Association of Dredging Companies (2014) Facts about trailing suction Hopper dredgers. <https://www.iadc-dredging.com/facts-about/trailing-suction-hopper-dredgers/>

James NC, Adams JB, Connel AD, Lmaberth SJ, MacKay CF, Snow GC, van Niekerk L, Whitfield AK (2020) High flow variability and storm events shape the ecology of the Mbashe Estuary, South Africa, *Afr J Aquat Sci* 45(1) 10.2989/16085914.2020.1733472

Jiang L, Zhao Z (1989) Viscous damping of solitary waves over fluid-mud seabeds. *J Waterw Port, Coast Ocean Eng*, 115 (3): 345- 362. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1989\)115:3\(345\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1989)115:3(345))

Johnson DP, Carter RM (1987 unpublished manuscript) Nature of Dredge Spoil Taken by Townsville Harbor Board. Dep. Geol., James Cook Univ.

Kineke GC, Sternberg RW, Trowbridge JH, Geyer WR (1996) Fluid-mud processes on the Amazon continental shelf. *Cont Shelf Res.* 16, 667–696. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(95\)00050-X](https://doi.org/10.1016/0278-4343(95)00050-X)

Kirby R, Parker W, Van Oostrum W (1980) Definition of the seabed in navigation routes through mud areas. *International Hydrographic Review*, Vol. XVII (1). pp. 107-117

Kirichek A, Chassagne C, Winterwerp H, Noordijk A, Rutgers R, Schot C, Nipius K, Vellinga T (2018) How Navigable are Fluid Mud Layers? *Terra Et Aqua.* 151.

Kirichek A, Shakeel A, & Chassagne,C (2020) Using in situ density and strength measurements for sediment maintenance in ports and waterways. *J Soils and Sediments*, 20:2546-2552. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02581-8>

Larson M, Kraus NC (1995) Prediction of cross-shore sediment transport at diferente spatial and temporal scale. *Mar. Geol.* 126, 111–217.

Lugo AE, Snedaker SC (1974) The ecology of mangroves. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 5:39-64.

Machado DM (2013) Um estudo sobre o clima de ondas e o transporte de lama ao largo da Praia do Cassino, RS. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro. 346p.

Madson J, Sommerfield CK (2003) Application of sidescan sonar, sub bottom profiling and echo sounding techniques to study sediment deposition and erosion in estuaries: Results from the lower Delaware River and upper Delaware Bay. *Proc., US Hydro Conf.*, 24–27

Marroig PC (2015) Detecção de lama fluida e potencial de mobilidade de sedimentos finos no estuário da Lagoa dos Patos – RS. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) COPPE Universidade Federal do Rio de Janeiro. 134p.

Martens C, Delgado R, Verhaeghe H, Verweast T, Willems M (2012). Improving the Nautical Access to Zeebrugge Harbor: A Multidisciplinary Study. International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2012), Santander, Espanha, 1-6 Julho 2012. 10.

Martins LR, Martins IR, Villwock JA, Calliari LJ (1978) Ocorrência de Lama na Praia do Cassino, (RS). Anais Hidrográfico, 35:159-170.

Matheu J, Baba M, Kurian NP (1995) Mud banks of the southwest coast of India 1. Wave characteristics. J Coast Res 11:168–178

McAnally WH, Mehta AJ (2002) Significance of Aggregation of Fine Sediment Particles in Their Deposition. Estuar Coast Shelf Sci, 54(4): 643-653. <https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0847>.

McAnally WH, Friedrichs C, Hamilton D, Hayter E, Shrestha P, Rodriguez H, Sheremet A, Teeter A, ASCE Task Committee on Management of Fluid Mud. (2007a) Management of fluid mud in estuaries, bays and lakes. I: Present state of understanding on character and behavior. J Hydraul Eng, 133:9-22. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:1\(9\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:1(9))

McAnally WH, Teeter A, Schoellhamer D, Friedrichs C, Hamilton D, Hayter E, Shrestha P, Rodriguez H, Sheremet A, Kirby R, ASCE Task Committee on Management of Fluid Mud. (2007b). Management of fluid mud in estuaries, bays, and lakes. II: Measurement, modeling, and management. J Hydraul Eng, 133(1):23-38. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:1\(23\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:1(23))

McAnally Wet al (2016) Nautical depth for U.S. navigable waterways: a review. J Waterw Port Coast Ocean Eng. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000301,04015014](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000301,04015014).

Mehta AJ (1991) Understanding fluid mud in a dynamic environment. Geo-Mar Lett 11:113-118. <https://doi.org/10.1007/BF02430995>.

Mehta AJ, Samsami F, Khare YP, Sahin C (2014) Fluid mud properties in nautical depth estimation. J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng, 140(2):210-222.

Menandro PS, Bastos AC, Quaresma VS, Vinzón SB (2015) Acoustic response of Amazon shelf muddy sediments. *Rev Bras Geofísica* 33(4)

Melo EF, Romeu MAR, Hammes GR (2010) Condições extremas de agitação marítima ao largo de Rio Grande a partir do modelo WW3. 4º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica.

Milliman JD, Meade RH (1983) World-wide delivery of river sediment to the oceans. *J. Geol.* 91:1-21.

Mirlean N, Calliari LJ, Johannesson K (2020) Dredging in an estuary causes contamination by fluid mud on a tourist ocean beach. Evidence via REE ratios. *Mar Pollut Bull*, 159, 111495. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111495>

Mirlean N, Calliari LJ, Johannesson K (2021) Reply to MPB-D-20-01629. Carlos Alberto Eiras Garcia Heitor Evangelista Osmar Olinto Moller " Jr. Comments on "Dredging in an estuary causes contamination by fluid mud on a tourist ocean beach. Evidence via REE ratios" by N. Mirlean, L. Calliari, and K. Johannesson in *Marine Pollution Bulletin* 159 (2020) 111495. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111495>. *Marine Pollution Bulletin* 165 (2021) 112161 <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112161>

Mont'Alverne R, Moraes LE, Rodrigues FL, Vieira JP (2012) Do mud deposition events on sandy beaches affect surf zone ichthyofauna? A southern Brazilian case study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 102-103:116-125.

Monteiro-Neto C, Cunha LPR, Musick JA (2003) Community structure of surf-zone fishes at Cassino beach, Rio Grande do sul, Brazil. *J Coast Res*, 35, 492-501

Möller OO, Castaing P, Salomon J-C, Lazure P (2001) The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuar* 24:297-311. <https://doi.org/10.2307/1352953>.

Möller OO, Fernandes E (2010) Hidrologia e hidrodinâmica. In: Seelinger U, Odebrecht C. *Estuário da Lagoa dos Patos: um século de transformações*. Editora da FURG, 180p.

Morand C, Haralampides KA (2006) Numerical modelling of tidal barrier modification alternatives: Petitcodiac river case study. *Can. Water Resour. J.*, 31, 123–132.

Motta VF (1969) Relatório-diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do acesso pela Barra do Rio Grande. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Inédito.

Muniz P, Danulat E, Yannicelli B, Garcia-Alonso J, Medinae G, Bicego M (2004) Assessment of contamination by heavy metals and petroleum hydrocarbons in sediments of Montevideo harbour (Uruguay). *Environ Int* 29:1019–1028

Nederlof L (1978) “Varen boven slib” in het Rotterdamse haven-en rivieren-gebied. *Gementewerken Rotterdam*. 98.21-R7332.

Neves RC, Quaresma VS, Bastos AC, da Silva JCR (2012) Sedimentary transport in coastal bays: case study of Vitória and Espírito Santo Bays – ES – Brazil. *Braz J Geop* 30(2):181-189

Newton J (2002) Part III – Chapter 5: Erosion, Transport and Deposition of Cohesive Sediments. In: *Coastal Sediment Process*. 67p. Disponível em 03/2017: [http://www.pdhonline.com/courses/c773/c773\\_new.htm](http://www.pdhonline.com/courses/c773/c773_new.htm)

Nichols MM, Biggs RB (1985) Estuaries. In: Davis RA Jr (ed) *Coastal sedimentary environments*. Springer, New York, pp 77–187.

Nicholls RJ, Birkemeier WA, Lee G (1998) Evaluation of depth of closure using data from Duck, NC, USA. *Mar. Geol.* 148, 179–201. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(98\)00011-5](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(98)00011-5)

Nicholls RJ, Magnus L, Capobianco M, Birkemeier WA (1999) Depth of Closure: Improving understanding and prediction. *Coast Eng*, 2888-2901.

Nogueira Mendes R, Ceia R, Silva T, Rilo A, Guerreiro M, Catalão J, Taborda R, Freitas MC, Andrade A, Melo R, Fortunato AB, Freire P (2012) Remote sensing and intertidal cartography. In: *Contribution of the MorFeed project. Actas das 2.as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, pp. 341-344.

Odebrecht C, Abreu PC, Fujita CC, Bergesch M (2003) The impact of mud deposition on the long term variability of the surf-zone diatom *Asterionellopsis glacialis* (Castracane) Round. *J Coast Res* 35: 493–498.

Odebrecht C, Bergesch M, Rörig LR, Abreu PC (2010) Phytoplankton interannual variability at Cassino beach, southern Brazil (1992-2007), with emphasis on the surf zone diatom *Asterionellopsis glacialis*. *Estuaries and Coasts* 33, 570-583

Odhambo BK, Stephen KB (2004) Integrated Echo Sounder, GPS, and GIS for Reservoir Sedimentation Studies: Examples from Two Arkansas Lakes. *J Am Water Resour AS*, 40(4): 981–997.

Oliveira UR, Simões RS, Porto FS, Caminha ES, Calliari LJ, Romeu MAR (2020). Analysis of the beach dynamic after fluid mud deposition on Cassino Beach (RS, Brazil) in 2014, using unmanned aerial vehicle. *Rev Bras Geomorfol*, v. 21, n. 3, <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1462>

Parise CK, Calliari LJ, Krusche N (2009) Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. *Braz J Ocean*, São Paulo, v. 57 (3). doi: 10.1590/S1679-87592009000300002.

Paz RS (1985) Fatores Meteorológicos e sua Influência Ecológica: Um Exemplo no Sistema Estuarial da Lagoa dos Patos, RS. *Anais III Encontro Brasileiro de Gerenciamento Costeiro*, Universidade Federal do Ceará, UFC, Fortaleza, p.301-311.

Pereira PS et al. (2002) A tempestade de Iemanjá, 01 de fevereiro de 2002, e a deposição de lama na Praia do Cassino. *Simpósio Brasileiro de Oceanografia*. Instituto Oceanográfico da Universidade Federal de São Paulo. Resumo em CD, arquivo ocgeo 03.

Pereira PS (2005) Variabilidade da Orla Oceânica do Rio Grande do Sul e suas Implicações na Elaboração de Planos de Contingência: Aspectos Morfodinâmicos, Sedimentológicos e Geomorfológicos. *Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica)*, Universidade do Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, 161p

Pereira PS, Calliari L, Holman R, Holland P, Guedes RMX, Amorim CK (2011) Video and field observations of wave attenuation in a muddy surf zone. *Mar.Geol.* 279, 210–221.

PIANC (2014) Harbour Approach Channels - Design Guidelines. *PIANC REPORT N° 121*.

Pianca CM, Pietro LF, Siegle E (2010) Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Braz J Ocean*. São Paulo, v.58 (1). doi:10.1590/S1679-87592010000100006.

Pion LM (2017) Lama fluida e fundo náutico-conceito e aplicação no Complexo Portuário de Itajaí, SC. *Dissertação de Mestrado*, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 10.11606/D.3.2017.tde-17072017-111803

Plumstead EE, Prinsloo JF, Schoonbee HJ (1989) A survey of the fish fauna of Transkei estuaries. Part Two: The Mbashe estuary. *South African Journal of Zoology* 24: 273–281



Porto, FS (2016) Variabilidade morfossedimentar do sistema praia duna ao largo do balneário Cassino – RS no período de 2006 a 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Ciências Humanas e da Informação. Universidade Federal do Rio Grande. 98p.

Quaresma VS, Bastos AC, Loureiro DV, Paixão S (2011) Utilização de métodos geofísicos para mapeamento de lama fluida no porto de tubarão, Vitória (ES-Brasil). *Revista Brasileira de Geofísica*, 29(3): 487-496.

Raj MP, Prakash TN (1989) Sediment distribution and transport studies of the inner shell zone off the central coast of Kerala, India. *J Coast Res* 5(2):271–280

Rine JM, Ginsburg RN (1985) Depositional facies of a mud shoreface in Suriname, South America: a mud analogue to sandy, shallow-marine deposits. *J. Sed. Petrol.* 55:633–652. <https://doi.org/10.1306/212F87A6-2B24-11D7-8648000102C1865D>

Rocha SMN (2010) Atenuação de Ondas Superficiais de Gravidade Sobre Fundos Lamosos: Estudo de Caso da Praia do Cassino, RS. (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Oceânica, 2009). Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

Rodrigues FL, Vieira JP (2010) Feeding strategy of *Menticirrhus americanus* and *Menticirrhus littoralis* (Perciformes: Sciaenidae) juveniles in a sandy beach surf zone of southern Brazil. *Zoologia* 27 (6), 873-880.

Ross MA, Mehta AJ (1989) On the mechanics of lutoclines and fluid mud. *Journal of Coastal Research*, SI5:51-62. <https://www.jstor.org/stable/25735365>

Sajeev R, Sankaranarayanan VN, Chandramohan P, Nampoodiripad KSN (1996) Seasonal changes of the sediments size distribution and stability along the beaches of Kerala, southwest coast of India. *Indian J Marine Sci* 25:216–220

Santoro P, Fossati M, Piedra-Cueva I (2013) Characterization of circulation patterns in Montevideo Bay (Uruguay). *J Coast Res* 29(4):819–835

Schettini CAF (2002) Caracterização física do Estuário do Rio Itajaí-açu, SC. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 7(1): 123-142.

Schettini CAF, Almeida DC, Siegle E, Alencar ACB (2010) A snapshot of suspended sediment and fluid mud occurrence in a mixed-energy embayment, Tijucas Bay, Brazil. *Geo-Marine Letters*, 30:47–62.

Schrottke K, Becker M, Bartholomä A, Flemming BW, Hebbeln D (2006) Fluid mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and

parametric sub-bottom profiler. *Geo-Marine Lett.* 26(3), 185–198. <https://doi.org/10.1007/s00367-006-0027-1>.

Schumann EH (2015) Keurbooms Estuary floods and sedimentation. *South African J Sci* 111: 1–9

Shakeel A, Kirichek A, Chassagne C (2019) Is density enough to predict the rheology of natural sediments? *Geo-Marine Lett* 39:427–434.

Shakeel A, Kirichek A, Chassagne C (2020) Rheological analysis of mud from port of Hamburg, Germany. *J Soils Sediments* 19:1–10. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02448-7>.

Shchepetkina A, Gingras MK, Pemberton GS (2017) Modern observations of floccule ripples: Petitcodiac River estuary, New Brunswick, Canada. *Sedimentology*, 65(2), 582–596. <https://doi.org/10.1111/sed.12393>

Short AD (1999) Beach hazards and safety. In: Short AD (ed) *Beach and shoreface morphodynamics*. Wiley, Chichester, pp 293–304

Short AD (2006) Australian beach systems – nature and distribution. *J Coast Res* 22:11–27

Soares AES (2019) *Geoacoustic methods in port áreas: a multifrequency approach*. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo. 73p.

Souza LAP (2006) *Revisão Crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas*. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Oceanografia Química e Geológica, IO, USP, SP. 311p.

Stech JL (1990) *Um Estudo Comparativo da Dinâmica da Circulação de Inverno entre as Plataformas Continentais das Costas Sudeste do Brasil e dos Estados Unidos Utilizando um Modelo Numérico*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Stech JL, Lorezonzzetti JA (1992) Response of the South Brazil Bight to the Passage of Wintertime Cold Fronts. *Journal of Geophysical Research*. 97: 9507-9520.

Teeter AM (1992) *Evaluation of new fluid mud survey system at field sites*. Dredging Research Technical Note DRP-92-5. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.

Telford WM, Geldard LP, Sherif RE, Keys DA (1990) Applied geophysics. First Edition. Cambridge. University Press. 860p.

Torres RJ (2000) Uma Análise Preliminar dos Processos de Dragagem do Porto de Rio Grande, RS. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, 190p

Tozzi HAM (1995) Morfodinâmica da Praia do Cassino, Rio Grande, RS. Monografia (Curso de Graduação em Oceanologia), Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil, 52p

Tozzi HAM, Calliari LJ (2000) Morfodinâmica da praia do Cassino, RS. Pesquisas em Geociências, 27: p. 29-42.

Tseng CM, Amouroux D, Abril G, Tessier E, Etcheber H, Donard FX (2001) Speciation of mercury in a fluid mud profile of a high turbid macrotidal estuary (Gironde, France). Environ Sci Technol 35(13):2627-2633. doi: 10.1021/es001750b

Uncles RJ, Stephens JA, Law DJ (2006) Turbidity maximum in the macrotidal, highly turbid Humber Estuary, UK: Flocs, fluid mud, stationary suspensions and tidal bores. Estuar Coast Shelf Sci 67:30-52. doi:10.1016/j.ecss.2005.10.013

USACE (US Army Corps of Engineers) et al (2002) Depth measurement over irregular or unconsolidated bottoms, engineering manual 1110– 2-1003, chapter 21. Department of the Army, Washington

USACE (2013) Depth measurement over irregular or unconsolidated bottoms. In Engineer Manual, Hydrographic Surveying, Ch. 21, EM 1110-2-1003. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.

Van Craenenbroeck K, Vantorre M, De Wolf P (1991) Navigation in muddy areas; Establishing the navigable depth in the port of Zeebrugge II, In: Proceeding of the CEDA-PIANC Conference Accessible Harbors, Amsterdam.

Van Rijn LC (2016) Fluid mud formation. Disponível em Março de 2017: <<http://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Fluidmudformation2016.pdf>>

Villwock JA (1972) Contribuição a Geologia do Holoceno da Província Costeira do RS-Brasil. Dissertação (Mestrado em Geociências) Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Villwock JA, Martins LRS (1972) Depósitos lamíticos de pós-praia, Cassino, RS. Pesquisas em Geociências.

Villwock JA, Tomazelli LJ (1995) Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. Notas Técnicas, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, UFRGS. Porto Alegre, 8:1-45

Villwock JA, Tomazelli LJ (2007) Planície Costeira do RS: Gênese e Paisagem Atual. Regiões da Lagoa do Casamento e dos Butiazais de Tapes, Planície Costeira do Rio Grande do Sul, 20

Vinzón SB, Winterwerp JC, Nogueira R, de Boer GJ (2009) Mud deposit formation on the open coast of the larger Patos Lagoon–Cassino Beach system. *Cont Shelf Res* 29:572–588. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2008.09.021>

Vinzón SB, Mehta AJ (2003) Lutoclines in high concentration estuaries: some observations at the Mouth of the Amazon, p. 243-253. *J Coast Res*, Vol. 19, No. 2. <https://www.jstor.org/stable/4299165>

Vinzón SB, Castro J, Carvalho V, Gallo M (2015) Definição da profundidade na presença de lama fluida: Porto de Santos. Congresso Internacional de Hidrossedimentologia

Vinzón SB, Gallo MN (2016) Navigation Channel at Amazon mouth: problems and perspectives. IX PIANC-COPEDEC, Rio de Janeiro.

Vlasblom WJ (2007) Chapter 2: Designing Dredging Equipment. CEDA Central Dredging Association 109p.

Wan Y, Roelvink D, Li W, Qi D, Gu F (2014). Observation and modeling of the storm-induced fluid mud dynamics in a muddy-estuarine navigational channel. *Geomorphology*, 217, 23-36.

Wells JT, Coleman JM (1978) Longshore transport of mud by waves: northeastern coast of South America. *Geol. Mijnb.* 57:353-359.

Wells JT, Coleman JM (1981) Physical processes and fine-grained sediment dynamics, coast of Surinam, South America. *J. Sed. Petrol.* 51:1053–1068.

Wentworth CK (1922) A Scale of grade and Class Terms for Clastic Sediments. *J Geol* 30: 377-392.

Wong Y-S, Tam NFY (1995) Mangrove ecosystems. In: Proceedings of the Asia-Pacific Symposium on Mangrove Ecosystems, Hong Kong (1-3 September, 1993). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 368 pp.

Winterwerp J, Van Kesteren WGM (2004) Introduction to the physics of cohesive sediment in the marine environment. *Developments in Sedimentology* 56. T. van Loon, ed. Amsterdam. Elsevier. 466p.

Wojda M (2011) Bank erosion in the Petitcodiac River estuary. MSc Thesis, University of New Brunswick, Fredericton, NB, 167 pp.

Wolanski E, Gibbs R (1992) Resuspension and clearing of dredge spoils after dredging, Cleveland Bay, Australia. *Water Environ Res.* 64(7):910-914  
<https://doi.org/10.2175/WER.64.7.9>

Wright LD, Wiseman WJ, Bornhold BD, Prior PB, Suhayda JN, Keller GH, Yang ZS, Fan YB (1988) Marine dispersal and deposition of Yellow River silts by gravity driven underflows. *Nature* 332(6164): 629- 632.

Wurpts R (1998) The question of definition of the nautical depth in fluid mud by aid of rheological properties. Proceedings of the 15 th World Dredging Congress, Las Vegas, Nevada, USA.

Wurpts R, Torn P (2005) 15 years' experience with fluid mud: Definition of the nautical bottom with rheological parameters. *Terra et Aqua*, 99: 22–32.

Xie M, Zhang W, Guo W (2010) A validation concept for cohesive sediment transport model and application on Lianyungang Harbor, China. *Coast Eng* 57:585-596.

Zhang H, Ruan W (2002). Study and Application of Fluid Mud at North Passage Deepwater Channel of the Yangtze Estuary. *J Port & Waterway Eng*, 10, 96-102