

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

TAINÁ NAPOLEÃO CARAM

ESTUDO DO USO DE SÍSMICA
MULTIFREQUÊNCIA PARA O MAPEAMENTO
DO SUBFUNDO MARINHO

Niterói, RJ 2024

TAINÁ NAPOLEÃO CARAM

ESTUDO DO USO DE SÍSMICA MULTIFREQUÊNCIA PARA O MAPEAMENTO DO SUBFUNDO MARINHO

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Programa de Pós-Graduação em
Dinâmica dos Oceanos e da Terra como re-
quisito parcial para a obtenção do Grau de
Mestre na área de Geologia e Geofísica.

Orientador:
ARTHUR AYRES NETO

Niterói, RJ 2024

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

C259e Caram, Tainá Napoleão
ESTUDO DO USO DE SÍSMICA MULTIFREQUÊNCIA PARA O MAPEAMENTO
DO SUBFUNDO MARINHO / Tainá Napoleão Caram. - 2024.
49 f.: il.

Orientador: Arthur Ayres Neto.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Instituto de Geociências, Niterói, 2024.

1. Geofísica Marinha. 2. Geoacústica Marinha. 3. Sísmica
Multifrequência. 4. Análise Sísmica. 5. Produção
intelectual. I. Ayres Neto, Arthur, orientador. II.
Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências.
III. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

TAINÁ NAPOLEÃO CARAM

ESTUDO DO USO DE SÍSMICA MULTIFREQUÊNCIA PARA O MAPEAMENTO
DO SUBFUNDO MARINHO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Programa de Pós-Graduação em
Dinâmica dos Oceanos e da Terra como requisito
parcial para a obtenção do Grau de
Mestre na área de Geologia e Geofísica.

Aprovada em 07 de março de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Arthur Ayres Neto - Orientador, UFF

Prof. Dr. Hélio Heringer Villena, UERJ

Prof. Dr. José Antônio, UFF

Dr. Luiz Antônio Pereira de Souza, IPT

Niterói, RJ

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Amy e Catia, e à minha avó Nelia por serem a melhor rede de apoio que eu poderia ter, por me ensinarem a sonhar e sonharem junto comigo.

Ao meu orientador, o Prof. Arthur Ayres Neto, do Programa de Dinâmica dos Oceanos e da Terra – Departamento de Geologia e Geofísica da UFF, além de ter sido um orientador fantástico, sempre me motivou e acreditou no meu potencial, mesmo quando nem eu acreditava ou tinha perdido as forças. Sua confiança em mim e incentivo sempre foi uma das minhas maiores forças durante essa caminhada.

Aos meus professores da Faculdade de Oceanografia – UERJ, que sempre me apoiaram e continuaram me ensinando tanto mesmo depois da graduação, principalmente aos Prof. Hélio Villena e Prof. Josefa Guerra.

Ao Luiz Antônio Pereira de Souza, Cesar Felix e, novamente, ao Prof. Arthur Ayres pela coleta dos dados.

Aos Prof. Dr. Hélio Villena, Prof. Dr. José Antônio e Dr. Luiz Antônio Pereira de Souza que aceitaram o convite para ser parte da banca.

Aos meus queridos amigos que foram uma importantíssima rede de apoio e caminharam junto comigo, vocês são essenciais na minha vida!

À Universidade Federal Fluminense por todo o suporte.

Muito obrigada a todos vocês!

Resumo

Atualmente, no mundo todo, é de praxe utilizar apenas um sistema sísmico de alta frequência em levantamentos para instalação de cabos e dutos sobre fundo marinho. Entretanto, isso pode ser pouco eficiente devido às particularidades de cada sistema. Realizar um levantamento sísmico multifrequência em projetos de engenharia submarina resulta em diversos benefícios. As características geológicas de sub fundo são definidas em diferentes escalas verticais, permitindo resolver mais detalhadamente as camadas mais superficiais e, ao mesmo tempo, mapear estruturas mais profundas. Este trabalho visa expor diferentes interpretações de múltiplas frequências de dados sísmicos realizados de forma independente, com o intuito de comparar diferentes resultados da mesma região e esforçando-se ao máximo para não haver contaminação de informação para comparar as diferentes possibilidades de interpretação caso utilizasse apenas uma fonte, simulando como é normalmente feito pela indústria e com o intuito de reforçar a importância do estudo multifrequência. Foram adquiridos, simultaneamente, dados utilizando os sistemas de dupla frequência de CHIRP sub bottom (frequências: 2-8 kHz e 10-20 kHz) e boomer (0.1 a 1.5 kHz / 75J). Como esperado, os dados de chip mostraram maior resolução que os dados adquiridos com boomer, detalhando as feições mais próximas ao fundo marinho. No entanto, algumas delas podem induzir o intérprete ao erro caso seja utilizado apenas uma fonte. Devido a maior capacidade de penetração, o sistema boomer forneceu maior detalhamento das camadas sedimentares mais profundas, além da alta capacidade de mapear o embasamento, crucial para solucionar as ambiguidades geradas pelas outras fontes. Essa combinação de sistemas mostrou-se fundamental para melhor compreensão das características geológicas do subfundo marinho, permitindo um melhor entendimento da disposição estrutural das camadas e, conseqüentemente, reduzindo a demanda de pontos para amostragens geológicas e geotécnicas, resultando em otimização de tempo e redução dos custos em projetos de engenharia submarina.

Palavras-chave: Geologia Marinha. Geofísica Marinha. Engenharia submarina. Métodos Acústicos. Múltiplas Fontes Acústicas. Sísmica de Alta Resolução.

Abstract

The globally accepted best practice in marine engineering projects is to employ only one high-resolution seismic source. However, this may be less efficient due to the specification of each system. The use of multifrequency seismic for this kind of survey is plenty advantageous. Geological characteristics of the sub seabed are defined in different vertical resolutions; it allows visualize shallower and deeper features at the same time. This work presents the result of a multispectral seismic survey CHIRP (2-8 kHz and 10-20 kHz and Boomer (0.1 a 1.5 kHz/75 J) along a 6 km long cable route, demonstrating the advantages of using different seismic sources over one single seismic source for interpreting the sub seabed layer. The result shows CHIRP has the highest resolution, and very shallow features are more detailed than Boomer. However, by using only one frequency the interpreter could easily be induced to make some mistakes. Due to its elevated signal penetration capability, the Boomer system obtained higher data density, especially detailing deeper sedimentary layers, and a larger capacity to map the rock basement, which was crucial to clear up ambiguities produced by other sources. This approach is fundamental for enhancing the comprehension of the study area, and considerably reducing the needs for geotechnical and geological sampling with great impact in the project's costs and time.

Keys Words: Multifrequency Seismic, Seismic Interpretation, Seismic Resolution, Marine Engineering Survey, Subbottom Profiling

Lista de Figuras

Figura 1: Área de estudo, Ilha Grande -RJ/Brasil	14
Figura 2: Mapa de localização dos perfis sísmicos executados na área de interesse.....	18

Lista de Figuras do Artigo

Figure 1: Location of the study area within Ilha Grande Bay, Rio de Janeiro, Brazil.....	21
Figura 2: Survey lines map.....	23
Figure 3: Bathymetric Map.....	24
Figure 4: Gradient Map	25
Figure 5: Transect 69071855-1 across all frequencies without interpretation.....	27
Figure 6: Interpreted transect 69071855-1 across all frequencies. The red line represents the rock basement, while the cyan, teal, green, yellow, pink, and light green lines indicate sedimentary layers.....	28
Figure 7: Transect 69071855-2 displayed without interpretation, using dual-frequency CHIRP and Boomer data.....	30
Figure 8: Interpreted transect 69071855-2 across all frequencies. The red line represents the rock basement, while the cyan, teal, green, and yellow lines indicate sedimentary layers. The light purple highlights gas accumulation.. ..	31
Figure 9: Transect 69081443 displayed without interpretation, using dual-frequency CHIRP and Boomer data.....	33
Figure 10: Interpreted transect 69081443 across all frequencies. The red line represents the rock basement, while the cyan, teal, green, yellow, and orange lines indicate sedimentary layers. The light purple highlights gas accumulation.....	34
Figure 11: Gas accumulation plots for transects 69071855-1 and 69081443, highlighting depth variations	35
Figure 12: Plot of the first sedimentary layer in transect 69081443, illustrating variations in depth and structure.	36
Figure 13: Rock basement profile in transect 69081443, displayed using dual-frequency CHIRP	

and Boomer data.....	37
Figure 14: Screenshot of Side Scan Sonar (SSS) data indicating the absence of an outcropping rock at the location discussed in Table.	39
Figure 15: Structure Contour Map of gas accumulation derived from the analysis of Dual Frequency CHIRP and Boomer data.....	40
Figure 16: The Structure Contour Map of the first sedimentary horizon derived from the analysis of Dual Frequency CHIRP and Boomer data	41
Figure 17: Structural Contour Map of the rock basement horizon based on Dual Frequency CHIRP and Boomer data analysis	42

Lista de Tabela do Artigo

Table 1: Transect 69072025 and 69072031 in dual frequency CHIRP and Boomer.....	38
---	----

Lista de Abreviaturas e Siglas

AB – Acoustic Basement
AI – Acoustic Impedance
BIG – Baía de Ilha Grande
MBES – Multifeixe / Multibeam
SBP – Sub Bottom Profiler
SSS – Sonar de Varredura Lateral / Side Scan Sonar

Sumário

Lista de Tabela do Artigo	9
1.Introdução	12
2. Área de Estudo.....	14
3. Revisão Bibliográfica.....	15
4. Materiais e Métodos	18
5. Resultados e Discussão	19
I. Introduction.....	20
II. Site and Project Background.....	21
III. Methodology	22
IV. Results and Discussion.....	23
V. Conclusion	42
VI. References.....	43
6. Conclusões	45
7. Referências Bibliográficas	47

1.Introdução

Geoacústica submarina é a ciência que aplica a geração, transmissão, reflexão, refração e recepção de pulsos sonoros através de diferentes meios físicos e suas interfaces para caracterizar o fundo e subfundo marinho através de ferramentas não invasivas e indiretas. São métodos extremamente eficientes, principalmente quando amarradas a amostras sedimentares.

Essa ferramenta é empregada para visualizar estruturas, camadas sedimentares e topo das rochas, utilizada em exploração onshore, nearshore e offshore (MAGRANI & AYRES NETO, 2014). As frequências dos sinais afetam a resolução do dado horizontal e verticalmente; as altas frequências são normalmente uma ótima ferramenta para mapear a morfologia e distribuição superficial de sedimentos do fundo marinho, como ecobatímetros – 12-500 kHz - e Sonar de Varredura Lateral (SSS), que podem variar de 30 - 1600 kHz (EDGETECH, 2019; TELEDYNE, 2017). Para o estudo de subsuperfície e camadas mais profundas do leito marinho são utilizadas fontes sísmicas, abaixo de 20kHz. Equipamentos de frequências relativamente mais baixas, como os SubBottom Profilers (SBP), produzem dados de alta resolução e permitem caracterizar camadas rasas localizadas a poucos centímetros abaixo do fundo marinho (SOUZA, 2006; SOUZA, et al., 2013).

A sísmica marinha é uma importante ferramenta para melhor compreensão de paleoambientes, geomorfologia, riscos geológicos, entre outros. Há diferentes tipos de sísmica: (DUCHESNE & BELLEFLEUR, 2007) regionais, por exemplo: quando se busca por reservas de petróleo em uma área relativamente inexplorada e possui gastos muito inferiores quando comparada a sísmica 3D. A sísmica 3D e 4D são utilizadas para obter um levantamento mais detalhado das estruturas encontradas (RAFAELSEN, 2002).

A sísmica marinha 2D de alta resolução é uma grande aliada da engenharia submarina, pois é relativamente fácil de ser manuseada, praticamente pronta para ser utilizada devido ao zero-offset (DUCHESNE & BELLEFLEUR, 2007). A escolha da fonte sísmica dependerá do objetivo do projeto. Todavia, comumente, quanto maior a frequência da fonte, maior será a atenuação e, conseqüentemente, menor a capacidade de penetração do sinal no solo (AYRES NETO, 2000).

O sistema boomer é uma fonte impulsiva, composto por um sistema elétrico de bobinas que ao receberem uma corrente elétrica de alta voltagem, produzem um campo magnético que impulsiona uma placa coberta por uma membrana de borracha que é deslocada bruscamente (similar a um tambor) e produz um sinal acústico bem definido e de relativa baixa frequência, em relação ao CHIRP. Hoje em dia, os equipamentos Boomer existentes no mercado podem gerar frequências entre 0.3 e 3 kHz (VAN REENAN, 1964; AYRES NETO, 2000)

Os sistemas de subbottom profiler são fontes ressonantes, baseado em cerâmicas piezoelétricas. Nesses sistemas os cristais se deformam quando um pulso elétrico é emitido, gerando o pulso acústico na coluna d'água. Normalmente a capacidade de penetração desses sinais varia de acordo com a impedância acústica do sedimento, depende diretamente da composição do material e grau de compactação do solo. Por ter frequência maior que as outras fontes sísmicas, é uma boa opção para melhor detalhamento de pacotes espessos de lama (AYRES NETO, 2000). Esta ferramenta utiliza frequências relativamente mais altas, variando de 0,4 a 20 kHz (AYRES NETO, 2000; EDGETECH, 2019).

Os princípios básicos da sísmica são similares ao de sismologia. Em suma, são ondas geradas mecanicamente viajam para dentro do pacote sedimentar. Ao se deparar com uma interface entre dois meios com propriedades físicas distintas, parte dessa energia é refletida de volta para a superfície e parte refratada para baixo. O sinal de retorno é captado por sensores que geram uma série temporal de valores de amplitudes das reflexões da onda durante o tempo de viagem de ida e volta da mesma através da coluna d'água e das camadas sedimentares. Após transformações computacionais (digitalização) dos traços sísmicos são geradas imagens da subsuperfície da Terra (IAGC, 2002).

Os diferentes padrões de reflexão dos sinais acústicos estão relacionados com a litologia, morfologia, estruturas sedimentares, granulometria, porosidade, limites de Atterberg/limite de consistência, teor de carbono, densidade e outras consequências dos distintos processos sedimentares e tectônicos de uma região (DAMUTH, 1975; DAMUTH & HAYES, 1977; AYRES NETO, 2000)

O traço sísmico marinho gerado por um sistema monocal contém ruídos como pulso bolha, reflexões ghost, múltiplas de curto período, o que resulta em considerada perda de resolução vertical em subsuperfície e, conseqüentemente, pode levar a erros de interpretação. Quando processado, o dado monocal apresenta melhorias em relação ao ruído por exemplo, além disso são muito mais práticos em comparação aos sistemas de sísmica multicanal, por não demandarem processamentos complexos (TEIXEIRA & AYRES NETO, 2017). Entretanto, muitas vezes o processamento em dados de alta resolução não é levado em consideração, pois os recursos de processamento em dados monocal são mais limitados, depende muito do escopo do projeto e da necessidade de detalhamento (DUCHESNE & BELLEFLEUR, 2007; AYRES NETO, 2000).

Com o avanço da tecnologia, hoje é possível adquirir dados de ecobatimetria, sonar de varredura lateral (SSS), SBP e boomer simultaneamente, inclusive em levantamentos costeiros, sincronizando os disparos das fontes, necessitando apenas de um computador e um software que consiga gerenciar a gravação de todas essas aquisições. Entretanto, quando realizado desta forma é necessário atentar-se nas correções da distância entre as fontes sísmicas e, quanto ao barco, evitar interferência dos pulsos (SOUZA, et al., 2013)

Atualmente, é prática comum se usar apenas uma fonte sísmica na maioria dos estudos. Isso torna a questão da escolha de qual fonte será usada uma decisão de alto risco, pois cada uma das fontes é mais adequada dependendo da finalidade do projeto e do tipo de sedimento no fundo marinho. É suposição errônea achar que somente informações da parte mais superficial ou mais profunda (e nunca de ambos) do solo marinho são importantes para o projeto. O que se propõe neste trabalho é mostrar que levantamentos sísmicos de alta-frequência multiespectrais permitem entender de forma mais completa a geologia de subsuperfície, contribuindo para a resolução das inconsistências e das ambiguidades na interpretação, evitando, assim, erros que podem comprometer o projeto, resultando em maiores riscos para o empreendimento (SOUZA, et al., 2013).

2. Área de Estudo

O estudo foi realizado ao longo de um corredor de aproximadamente 6 km de comprimento e 400 metros de largura entre as coordenadas 580546/ 7446170 e a 582890/ 7450206, na Baía da Ilha Grande (BIG), litoral do estado do Rio de Janeiro (Figura 1), importante por ser uma área de preservação ambiental.

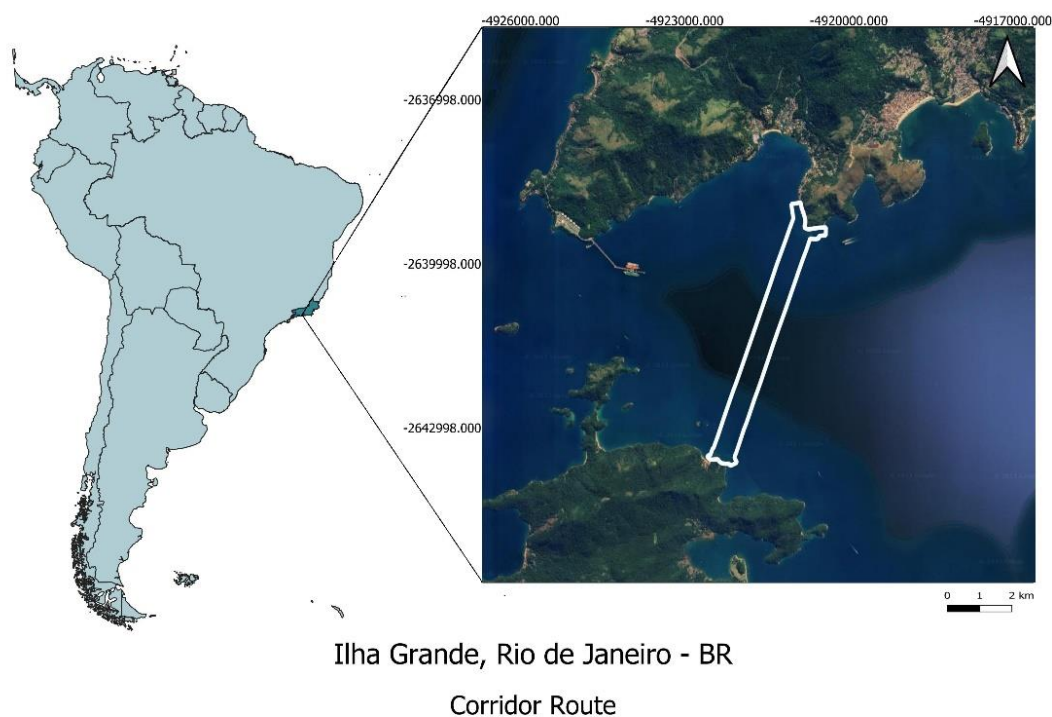


Figura 1: Área de estudo, Ilha Grande -RJ/Brasil.

Esse estudo consistiu em um projeto para instalação de um cabo elétrico e de fibra ótica entre o continente e a Ilha Grande, executado em 2016. A região é circundada pela Serra do

Mar, denominada localmente como Serra da Bocaína, caracterizada por encostas bastante íngremes, paredões rochosos e planícies costeiras pouco desenvolvidas. Além disso, exibe um litoral marcado por pequenas baías e enseadas, delimitadas por costões rochosos, presença de Mata Atlântica, grande diversidade de ecossistemas marinhos, costões, ilhas, praias arenosas, manguezais e estuários (OLIVEIRA E SILVA, 1999; BELO, et al., 2002; MEDEIROS, 2006).

A Baía da Ilha Grande se formou pelos mesmos eventos de nível geológico-regional que deram origem à Serra do Mar, à Serra da Mantiqueira, aos maciços litorâneos e ao Graben da Guanabara (AMADOR, 1987). A baía de Ilha Grande e seus afloramentos que hoje estão submersos já estiveram totalmente emersos durante a última máxima regressão marinha há 18000 anos, quando a região pertencia aos maciços elevados do continente. A região foi afogada progressivamente até a plataforma continental pela última transgressão marinha, a cerca de 10000-11000 anos e a inundação completa da região ocorreu entre 5000-6000 anos e aparenta estar estável no nível atual a aproximadamente 2500 anos (MAHIQUES, 1987).

O leito marinho é constituído por afloramentos rochosos, canais de fundo, baixos batimétricos, terraços marinhos e regiões de declividade mais suave (BELO, et al., 2002). Neste estudo foi utilizado Sonar de Varredura Lateral para observar padrões sedimentares de fundo que consistem em transições de sedimento mais grosso associado a ambientes de mais energia a leste para mais finos - associados a ambientes de menor energia a oeste, intercalados por tipos transitórios.

Através de coletas de testemunho, Fontoura (2001) constatou que a baía de Ilha Grande é predominantemente composta por sedimentos lamosos subsuperficiais, incluindo lama fluida, com mínimas variações na coloração ao longo de sua extensão. No entanto, foram observadas áreas com presença de areia muito fina a fina, assim como de biodetritos, demonstrando variações na granulometria e baixa seleção granulométrica ao longo do testemunho. Quanto ao carbonato biodetrítico, foram registradas variações mínimas nos testemunhos e ao longo da profundidade dos mesmos.

3. Revisão Bibliográfica

O som é uma onda mecânica que se propaga concentricamente na forma de uma variação de pressão (fonte de compressão e rarefação), transferindo a energia de ponto a ponto em um meio com massa e densidade (gasoso, líquido ou sólido (AYRES NETO & BAPTISTA NETO, 2004; AYRES NETO, 2000)). Os métodos geofísicos acústicos podem ser chamados de métodos elásticos, já que utilizam a elasticidade como propriedade física para controlar a velocidade de propagação das ondas em subsuperfície (AYRES NETO, 2000). A elasticidade descreve a força

restauradora que existe nos diversos materiais quando deformados, força esta que surge sempre no sentido de recuperar o formato original do material (AYRES NETO, 2000).

As fontes sísmicas disparam periodicamente pulsos acústicos, também chamadas de ondas compressoriais (ou ondas P), por se deslocarem na mesma direção do movimento das partículas. As ondas são propagadas até encontrarem uma interface entre meios com impedância acústica distinta (AYRES NETO & BAPTISTA NETO, 2004).

A impedância acústica (IA) é o produto entre a velocidade do som (c) e a densidade (ρ) como mostra a equação 1 (AYRES NETO, 2000):

$$IA = c * \rho \quad (\text{Eq.1})$$

A partir da diferença de IA dos meios acústicos é possível obter o coeficiente de reflexão; quanto maior a diferença, maior a quantidade de energia refletida.

A velocidade do som na água varia de acordo com a temperatura, salinidade e pressão. Já no sedimento, depende basicamente da densidade que varia de acordo com a mineralogia, porosidade e teor da água. Portanto, camadas sedimentares mais compactas e menos porosas tendem a refletir maior quantidade de energia em relação à sedimentos mais porosos e com maior teor de água (AYRES NETO & BAPTISTA NETO, 2004).

A resolução sísmica é a medida do quão grande um objeto precisa ser para ser visualizado em um perfil sísmico. A resolução vertical (eq2) é derivada do comprimento da onda e as camadas acústicas podem ser discernidas quando sua espessura abaixo é inferior a 1/4 do comprimento da onda (RAFAELSEN, 2002):

$$\lambda = \frac{V}{F} \quad RSV = \frac{\lambda}{4} \quad (\text{Eq 2})$$

Onde:

λ = comprimento de onda

F = Frequência sísmica

V = velocidade sísmica

RSV = resolução sísmica vertical

Fontes ressonantes como o sistema CHIRP geram um pulso semelhante à uma curva senoidal de frequência variável e a frequência é principalmente determinada a partir da frequência de ressonância dos cristais piezoelétricos que compõem os transdutores. Este sistema

consegue preservar boa definição do sinal emitido, tornando menos complexa a remoção de ruídos (AYRES NETO & BAPTISTA NETO, 2004).

A profundidade é medida através da medição do tempo bidirecional da viagem do sinal entre a fonte até o receptor, medida comumente em milissegundos, multiplicada pela velocidade de propagação da onda (neste trabalho assumida como 1500 m/s). A frequência do sinal é inversamente proporcional ao comprimento de onda, ou seja, quanto mais baixa a frequência, menor a resolução sísmica (RAFAELSEN, 2002). A frequência é inversamente proporcional a profundidade de investigação, ou seja, quanto menor a frequência, mais profundas serão as camadas mapeadas. Com o aumento da profundidade os sedimentos são gradualmente mais compactados, portanto, de uma maneira geral a velocidade do som aumenta com o aumento da profundidade (RAFAELSEN, 2002).

Entretanto, a profundidade de penetração do sinal acústico dependerá de vários fatores como: sistema sísmico utilizado, frequência, tipo de fundo, sedimento e grau de compactação dos mesmos.

Khun e Weber (1993) em um estudo no sudeste do Mar de Weddell, Antártica, utilizaram o sistema CHIRP, frequência 3,5 kHz, power pulse transmitido 10kW e ângulo dos feixes (wide beam angle) 20°, concluíram que hipérboles de difração são bem comuns e o footprint acústico da área é inversamente proporcional a resolução espacial do sistema. Obtiveram até 80 metros de penetração do sinal.

Já em áreas costeiras, Iguatemy e Ayres Neto (2010), em um estudo em área predominantemente arenosa com presença de biodetritos na Barrado Furado, Rio de Janeiro-Brasil, observaram um fundo muito reflexivo, que provavelmente está associado a fundo arenoso - há pouca ou nenhuma penetração do sinal de CHIRP nas porções arenosas, o máximo de penetração foi cerca de 15 ms (10m)

Segundo estudos de Simpkin (2005), o sistema boomer pode ser utilizado desde águas muito rasas a profundas, a penetração irá variar de acordo com a composição do fundo e grau de consolidação. Como qualquer fonte sísmica, quando os alvos estão muito próximos, há redução na largura da banda e perda de resolução.

De acordo com o estudo de Evans et al (2004), o Boomer pode ter 60 m de penetração em sedimentos grosseiros em 120 m de coluna d'água, gerando um dado claro e consistente, contudo estará sempre relacionado com a composição do fundo e grau de compactação.

4. Materiais e Métodos

Realizou-se um levantamento em uma área de 2,2 km² (5 km de comprimento e 300 m de largura), profundidade entre 2 e 30 m em uma área entre a Ilha Grande e a cidade de Conceição do Jacaré no litoral do estado do Rio de Janeiro, visando definir a geologia de superfície e subsuperfície do corredor para o lançamento e enterramento de um cabo elétrico e de comunicação. As linhas de aquisição foram orientadas a SW-NE e linhas transversais orientadas a SE-NW como ilustra a figura 2.

Neste trabalho foram adquiridos simultaneamente dados de ecobatimetria interferométrico do fabricante Kongsberg, modelo Geoswath+ interferometric echosounder (frequência 250kHz), SSS do fabricante EdgeTech 4125 (frequência 400-900 kHz, 75 m range), sísmica de multifrequência de alta resolução, utilizando os sistemas de dupla frequência de CHIRP do fabricante Oy Meridata Finland Ltd. (frequências: 2-8 kHz e 10-20 kHz), e Boomer do fabricante SIG (0.1-1.5 kHz / 75-J).

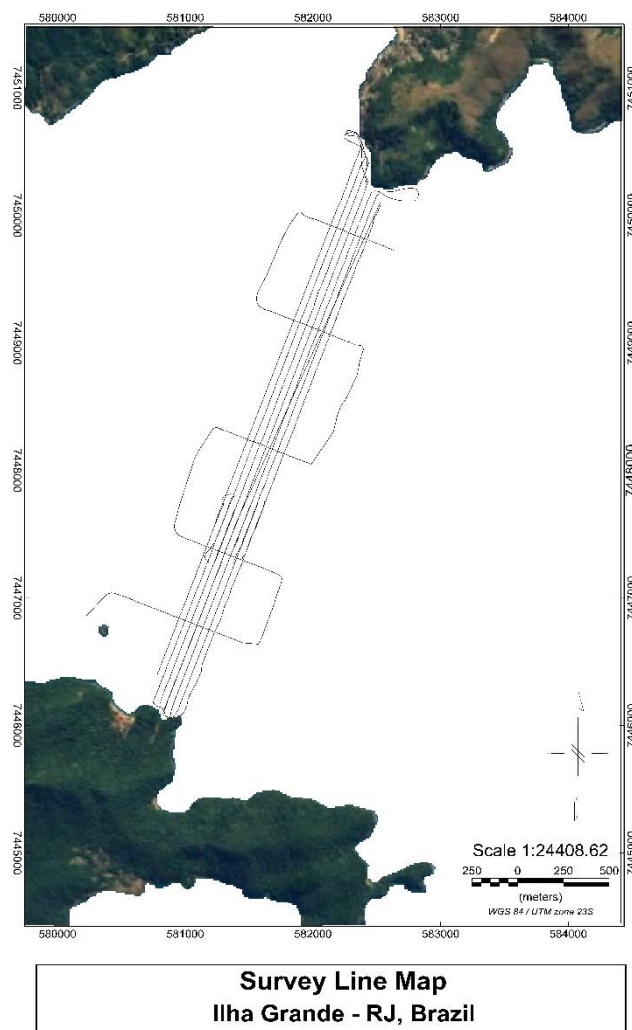


Figura 2: Mapa de localização dos perfis sísmicos executados na área de interesse.

Considerando a prática comum das empresas de empregar exclusivamente uma fonte sísmica, o presente estudo se propõe a investigar a interpretação dos dados resultante da utilização de um único sistema. Consequentemente, os dados foram submetidos a uma análise independente para cada fonte, com o intuito de mitigar qualquer influência entre as interpretações para posterior comparação. Os perfis sísmicos foram interpretados a partir do Sonar Wiz 7 e mapas com os resultados das análises gerados através do Surfer e QGIS. Foram feitos testes utilizando o filtro de frequências passa-banda em todos os dados para remover-se as frequências mais baixas - relacionadas a ruídos antrópicos - e mais altas - geralmente associadas a ruídos ambientais; entretanto não houve melhora significativa após a aplicação. Utilizou-se os filtros AGC e AutoTVG para melhorias no ganho e normalizar o dado, estes compensam a perda do sinal acústico devido a propagação pela coluna d'água e em subsuperfície, facilitando uma interpretação mais precisa.

5. Resultados e Discussão

Artigo a ser submetido na revista Geo-Marine Letters

MULTIFREQUENCY SEISMIC SURVEY FOR SUBSEA ENGINEERING

Abstract

The globally accepted best practice in marine engineering projects is to employ only one high-resolution seismic source. However, this may be less efficient due to the specification of each system. The use of multifrequency seismic for this kind of survey is plenty advantageous. Geological characteristics of the sub seabed are defined in different vertical resolutions; it allows visualize shallower and deeper features at the same time. This work presents the result of a multispectral seismic survey CHIRP (2-8 kHz and 10-20 kHz and Boomer (0.1 a 1.5 kHz/75 J) along a 6 km long cable route, demonstrating the advantages of using different seismic sources over one single seismic source for interpreting the sub seabed layer. The result shows CHIRP has the highest resolution, and very shallow features are more detailed than Boomer. However, by using only one frequency the interpreter could easily be induced to make some mistakes. Due to its elevated signal penetration capability, the Boomer system obtained higher data density, especially detailing deeper sedimentary layers, and a larger capacity to map the rock basement, which was crucial to clear up ambiguities produced by other sources. This approach is fundamental for enhancing the comprehension of the study area, and considerably reducing the needs for geotechnical and geological sampling with great impact in the project's costs and time.

Keys Words: Multifrequency Seismic, Seismic Interpretation, Seismic Resolution, Marine Engineering Survey, Subbottom Profiling

I. Introduction

Marine geoacoustics applies the principles of sound pulse generation, transmission, reflection, refraction, and reception to characterise the seabed using non-invasive geophysical methods. High-frequency equipment, such as multibeam echo sounders (MBES) operating at 12-500 kHz and side scan sonar (SSS) at 30-1600 kHz, effectively surveys seafloor sediment morphology and distribution (TELEDYNE, 2017; EDGETECH, 2019). For deeper subsurface layers, low-frequency systems, including Sub-Bottom Profilers (SBP) operating below 20 kHz, produce high-resolution data for mapping sediment layers from a few centimetres to tens of metres beneath the seafloor (SOUZA, 2006; SOUZA et al., 2013).

High-resolution seismic (HRS) 2D, often used in marine engineering, provides data that is nearly ready for interpretation, with minimal post-processing required due to zero-offset acquisition (DUCHESNE & BELLEFLEUR, 2007). Seismic source choice depends on project goals, as higher frequencies generally produce more detailed but less penetrating signals (AYRES NETO, 2000).

The boomer system, which consists of an electrical coil that produces a magnetic field to propel a rubber-coated plate, generates a clear acoustic signal with frequencies typically ranging between 0.3 and 3 kHz (AYRES NETO, 2000; VAN REENAN, 1964). Sub-bottom profilers, by contrast, use piezoelectric ceramics to create acoustic pulses through crystal deformation. These pulses can penetrate up to approximately 70 m below the seabed, depending on the sediment's acoustic impedance and compaction, and operate within a 0.5 to 24 kHz range, making them suitable for detailing mud pack thickness (AYRES NETO, 2000; EDGETECH, 2019).

Single-channel marine seismic data often contain artefacts, which can reduce data quality and vertical resolution, increasing the likelihood of interpretation errors. Although single-channel data limit post-processing options, processing for high-resolution applications, such as offshore wind farm projects, is becoming more common (AYRES NETO, 2000; DUCHESNE & BELLEFLEUR, 2007).

Advances now allow for simultaneous data acquisition from MBES, SSS, SBP, Boomer, and Sparker, synchronised through software that manages shot timing and offsets across instruments. This multispectral or multifrequency approach provides comprehensive geological mapping but requires careful calibration to avoid interference and ensure accurate feature positioning (SOUZA et al., 2013).

Nevertheless, many surveys still rely on a single seismic source due to limited resources, contractor availability, or the misconception that only shallow or deep sediment data is necessary (SOUZA et al., 2013). This study presents the results of a multifrequency geophysical survey, illustrating how integrated data interpretation supports a more complete understanding of sub-bottom geology by reducing data inconsistencies and mitigating potential misinterpretations that could affect project outcomes.

II. Site and Project Background

The study was conducted along a cable route in Ilha Grande Bay (BIG), an important environmental preservation area illustrated in Figure 1. Surrounded by the Serra do Mar, locally known as Serra da Bocaina, this region is characterised by steep slopes, rocky cliffs, underdeveloped coastal plains, and diverse marine ecosystems, including Atlantic Forest, cliffs, islands, sandy beaches, mangroves, and estuaries (OLIVEIRA E SILVA, 1999; BELO et al., 2002; MEDEIROS, 2006).

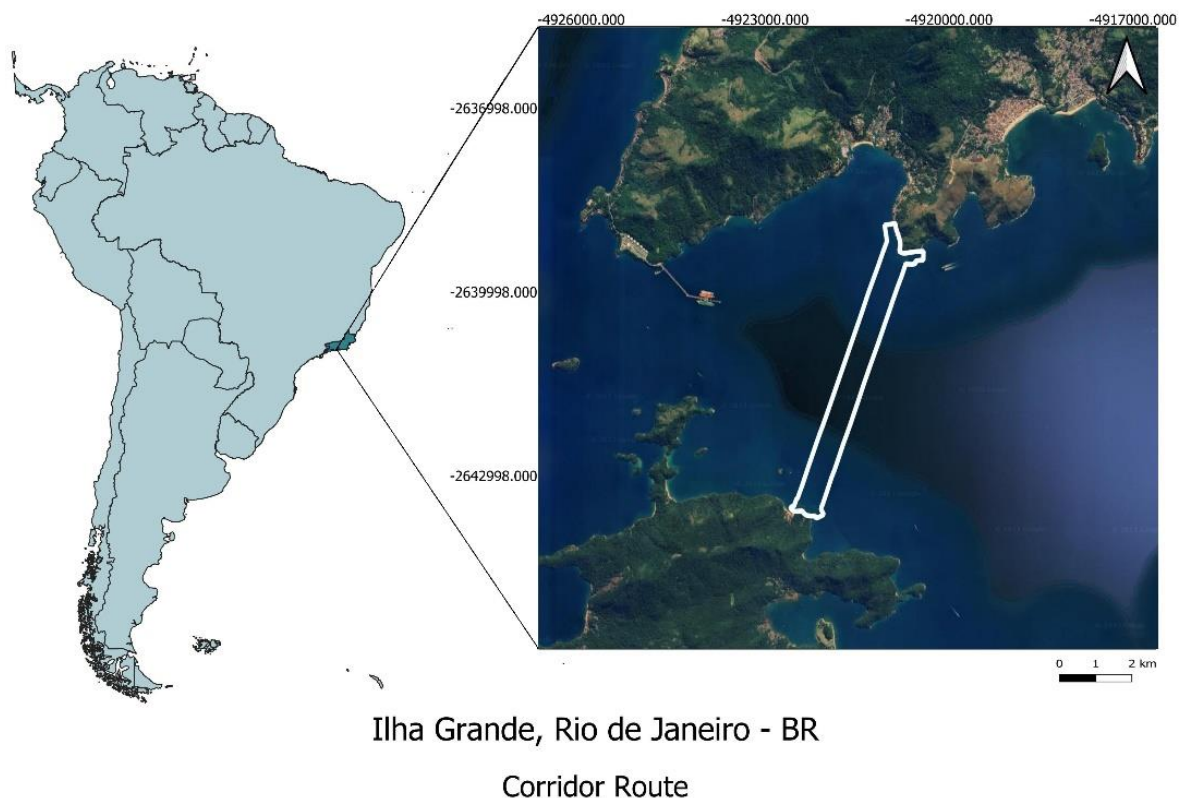


Figure 1: Location of the study area within Ilha Grande Bay, Rio de Janeiro, Brazil.

Geologically, Ilha Grande Bay shares its origins with the Serra do Mar, Serra da Mantiqueira, and the Guanabara Graben (AMADOR, 1987). During the last glacial maximum, approximately 18,000 years ago, the bay and its rocky outcrops were fully exposed as part of the elevated

mainland. The subsequent marine transgression, occurring 10,000–11,000 years ago, gradually submerged the region, which became fully inundated between 5,000–6,000 years ago and stabilised at its present level about 2,500 years ago (MAHIQUES, 1987).

Sediment core analysis by Fontoura (2001) indicates that BIG is predominantly composed of muddy subsurface sediments, including fluid mud, with minimal colour variation. Some areas also show very fine to fine sand and biotritus, reflecting grain size variation and low granulometric sorting. Biotrititic carbonate content shows minimal variation along the sediment cores.

III. Methodology

The scouted corridor was 1,5 km², 5 km long and 300 m wide, with depths ranging between 2 and 35 m connecting the Ilha Grande to the continent, aiming to define the surface and subsurface geology for the launching and burial of an electrical and telecom cable. Acquisition lines were oriented SW-NE and cross lines-oriented SE-NW, as depicted in figure 2.

The geophysical data was acquired simultaneously through Kongsberg Geoswath+ interferometric echosounder (frequency 250 kHz), an EdgeTech 4125 Side Scan Sonar (SSS) (frequency 400 and 900 kHz at 75 m range), a high resolution seismic using CHIRP dual-frequency from Oy Meridata Finland Ltd (frequencies: 2-8 kHz and 10-20 kHz) and a Boomer system from SIG (0.1 a 1.5 kHz / 75-J).

Before interpretation, the data underwent processing to eliminate certain noises and improve its quality. A band-pass filter was applied to eliminate the lowest frequencies, typically linked to anthropogenic noise, as well as the highest frequencies, generally associated with environmental noise. However, this adjustment did not result in a significant enhancement. Additionally, AGC (Automatic Gain Control) and AutoTVG (Automatic Time Variant Gain) filters were employed to enhance the gain and normalize the data it can compensate the loss of the acoustic signal due to the propagation of it through the water column and subsurface; further facilitating a more accurate interpretation.

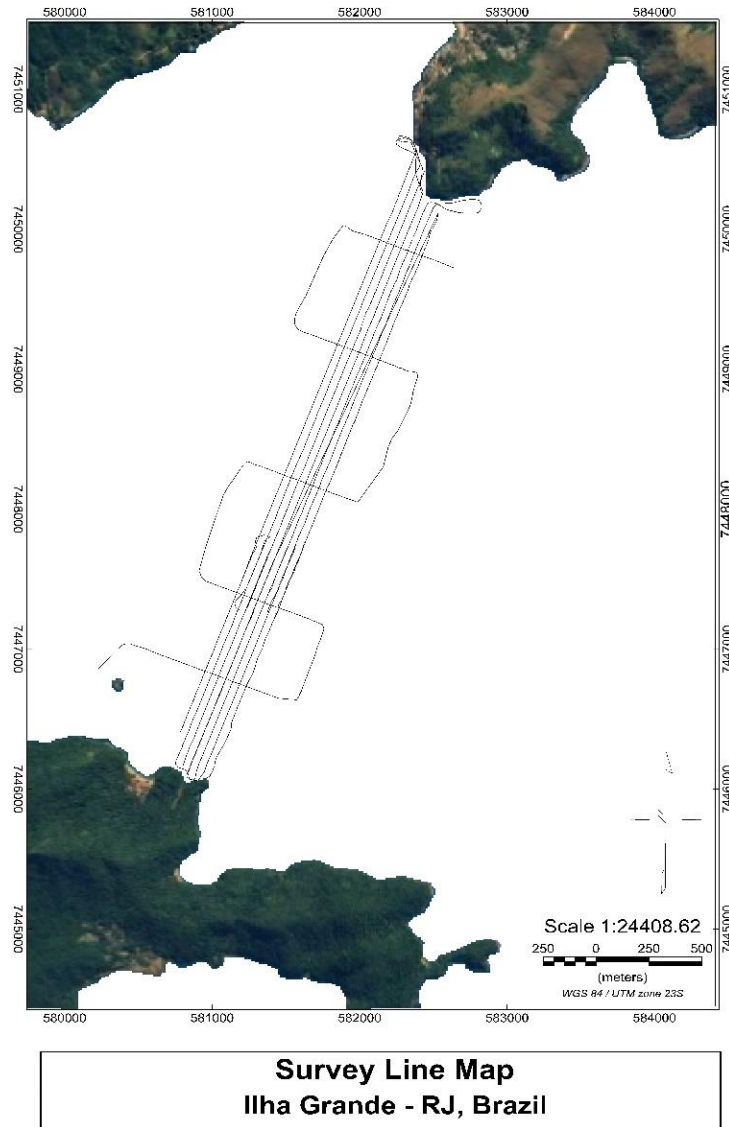


Figure 2: Survey lines map.

Seismic data interpretation was conducted using Sonar Wiz 7, while maps were generated using QGIS and Surfer to analyse lateral continuities estimated through feature, topographic, and morphological measurements.

IV. Results and Discussion

Bathymetry and Gradient

Figures 3 and 4 depict the bathymetric and gradient maps of the study area, highlighting variations in depth and slope. Surveyed depths range from 2 to 29.8 metres, with an average depth of approximately 17 metres. Shallow zones are concentrated along the northern and

southern boundaries. The northern sector reveals a more complex morphology, comprising a bathymetric high with around 6 metres of relief, oriented north-south and extending 140 metres, accompanied by a steep-sided depression with a gradient of 7°. In contrast, the southern sector demonstrates a more homogeneous topography, characterised by minimal gradient variation (0–1°) and an absence of distinct morphological features.

Figure 3 shows that shallow areas at the northern and southern boundaries are represented by blue and green hues, while deeper areas towards the north transition to red and pink, indicating a gradual slope increase.

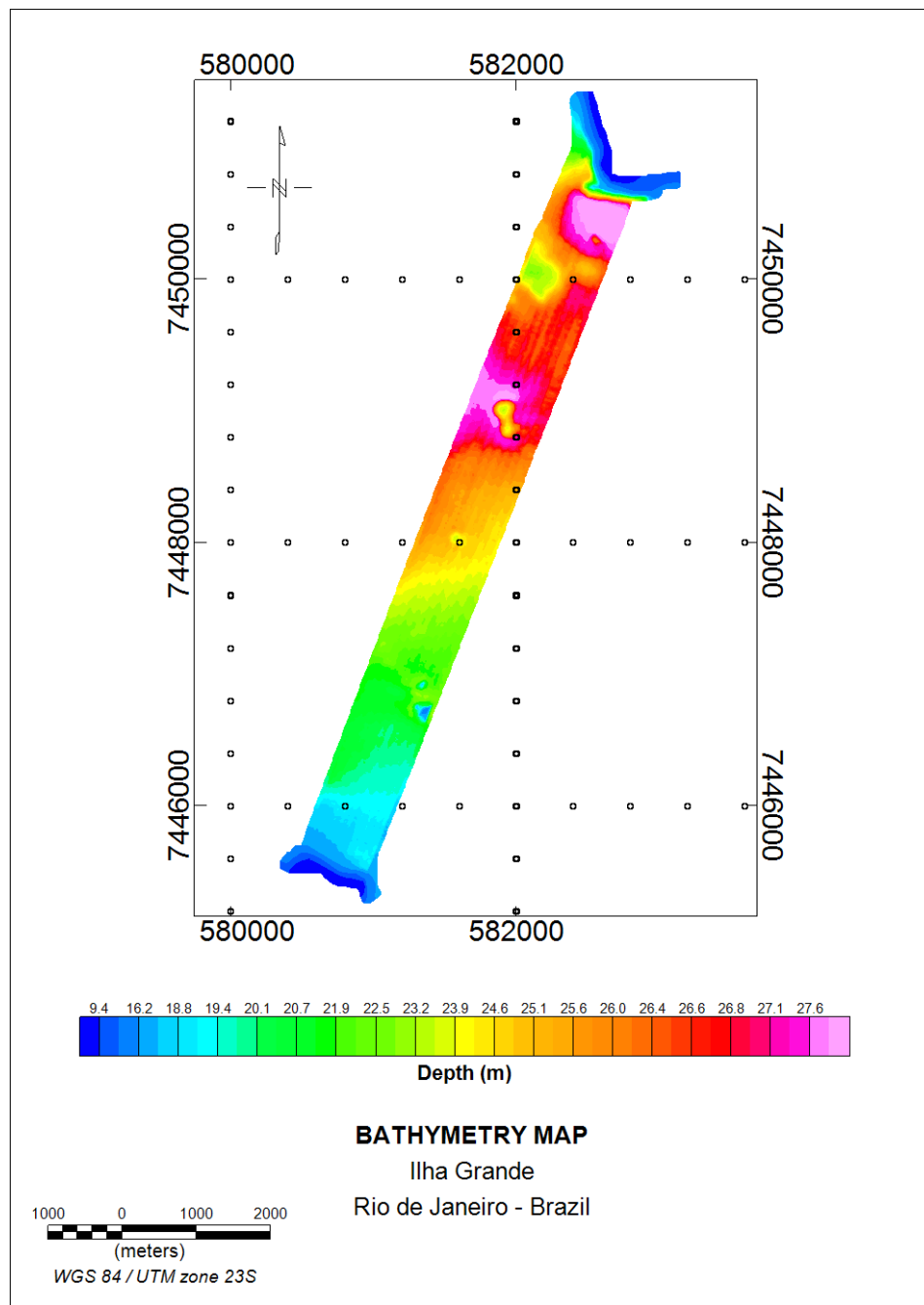


Figure 3: Bathymetric Map.

The gradient map in Figure 4 illustrates a range of gradients, particularly concentrated in the northern regions, with values spanning from 0.5 to 7°. This increase in gradient is attributed to rock shores that delineate the boundaries. Collectively, the bathymetric and gradient data suggest an absence of significant rock outcrops within the surveyed area.

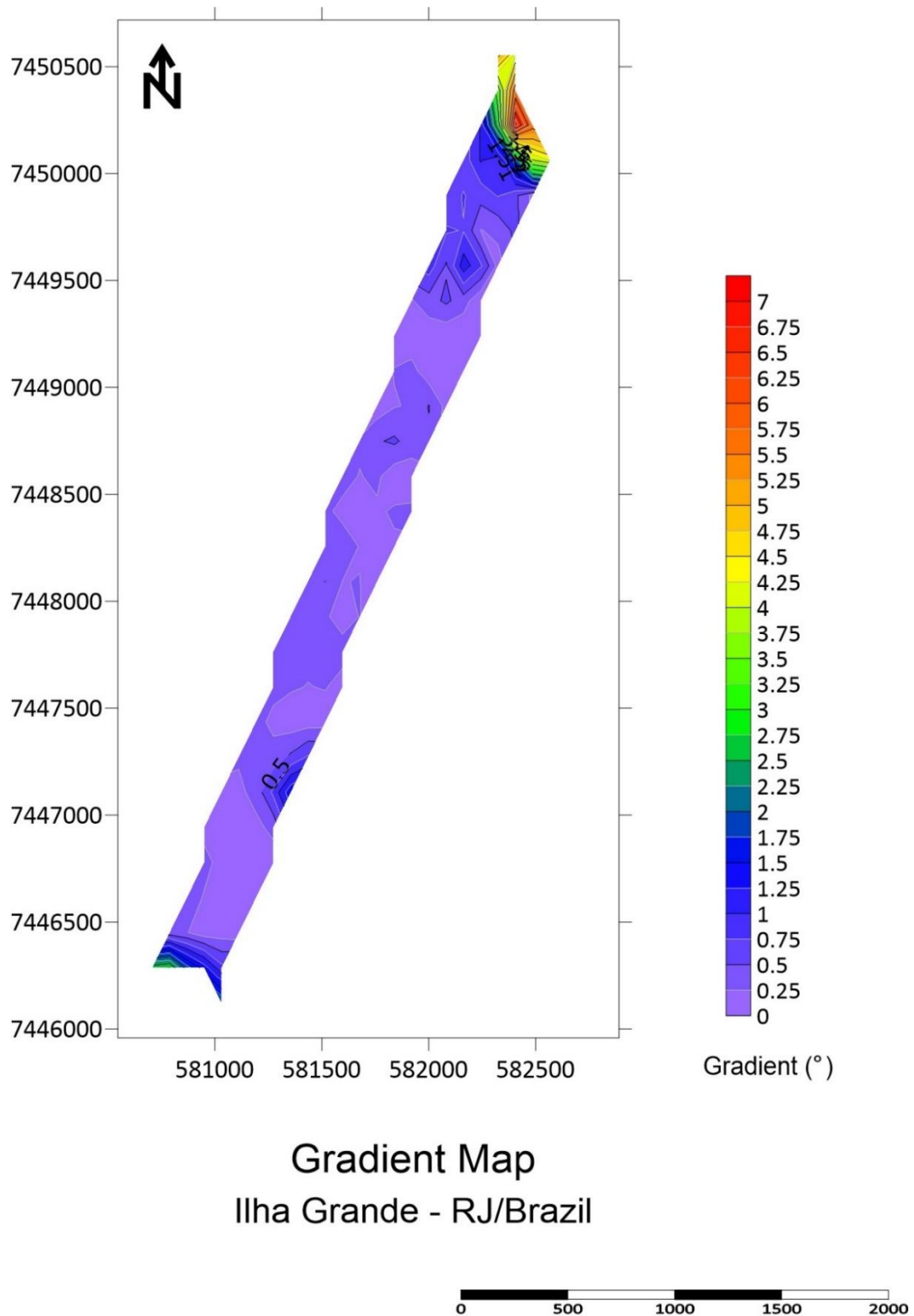


Figure 4: Gradient Map.

Seismic

Echo characteristics in seismic data are intrinsically linked to factors such as lithology, morphology, sedimentary structure, grain size, porosity, carbon content, density, microtopography, subsurface geometry, and seafloor texture, each indicative of specific geological processes (DAMUTH, 1975; MAGRANI & AYRES NETO, 2014; DAMUTH & HAYES, 1997). To evaluate the efficacy of single-source analysis—a common industry practice—interpretations were conducted independently for each seismic system to identify potential discrepancies, with primary focus on the CHIRP 10-20 kHz data, followed by CHIRP 2-8 kHz and Boomer, while minimising cross-system influences.

Key features for marine engineering, including gas accumulations, the first sedimentary horizon, and the rock basement, were plotted to facilitate comparison across frequency ranges. These features are critical for project planning, as they influence risk assessments and design optimisation. Multifrequency seismic data allowed for delineation of subsurface stratigraphy, identification of geological structures, and detection of potential gas pockets at depths ranging from 5.9 to 97.5 milliseconds.

Figure 5 displays transect 69071855-1 across all frequencies without interpretation and Figure 6 shows the same transect post-interpretation, highlighting insights gained through detailed analysis.

The CHIRP 10-20 kHz system offers shallow penetration, detecting two sedimentary layers and the rock basement. The CHIRP 2-8 kHz provides improved image quality and reflector definition, identifying up to three sedimentary layers. The Boomer system has the deepest penetration, revealing up to five sedimentary layers and a more comprehensive rock basement structure, reaching depths of 87 ms, compared to the 53 ms maximum for CHIRP 2-8 kHz and 48 ms for CHIRP 10-20 kHz.

In Figure 6, the first sedimentary layer, marked in cyan within the 10-20 kHz range, appears as a lighter grey, the almost transparent region, suggesting fluid mud. This feature is visible towards the east in the Boomer data but at lower resolution, making precise characterisation challenging. It is absent in the CHIRP 2-8 kHz data.

At the marked ★ location in the 10-20 kHz data, a prominent horizon initially interpreted as a rock basement stands out from adjacent layers. Further analysis reveals that, although this intense reflector is absent in the lower-frequency data from CHIRP 2-8 kHz and Boomer, their greater penetration confirms it as a sedimentary layer rather than a basement outcrop. Identifying this hard sedimentary feature in the 10-20 kHz range offers critical insights for marine engineering, as it aids in understanding subsurface composition and structural integrity, which are essential for accurate project planning and risk assessment.

The rock basement, highlighted in red in Figure 6, is partially visible in the CHIRP

systems, revealing only its shallowest sections. In contrast, the Boomer data offers a more continuous view of the basement structure, improving the depth capability and lateral continuity of the data.

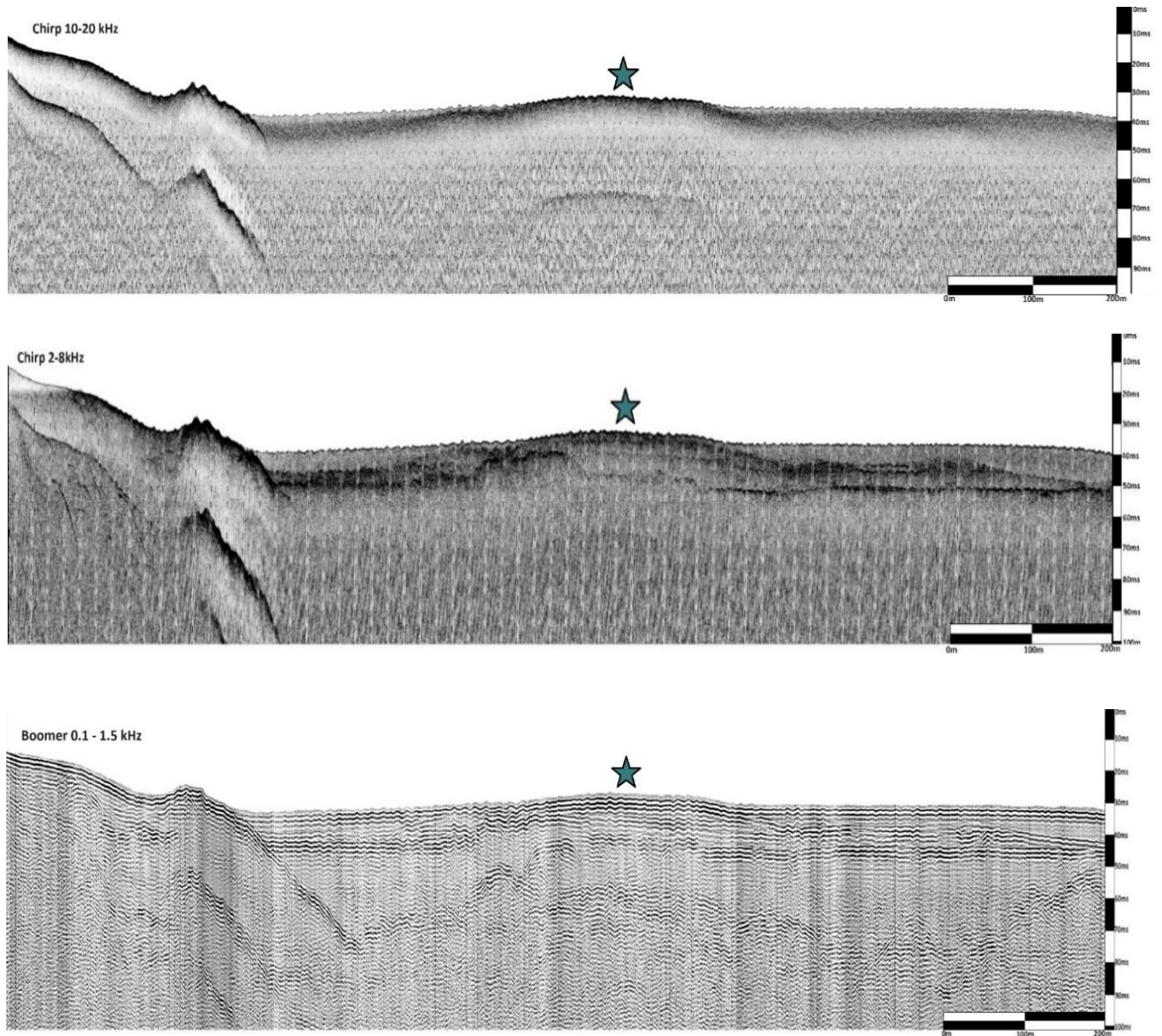


Figure 5: Transect 69071855-1 across all frequencies without interpretation.

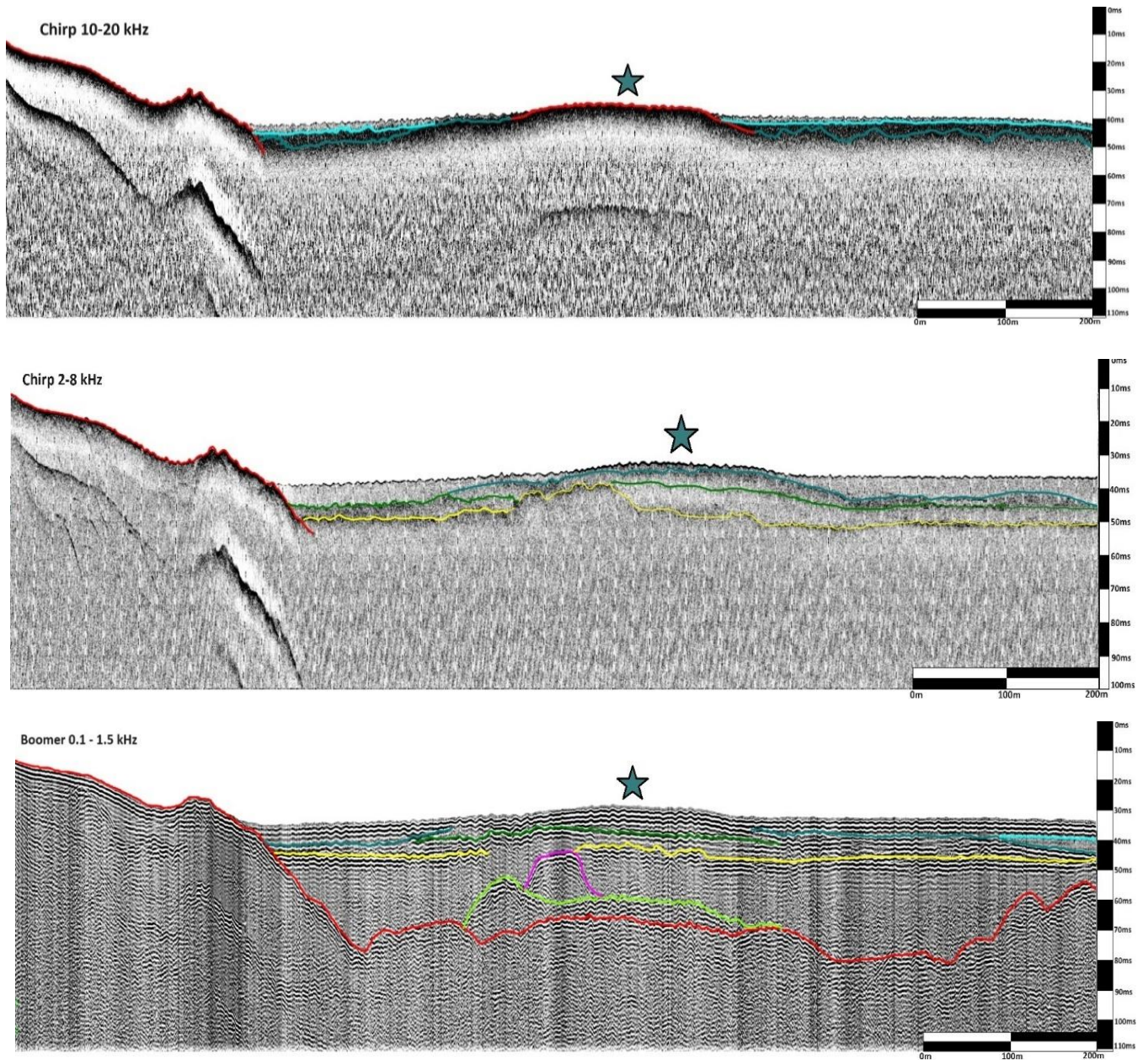


Figure 6: Interpreted transect 69071855-1 across all frequencies. The red line represents the rock basement, while the cyan, teal, green, yellow, pink, and light green lines indicate sedimentary layers.

Figures 7 and 8 display transect 69071855-2, with Figure 7 showing an uninterpreted view and Figure 8 presenting interpreted frequencies. In the 10-20 kHz range, reflectors appear diffuse with limited penetration, revealing two sedimentary layers, gas accumulation highlighted in light purple, and the rock basement. The shallowest layer, shown in cyan, resembles fluid mud and mirrors the nearly transparent layer observed in the previous transect.

In the 2-8 kHz range, four sedimentary layers are visible, along with gas accumulation and the rock basement. This range provides better image clarity and greater

penetration than the 10-20 kHz, enabling more detailed observation of subsurface layers.

The Boomer system, though lower in vertical resolution, offers superior penetration depth, revealing four sedimentary layers, gas accumulation, and an extended view of the rock basement at depths up to 70 milliseconds, compared to the 51 milliseconds depth of CHIRP data. In the Boomer data, the first sedimentary layer, shown in cyan in Figure 8, lacks the fluid mud characteristics observed in the 10-20 kHz CHIRP data, necessitating further analysis.

At the ★ location in the 10-20 kHz CHIRP data, a diffuse and weaker reflector suggests a sedimentary layer, with the adjacent, more distinct red reflector interpreted as the rock basement. This interpretation aligns with the 2-8 kHz CHIRP data, where the same spot shows a strong reflector matching the basement. The Boomer data reflects this pattern but depicts the basement at a greater depth.

At the ▲ location in the 10-20 kHz CHIRP data, an intense reflector with no penetration beneath it suggests the rock basement, similar to the feature observed in transect 69071855-1. In the 2-8 kHz CHIRP data, this spot appears more diffuse, while the Boomer data provides a clearer, deeper, and more continuous view of the layers associated with this feature.

All systems show shallow gas accumulation between depths of 30 to 40 milliseconds, which obscures underlying layers and is highlighted in light purple. In the 10-20 kHz data, the gas curtain appears most diffuse, while in the 2-8 kHz range, it is denser and more defined. The Boomer system displays a rougher, more irregular top. Overall, the dual CHIRP frequencies mask underlying layers more effectively than Boomer, which has greater penetration. The diffuse nature of reflectors in the 10-20 kHz range is attributed to signal dispersion when acoustic waves interact with gas, causing reflection and refraction. Lower frequencies, with longer wavelengths, are more effective at penetrating gas layers.

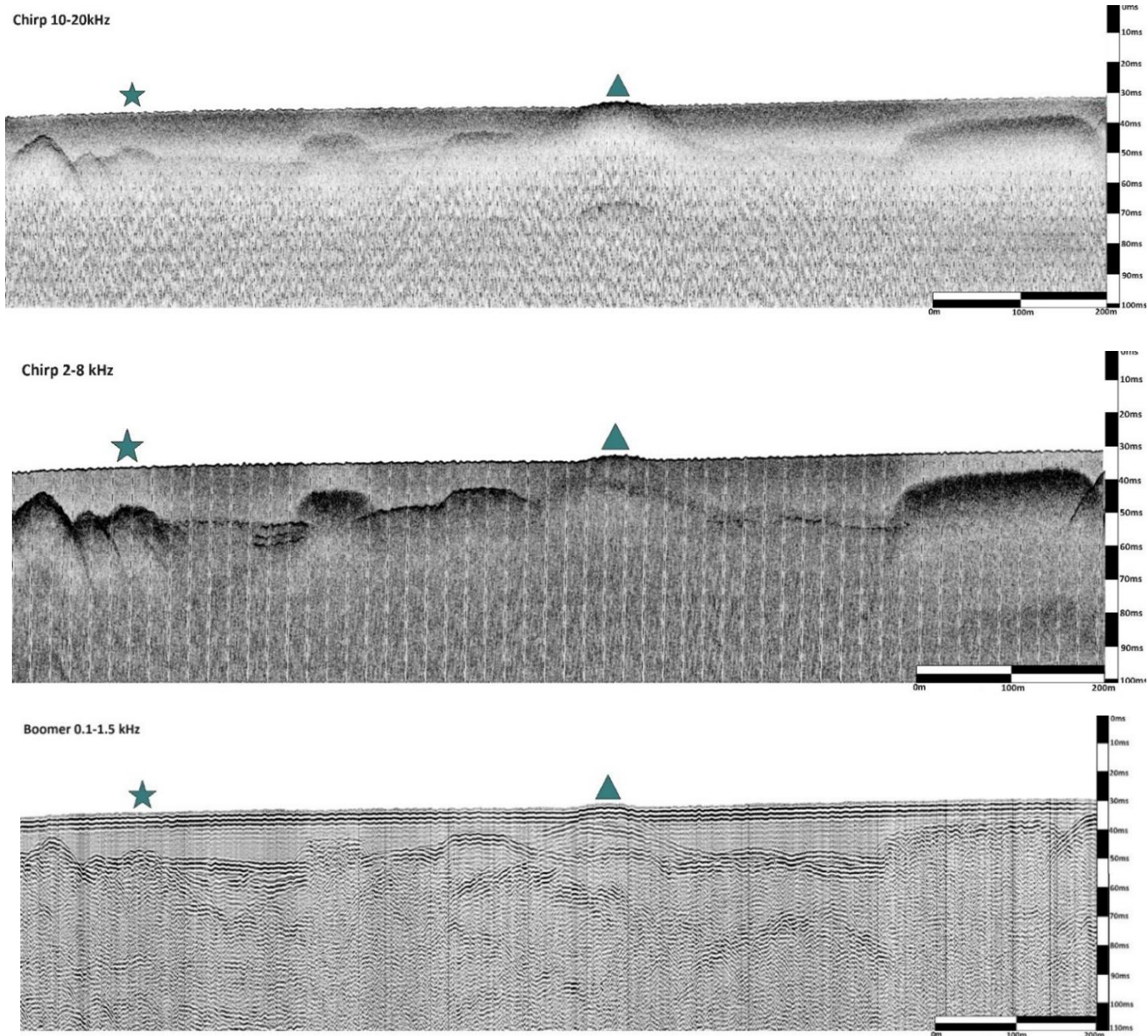
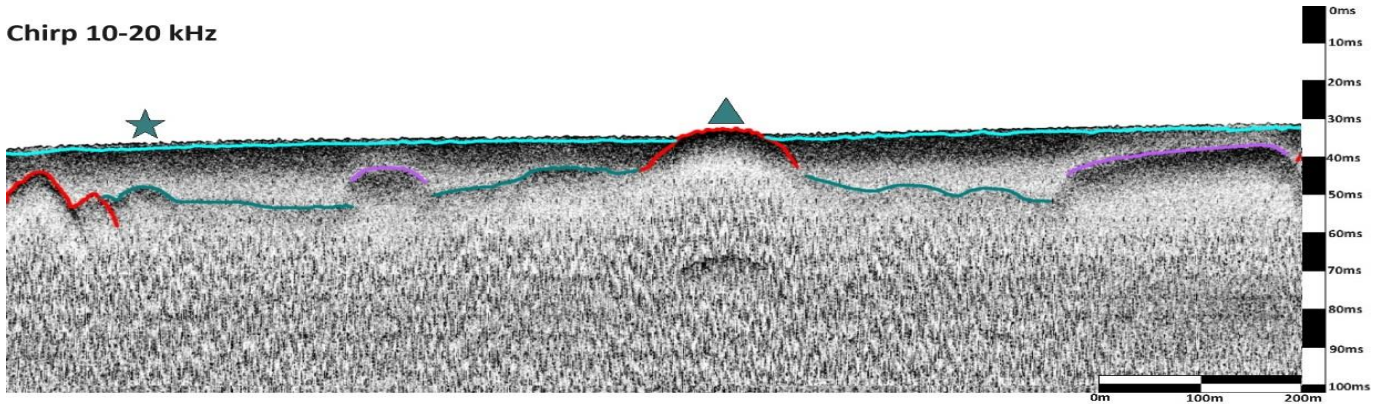
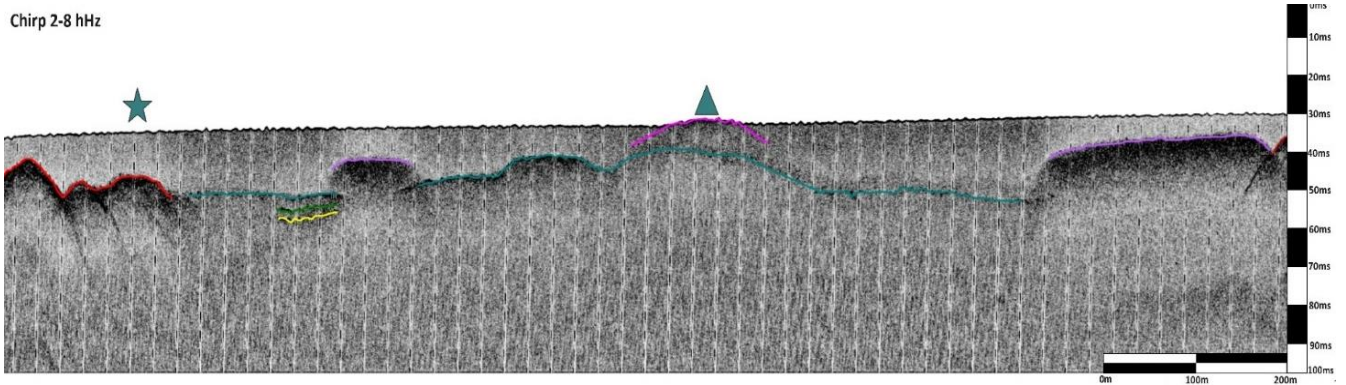


Figure 7: Transect 69071855-2 displayed without interpretation, using dual-frequency CHIRP and Boomer data.

Chirp 10-20 kHz



Chirp 2-8 kHz



Boomer 0.1 - 1.5 kHz

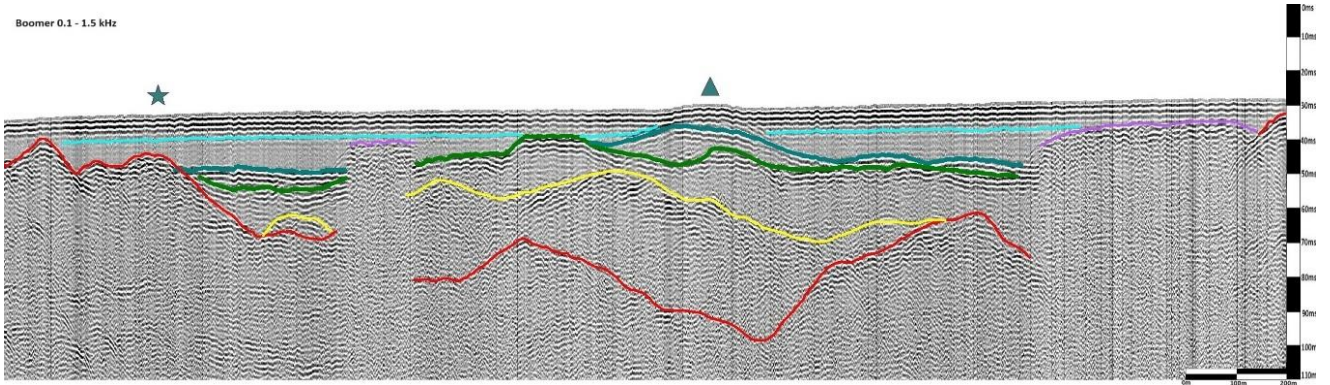


Figure 8: Interpreted transect 69071855-2 across all frequencies. The red line represents the rock basement, while the cyan, teal, green, and yellow lines indicate sedimentary layers. The light purple highlights gas accumulation.

Figure 9 shows transect 69081443 across all frequency ranges without interpretation, while Figure 10 presents the interpreted version.

In the 10-20 kHz CHIRP data, despite exhibiting the lowest penetration compared to other frequencies, the deepest depth of sedimentary layer is 50ms and rock basement is 41ms, three sedimentary layers, gas accumulation, and the rock basement are discernible. However, the reflectors remain diffuse, making the interpretation more complicated.

In the 10-20 kHz CHIRP data, which exhibits the lowest penetration depth, three sedimentary layers, gas accumulation, and the rock basement are detectable, although reflectors

appear diffuse, complicating interpretation. The maximum depth of the sedimentary layers reaches 50 ms, while the rock basement is observed at 41 ms.

The 2-8 kHz data, with higher signal penetration and improved image clarity, reveals five sedimentary layers, a gas accumulation, and the rock basement, with the deepest sedimentary layer at 55 ms and the rock basement at 75 ms. A chaotic layer appears on the left side of the profile, and some diffuse zones complicate the distinction between true stratigraphic horizons and artefacts.

The Boomer system, distinguished by its higher penetration capability, reveals five sedimentary layers and a more extensive rock basement, reaching depths of up to 74 ms. The chaotic layers on the left are more clearly delineated, and the trace demonstrates continuity across sedimentary layers, facilitated by the Boomer's enhanced penetration depth.

In both the 10-20 kHz CHIRP and Boomer data, a light grey sub-superficial layer is observed. However, in the Boomer data, overlap with the bubble pulse complicates a definitive identification of this layer as fluid mud. This horizon is further analysed in a subsequent section of this study.

At the ★ location in the 10-20 kHz CHIRP data, a prominent shallow reflector, interpreted as the rock basement, appears adjacent to a sedimentary layer. In the 2-8 kHz CHIRP data, an intense reflector at this location is also interpreted as the rock basement, though at a greater depth and with wider lateral continuity. In the Boomer data, the rock basement is represented at a deeper depth than in the other systems and there are sediment layers between the seabed and the rock basement. This information significantly impacts the engineering project, influencing structural assessments and critical engineering decisions.

At the ▲ location in the 10-20 kHz CHIRP data, a strong reflector with no signal penetration beneath it aligns with previous transects at the same frequency, suggesting it represents the rock basement. In the 2-8 kHz CHIRP data, the same location reveals a sedimentary feature beneath this reflector, confirming its sedimentary nature, as previously discussed. Although the reflectors are more diffuse, the Boomer data provides a more detailed view of the underlying sedimentary layers.

At the • location in the 10-20 kHz CHIRP data, a weak, diffuse reflector adjacent to the rock basement is interpreted as a sedimentary feature and is highlighted in teal in Figure 10. In the 2-8 kHz SBP data, a stronger reflector at the same spot is interpreted as the rock basement and is highlighted in red. The Boomer data confirms the rock basement at this location and reveals a thin overlying sedimentary layer, consistent with the layer observed in the 10-20 kHz CHIRP data but not discernible in the 2-8 kHz range.

All systems exhibit shallow gas accumulation at depths between 30 and 40ms, represented in light purple as a curtain that obscures underlying strata.

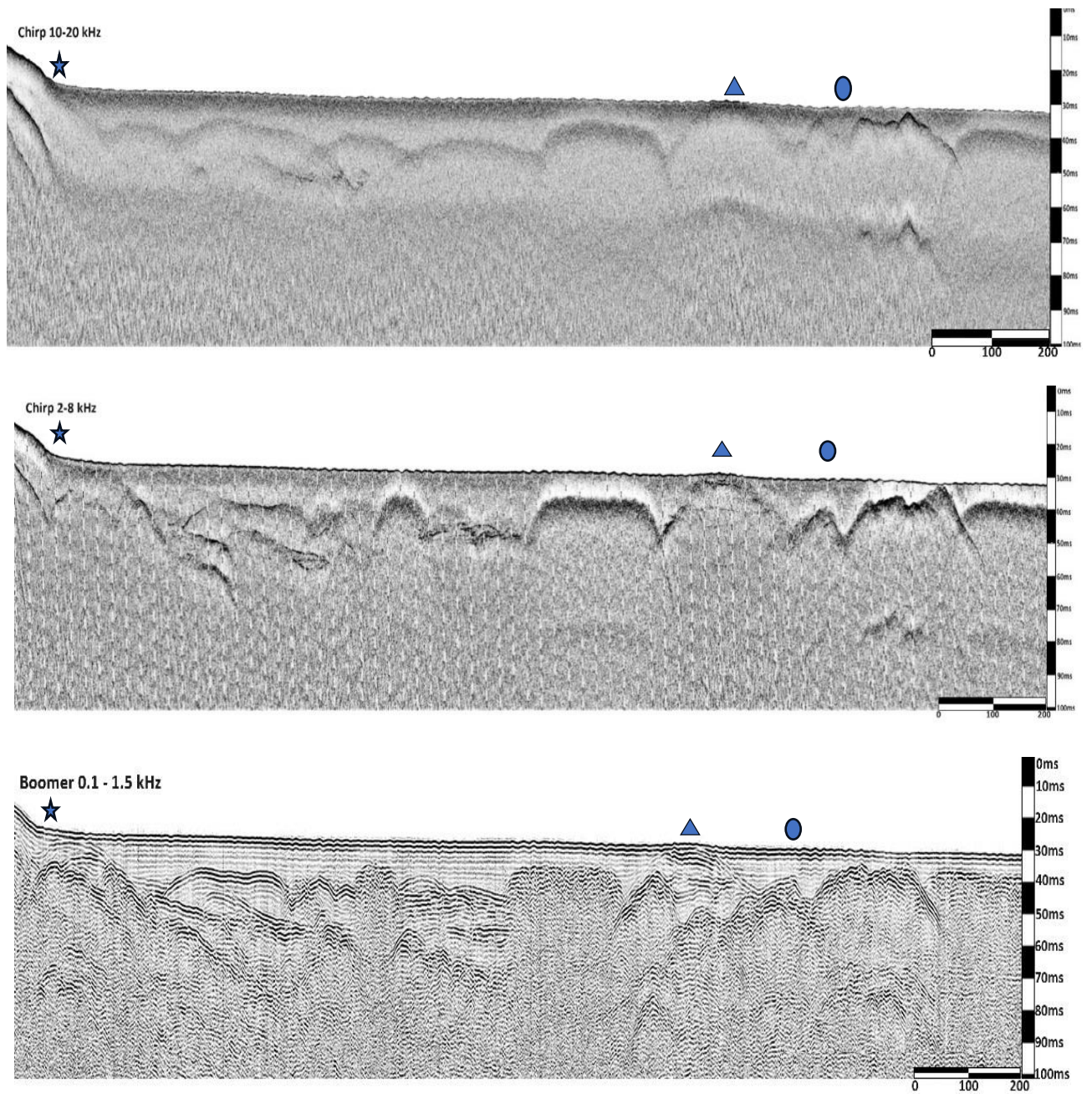


Figure 9: Transect 69081443 displayed without interpretation, using dual-frequency CHIRP and Boomer data.

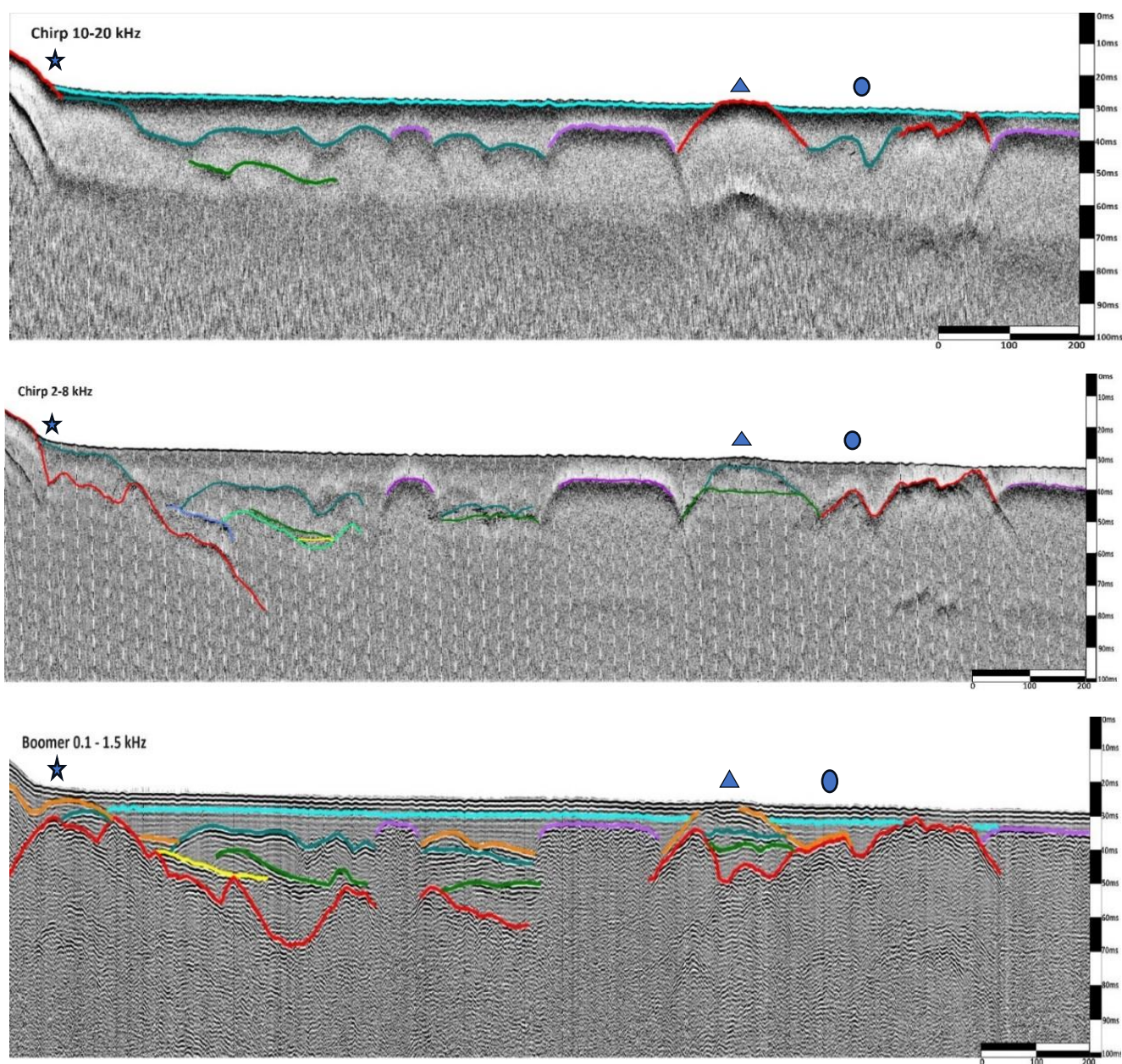


Figure 10: Interpreted transect 69081443 across all frequencies. The red line represents the rock basement, while the cyan, teal, green, yellow, and orange lines indicate sedimentary layers. The light purple highlights gas accumulation.

Gas Accumulation

Comparing gas accumulation in transects 69071855-1 and 69081443 (Figure 11) across all frequencies reveals depth variations. In transect 69071855-1, the CHIRP 10-20 kHz data shows gas accumulation depths between 36.3 and 45.9 milliseconds, the CHIRP 2-8 kHz data between 35.7 and 45.1 milliseconds, and the Boomer data from 36 to 44.8 milliseconds.

For transect 69081443, gas accumulation depths range from 34.4 to 44 milliseconds in the CHIRP 10-20 kHz data, from 34.4 to 40 milliseconds in the CHIRP 2-8 kHz

data, and from 34.8 to 40.4 milliseconds in the Boomer data.

The Boomer system consistently achieves the deepest reflectors, while the CHIRP systems record shallower depths. The peak difference between the CHIRP 2-8 kHz and Boomer data ranges from 0.5 to 1.1 milliseconds.

Gas in seismic data typically causes a polarity inversion due to its lower velocity relative to overlying sediment. These findings highlight the value of multi-frequency analysis for accurately characterising subsurface features like gas accumulation, especially in small-scale marine engineering projects where precise data interpretation is essential.

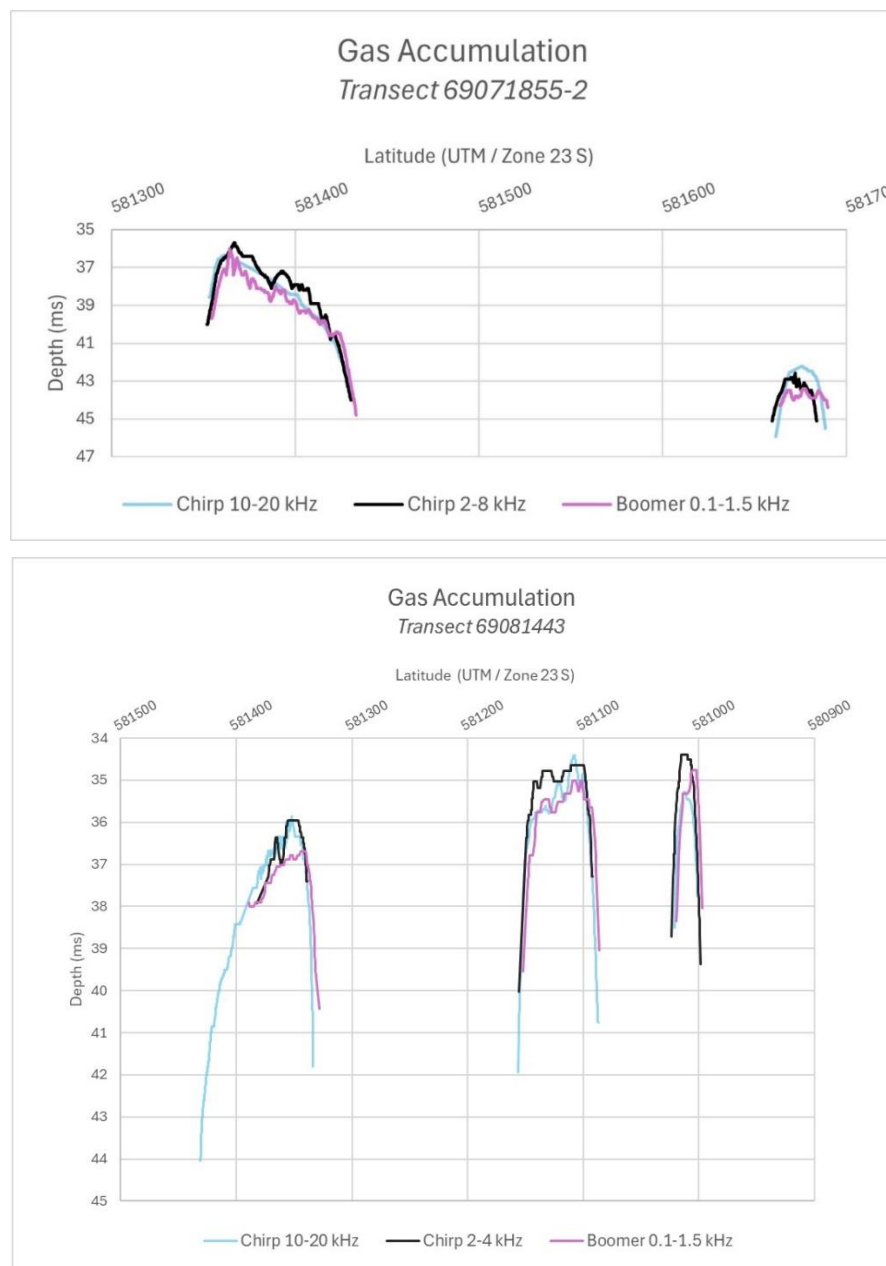


Figure 11: Gas accumulation plots for transects 69071855-1 and 69081443, highlighting depth variations.

First Sedimentary Horizon

Distinct interpretations from each seismic source led to variations in the depths of the first sedimentary layer, offering valuable comparative insights (Figure 12). In the CHIRP 10-20 kHz data, the shallowest sedimentary layer ranges from 23 to 32.6 milliseconds. In the Boomer data, this reflector appears at greater depths, between 29.6 and 36.5 milliseconds, suggesting it may not correspond to the same stratigraphic unit identified in the CHIRP 10-20 kHz data. This discrepancy underscores the complexity of correlating across different seismic sources. Additionally, bubble pulse interference in the Boomer data complicates the interpretation of subsurface layers by obscuring the seismic signature.

The CHIRP 2-8 kHz data reveals a distinct structure, with depths varying from 22.4 to 46.2 milliseconds. This frequency range, however, does not provide clear visualisation of the sedimentary layer parallel to the seafloor, making it less suitable for resolving upper sub-superficial layers like fluid mud in marine environments.

These differences emphasise the importance of evaluating each frequency range's strengths and limitations when interpreting seismic data for marine engineering applications. Considering multiple sources and performing thorough interpretations can significantly inform project approaches, such as dredging.

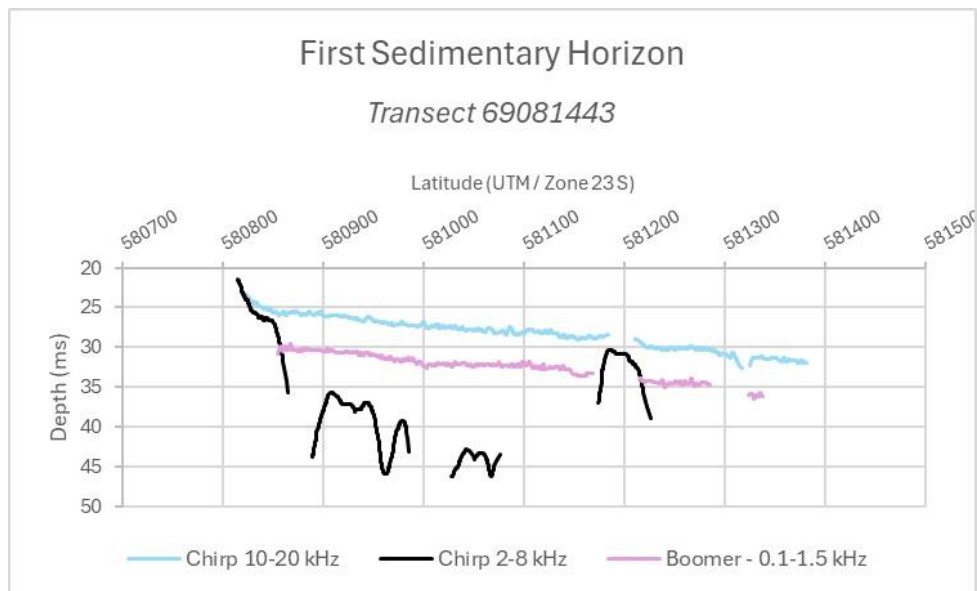


Figure 12: Plot of the first sedimentary layer in transect 69081443, illustrating variations in depth and structure.

Rock Basement

Depth variations in the rock basement across different frequency ranges are substantial (Figure 13). In the CHIRP 10-20 kHz data, basement depths range from 12 to 42.5 milliseconds; in the CHIRP 2-8 kHz data, from 11.3 to 68 milliseconds; and in the Boomer data, from 33.2 to 74.13 milliseconds, representing the deepest profile. These disparities underscore the critical importance of employing multi-frequency seismic sources to obtain a comprehensive subsurface characterisation, regardless of the project scale.

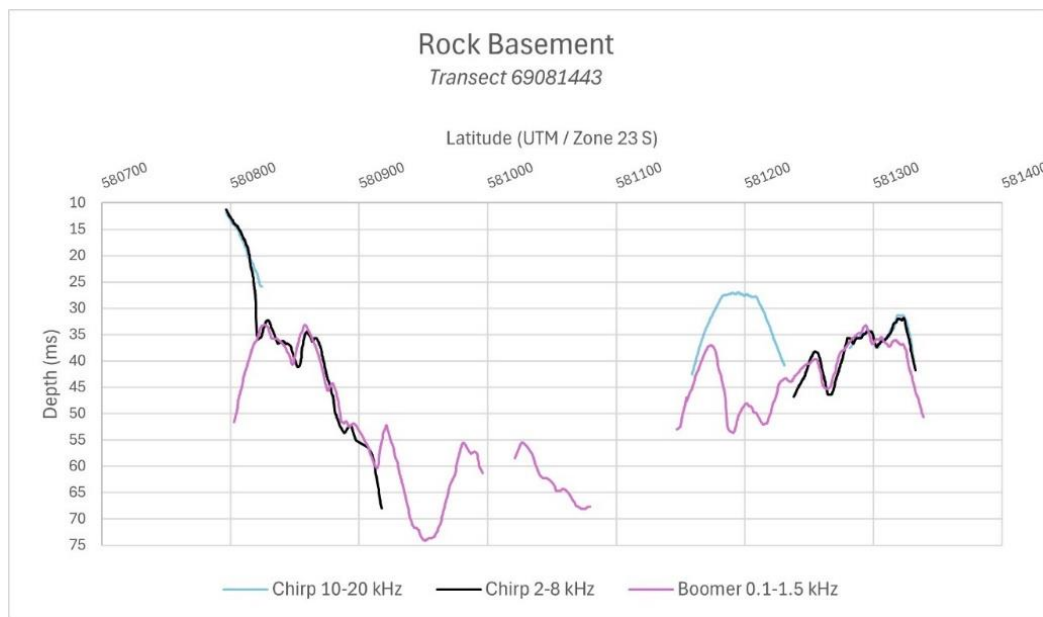
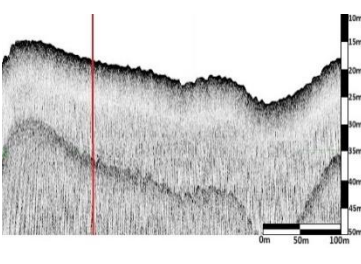
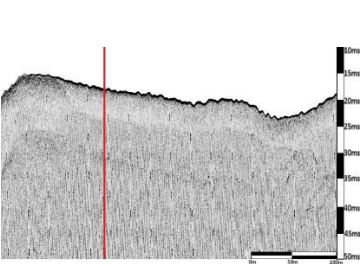
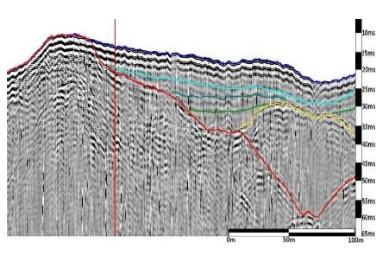
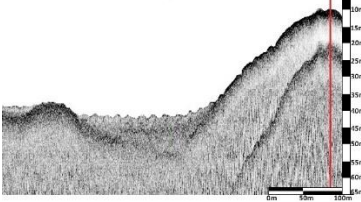
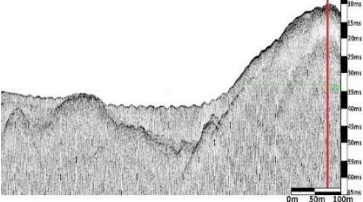
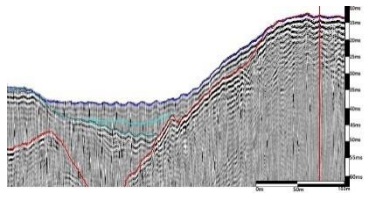


Figure 13: Rock basement profile in transect 69081443, displayed using dual-frequency CHIRP and Boomer data.

Table 1 presents potential interpretations of transect 69072025 and 69072031 obtained from all sources. The intersection point of these transect is denoted by the red line.

Table 1: Transect 69072025 and 69072031 in dual frequency CHIRP and Boomer.

Transect	Echo Character		
	CHIRP 10-20kHz	CHIRP 2-8 kHz	Boomer 0.1-1.5 kHz
69072025			
69072031			

In transect 69072025, the 10-20 kHz CHIRP data shows an intense seabed reflection with no signal penetration, suggesting high acoustic impedance, often associated with a multiple reflector at twice the seafloor depth. In contrast, lower CHIRP frequencies reveal subtle penetration, with a diffuse, discontinuous trace.

The Boomer system's superior penetration allows for deeper basement analysis, revealing four distinct sediment layers, including the rock basement and the first sedimentary horizons, with a thickness of 6 milliseconds at the vertical red line in transect 69072025. In dual-frequency CHIRP, measurement of this layer is not possible.

In transect 69072031, the 10-20 kHz CHIRP data penetrates deeper than in transect 69072025 at the same frequency, displaying a single but diffuse sediment layer. A robust structure on the left side shows intensity similar to the rock basement on the right. In the 2-8 kHz SBP data, sedimentary horizons appear clearer and more defined, improving signal penetration. The same left-side structure appears more intense, suggesting it is not rock but a sedimentary layer, as the Boomer data shows a deeper horizon beneath it.

At the red line intersecting transect 69072025, a 6-millisecond-thick sedimentary layer is visible, whereas it is not discernible in transect 69072031. This discrepancy could result from bubble pulse interference, which can obscure subsurface layers.

At the intersection point of both profiles, indicated by the red line, there is no

signal penetration in the CHIRP 10-20 kHz data of transect 69072025, while in transect 69072031, the signal appears diffuse, preventing conclusive identification of an outcropping rock. This ambiguity could be resolved with additional geophysical data, such as Side Scan Sonar, as suggested by Figure 14, which implies no rock outcrop. Further verification through core sampling, for example with Gravity or Piston Corers, would assist in determining sediment thickness at this location.

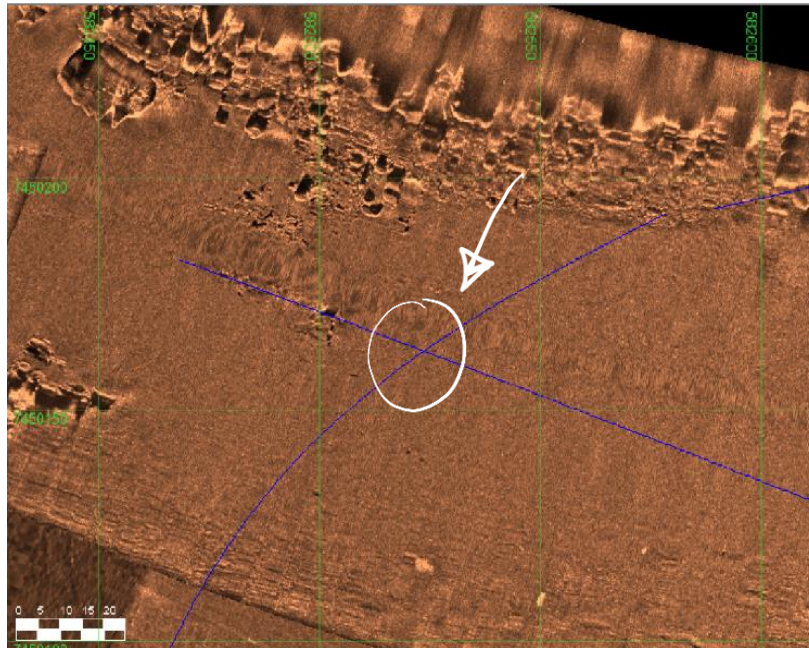


Figure 14: Screenshot of Side Scan Sonar (SSS) data indicating the absence of an outcropping rock at the location discussed in Table 1.

Structural Contour Maps of gas accumulation, the shallowest sedimentary layer, and the rock basement across all frequency ranges were individually plotted as Structural Contour Maps, illustrated in Figure 15. This approach enables a detailed comparison of depths and data density for each feature.

Gas accumulation depths vary across frequency ranges: in the CHIRP 10-20 kHz data, depths range from 34 to 50 milliseconds; in the SBP 2-8 kHz data, from 34.4 to 50 milliseconds; and in the Boomer data, from 33.5 to 53 milliseconds.

While the maps show minimal depth differences on a macro scale, closer examination reveals distinct variations in the shallowest depth values below the seafloor, particularly when each chart is assessed individually.

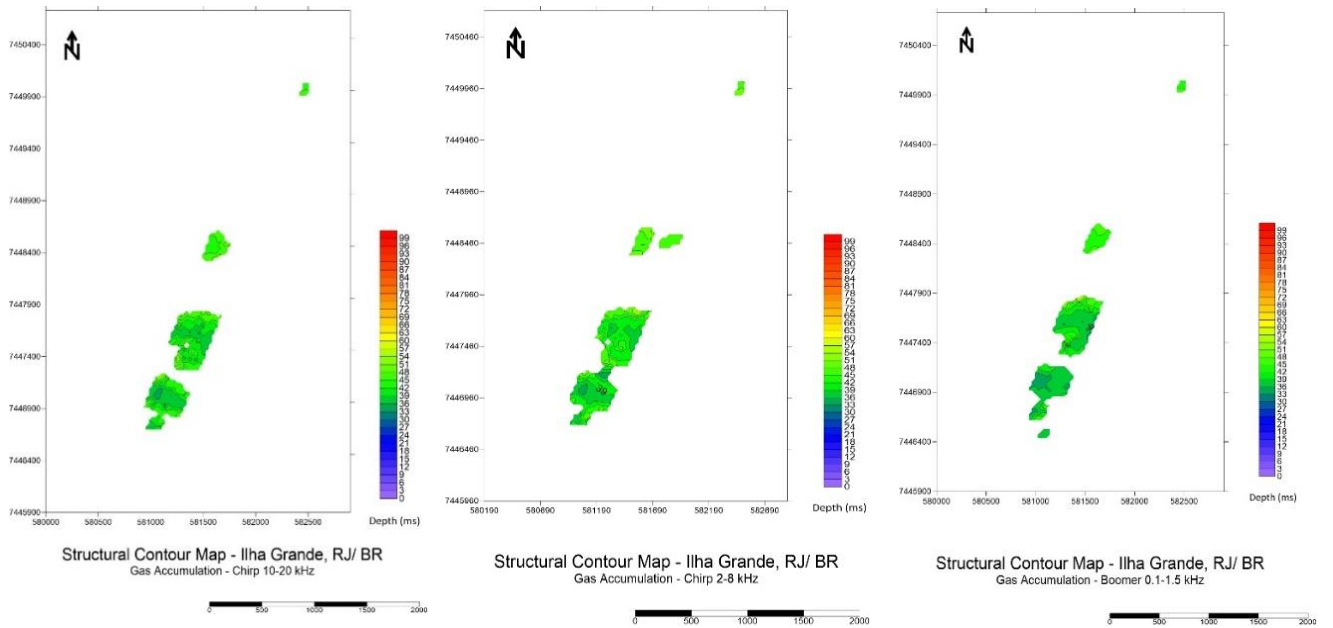


Figure 15: Structure Contour Map of gas accumulation derived from the analysis of Dual Frequency CHIRP and Boomer data.

Figure 16 shows that the first reflector in the CHIRP 10-20 kHz data appears between 24 and 45 milliseconds, with depths shallower in the south, gradually deepening northward, except for a shallow region near the northern rock shore.

In the CHIRP 2-8 kHz data, depths range from 21 to 58 milliseconds, showing a different structure and generally deeper positions than the CHIRP 10-20 kHz. The Boomer data ranges from 18 to 47 milliseconds and shows higher average depths than the CHIRP 10-20 kHz.

The CHIRP 2-8 kHz data reveals the deepest reflector, followed by Boomer, while CHIRP 10-20 kHz captures the shallowest. This suggests that CHIRP 10-20 kHz is better suited for shallow subsurface analysis. Additionally, the bubble pulse in the Boomer data may obscure the shallowest layer.

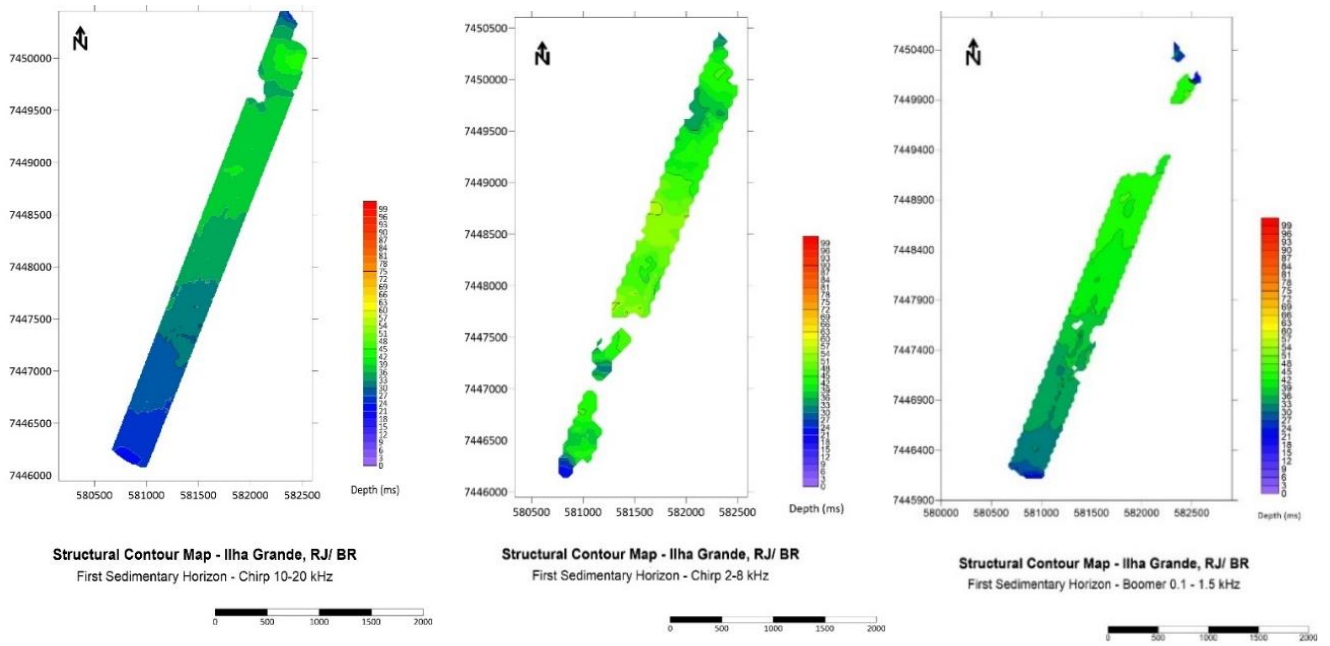


Figure 16: The Structure Contour Map of the first sedimentary horizon derived from the analysis of Dual Frequency CHIRP and Boomer data.

The Structural Contour Map of the rock basement reflector (Figure 17) shows depth variations of 3.08 to 70.1 milliseconds in the CHIRP 10-20 kHz data, 4.86 to 77.1 milliseconds in the CHIRP 2-8 kHz data, and 5.6 to 97.5 milliseconds in the Boomer data.

This map highlights the superior penetration capability and higher data density achieved with the Boomer system, attributed to the deeper reflectors. It reaffirms that lower frequencies provide greater penetration due to their longer wavelength.

Interestingly, the higher frequency CHIRP data shows greater coverage and shallower depths than the lower frequency counterpart. This discrepancy results from a prior misinterpretation of the rock basement, which has now been confirmed as a sedimentary feature.

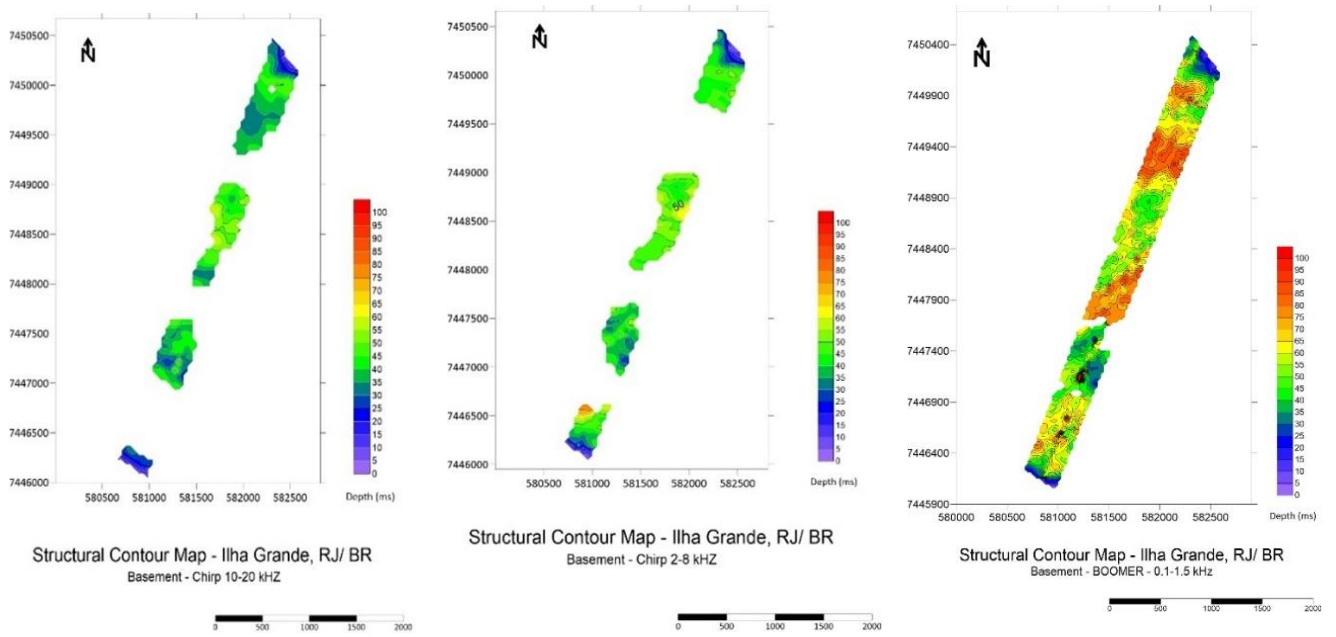


Figure 17: Structural Contour Map of the rock basement horizon based on Dual Frequency CHIRP and Boomer data analysis.

V. Conclusion

The use of integrated multifrequency seismic surveys is essential for reducing interpretative errors caused by artefacts like subsurface bubble pulses, particularly in Boomer data. These artefacts, generated by the seismic pulse in single-channel surveys, often obscure layers just below the seabed, affecting interpretative accuracy. Multifrequency surveys enhance marine engineering applications by enabling geological characterisation at multiple scales, thereby reducing operational costs and improving analytical precision.

Lin et al. (2009) observed that sandy sediments typically inhibit acoustic wave penetration, restricting the imaging of underlying strata. In contrast, muddy sediments permit greater wave penetration, enabling clearer delineation of subsurface structures.

The CHIRP system, particularly at 10-20 kHz, offers high horizontal resolution and reveals contrasts in subsurface features at equivalent depths, suggesting variations in acoustic impedance valuable for submarine engineering. This resolution is critical for mapping fluid mud layers, a key factor in high-precision subsurface analysis. However, the 10-20 kHz range has limited penetration in some sedimentary features, which may result in misinterpretations, potentially mistaking sedimentary layers for bedrock. Subsequent analyses with other frequencies

confirm that many such features are sedimentary rather than bedrock, highlighting the need for multi-frequency data to avoid errors.

While the 2-8 kHz CHIRP data provide enhanced penetration relative to the 10-20 kHz range, they are less effective for high-resolution tasks such as fluid mud layer mapping. The Boomer system's greater penetration capability complements the CHIRP systems, allowing deeper sediment analysis and supporting cost-effective, informed project planning. The integration of these systems maintains resolution across scales, optimising both operational efficiency and interpretation accuracy.

Despite the advantages of multifrequency surveys in resolving interpretative challenges, some ambiguities remain, as shown in Table 1. Therefore, integrating direct sediment sampling, such as with Gravity or Piston Corers, is essential to verify sediment depth and structure conclusively.

VI. References

- AMADOR, E., 1987. Geologia e geomorfologia da planície costeira da Praia do Sul - Ilha Grande - Uma contribuição à elaboração do plano diretor da reserva biológica. *Anuário do Instituto de Geociências, Rio de Janeiro, RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, pp. 35-58.
- AYRES NETO, A., 2000. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Brazilian Journal of Geophysics*.
- AYRES NETO, A., 2000. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Revista Brasileira de Geofísica*. v.18(3), pp. 241-255.
- AYRES NETO, A. & BAPTISTA NETO, J. A., 2004. Métodos diretos e indiretos de investigação do fundo oceânico. In: *Introdução à Geologia Marinha*. Rio de Janeiro: s.n., pp. 127-151.
- AZEVEDO, L., n.d. *Processos sedimentares da Bacia Central de Bransfield, Antártica, a partir de evidências morfológicas, backscatter e sísmica de alta resolução*. Niterói(Rio de Janeiro): s.n.
- BELO, W. C., DIAS, G. & SPERLE, M., 2002. O fundo marinho da Baía da Ilha Grande, RJ: o relevo submarino e a sedimentação no canal central. *Revista Brasileira de Geofísica*. v. 20(1).
- DAMUTH, J. E., 1975. Echo character of the western equatorial Atlantic floor and Itú relationship to the dispersal and distribution of terrigenous sediments. *Marine Geology*; v. 18. n. 2155., pp. 17-45.
- DAMUTH, J. E. & HAYES, D. E., 1977. Echo Character of the East Brazilian Continental Margin and Its Relationship to Sedimentary Processes. *Marine Geology*. v. 24.n. 2489, pp. 73-95.
- DUCHESNE, M. J. & BELLEFLEUR, G., 2007. *Processing of single-channel, high-resolution seismic data collected in the St. Lawrence estuary, Quebec*. s.l.:s.n.
- DUCK, R. W. & HERBERT, R. A., 1992. Acoustical characterization of seafloor sediments and its relationship to active sedimentary processes in Cook Strait, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. v. 35, pp. 289-300.
- DUCK, R. W. & HERBERT, R. A., 2006. High-resolution shallow seismic identification of gas escape features in the sediments of Loch Tay, Scotland: tectonic and microbiological associations. *Sedimentology*. v. 53, p. 481-493..

EDGETECH, 2019. *3200-XS Sub bottom system. User hardware manual*. [Online]
Available at: https://www.edgetech.com/wp-content/uploads/2019/07/0004840_REV_E.pdf
[Accessed 18 08 2023].

EDGETECH, 2019. *4125 – SAR Side Scan Sonar System Manual*. [Online]
Available at: <https://www.edgetech.com/wp-content/uploads/2019/07/4125-SAR-Brochure-012219-LR.pdf>
[Accessed 07 07 2023].

EVANS, G., HOLLAND, D. & SOUZA, L. A. P., 2017. Scouting for Energy Cable Route for an Island off Rio. *Sea Technology*, pp. 14-16.

FONTOURA, C., 2001. *Caracterizac ao do Canal Central Da Baia Da Ilha Grande Com Base em Sismica Rasa de 7,0 Khz*. Niterói(Rio de Janeiro): s.n.

IAGC, 2002. *Marine Seismic Operations*. s.l.:s.n.

IGUATEMY, M. A. & AYRES NETE, A., 2010. Estudo comparativo entre fontes sísmicas de alta resolução que utilizam tecnologia Chirp e sistemas paramétricos. *IV Simpósio Brasileiro de Geofísica*.

JUDD, A., 2004. Natural seabed gas seeps as source of atmospheric methane. *Environmental Geology*. v.46, pp. 988-996.

JUDD, . A. & HOVLAND, M., 1992. The evidence of shallow gas in marine sediments. *Continental Shelf Research*. v. 12(10), pp. 1081-1095.

KHUN, G. & WEBER, M. E., 1993. Acoustical characterization of sediments by Parasound and 3.5 kHz systems: Related sedimentary process on the southeastern Weddel Sean Continental slope, Antarctica. *Marine. Geology*. v. 113, pp. 201-217.

LIN, Y.-T., SCHUETTPELZ, C., WU, G. & FRATTA, D., 2009. A combined coustic and eletromagnetic wave-based techniques for bathymetry and subbottom profiling in shallow waters. *Journal of Applied Geophysiscs*, Volume 68, pp. 203-218.

LOWAG, J. & VAN DEN HEUVEL, M., 2002. Advanced Sub-Bottom Profiler Equipment for Soil Investigation Campaigns During Dredging Projects. *Port Technology International*.

MAGRANI, F. & AYRES NETO, A., 2014. Seismic characteristics and Sedimentary distribution on the south Shetland Islands Continental Margin, Antarctica.. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.32, pp. 549-560.

MAHIQUES, M. M., 1987. *Considerações sobre os sedimentos de superfície de fundo da Baía da Ilha Grande, estado do Rio de Janeiro*. São Paulo: s.n.

MEDEIROS, M. F., 2006. *Estudo da Sequência sedimentar holocênica das baías da Ribeira e Parati (Baía da Ilha Grande – RJ) através de métodos sísmicos e análises de testemunhos..* Niterói(Rio de Janeiro): s.n.

MUNIZ, A. L. L., 2023. *Aplicação de inversão sísmica para uma caracterização geotécnica robusta dos sedimentos marinhos do campo de Jubarte na Bacia de Campos*. Niterói(Rio de Janeiro): s.n.

OLIVEIRA E SILVA, A. C., 1999. *O controle litológico-estrutural na evolução da morfologia das bacias de drenagem da Ilha Grande, RJ*. Rio de Janeiro: s.n.

PINTO RIBEIRO, L. et al., 2015. *Determination of the base of the slope region in continental margins dominated by a long-slope depositional processes - the case of Madeira Island lower slope (Central Atlantic)*. Málaga: s.n.

PREMCHITT, J. et al., 1993. A study of gas in marine sediments in Hong Kong. *Continental Shelf Research*. v.12, pp. 1251-1264.

RAFAELSEN, B., 2002. *Seismic Resolution and Frequency Filtering..* s.l.:s.n.

ROQUE, C. et al., n.d. The Boomer sound source as a tool for shallow water geophysical exploration. *Marine Geophysical Researches*. v.26, pp. 171-181.

- SGB, 2022. *Projeto de Prospeção e Exploração de Sulfetos Polimetálicos Maciços na Cordilheira Mesoatlantica Equatorial. Série de Recursos Minerais Marinhos..* s.l.:Serviço Geológico do Brasil.
- SILVA, R., 2015. *Contribuições para a reconstrução paleoambiental holocênica da planície costeira das praias de Sul e de Leste – Ilha Grande, RJ.* Niterói(Rio de Janeiro): s.n.
- SIMPKIN, P., 2005. The Boomer Sound Source as a Tool for Shallow Water Geophysical Exploration. *Marine Geophysical Researches*, Volume 26, pp. 171-181.
- SOUZA, L. A. P., 2006. *Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas.* São Paulo: s.n.
- SOUZA, L. A. P., AZEVEDO, A. A. & DA SILVA, M., 2013. Side Scan Sonar Applied to water reservoir. *IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium.*
- TEIXEIRA, B. P. & AYRES NETO, A., 2017. Implementation of processing techniques in single-channel high-resolution seismic data. *IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics)*, pp. 1-8.
- TELEDYNE, 2017. *2D multibeam Dual-Frequency Imaging Sonar manual.* [Online] Available at: https://videoray.com/images/specsheets/2017_BV_V9002250_-_V2.pdf [Accessed 07 08 2023].
- VAN REENAN, E. D., 1964. Subsurface Exploration by Sonar Seismic Systems. *Symposium on soil Exploration.*
- WESCHENFELDER, J. et al., 2016. The control of paleotopography in the preservation of shallow gas accumulation: Examples from Brazil, Argentina and South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science. V. 172*, pp. 93-107.
- WEVER, F. et al., 1998. hallow gasin the muddy sediments of Eckerforde Bay, Germany. *ContinentalShelf Research. v. 18* , pp. 1715-1739.

6. Conclusões

A realização de levantamentos sísmicos multifrequência integrados é essencial para a mitigação de erros interpretativos decorrentes de artefatos, como o pulso bolha em subsuperfície. Este artefato, gerado pela energia do pulso sísmico em levantamentos monocanal, tende a mascarar as camadas imediatamente abaixo do fundo marinho, comprometendo a precisão da interpretação dessas estruturas. Os levantamentos sísmicos multifrequência oferecem vantagens significativas, como por exemplo para a instalação de cabos submarinos, pois permitem a caracterização das propriedades geológicas do subfundo em diferentes escalas, resultando em uma redução dos custos operacionais e em análises de maior precisão.

Este trabalho corrobora com o de Lin et al., 2009 onde afirmou que sedimentos arenosos geralmente não permitem ou pouco permitem a penetração da onda acústica e consequentemente não é possível visualizar as camadas e estruturas (LIN, et al., 2009). E em sedimentos lamosos há penetração e é possível visualizar as camadas sedimentares e estruturas abaixo do assoalho.

Segundo Lin et al., 2009, sedimentos arenosos geralmente não permitem ou permitem pouca a penetração da onda acústica por meio de equipamentos sísmicos de maior frequência. Consequentemente, é mais difícil ou impossível visualizar camadas sedimentares e estruturas geológicas mais profundas. A presença de sedimentos mais lamosos permite a penetração do sinal acústico, possibilitando uma investigação mais profunda. No entanto, os dados do CHIRP de 10-20 kHz mantêm uma resolução horizontal superior, facilitando a observação das configurações de feições sedimentares e sua natureza contrastante com sinais adjacentes em profundidades equivalentes. Esse contraste indica uma maior impedância acústica, oferecendo insights significativos para a engenharia civil submarina. Além disso, essa faixa de frequência facilita o mapeamento das camadas em sub-superfície, como camada de lama fluida, um aspecto crítico para projetos que exigem uma análise subsuperficial meticulosa com alta resolução. Por outro lado, esta mesma visualização detalhada é inatingível com os dados dos sistemas 2-8 kHz e Boomer.

Embora o sistema CHIRP possa preservar e fornecer insights valiosos, também pode levar a interpretações errôneas devido à incapacidade do sinal acústico de penetrar em certas características sedimentares. Consequentemente, essas características podem ser erroneamente identificadas como embasamento rochoso. Análises subsequentes utilizando as outras frequências demonstraram que muitas dessas características são, na verdade, de natureza sedimentar. Essa limitação representa um risco para interpretações equivocadas, especialmente evidenciado nos dados CHIRP 10-20 kHz.

Os dados SBP de 2-8 kHz apresentam um valor notável para análise devido à sua maior penetração das ondas acústicas em comparação com os dados CHIRP 10-20 kHz, juntamente com sua capacidade de preservação da resolução. No entanto, não é tão adequado quanto ao sistema CHIRP 10-20 kHz para análise sub-superficial, como camadas de lama fluida.

A incorporação do sistema Boomer no levantamento contribui significativamente para a mitigação de riscos e potenciais variações na trajetória do projeto, devido à sua capacidade aprimorada de penetração em comparação com os sistemas CHIRP. Tal capacidade proporciona uma análise mais profunda das camadas sedimentares, permite um planejamento mais embasado e eficiente em termo de custo-benefício. A utilização desses sistemas integrados mantém a resolução e reduz a perda de detalhes em diversas escalas, resultando em uma redução dos custos operacionais e do tempo de execução.

No entanto, apesar do levantamento multifrequencia esclarecer muitas questões para o intérprete e enriquecer as análises com mais detalhes, como apresentado neste estudo na discussão da Tabela 1, eventualmente não resolve certas perguntas, portanto necessita-se integrar coletas de amostras sedimentares, como as obtidas pelo Gravity/Piston Corer ou outro método direto para determinar definitivamente a profundidade sedimentar.

7. Referências Bibliográficas

- AMADOR, E., 1987. Geologia e geomorfologia da planície costeira da Praia do Sul - Ilha Grande - Uma contribuição à elaboração do plano diretor da reserva biológica. *Anuário do Instituto de Geociências, Rio de Janeiro, RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, pp. 35-58.
- AYRES NETO, A., 2000. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Brazilian Journal of Geophysics*.
- AYRES NETO, A., 2000. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Revista Brasileira de Geofísica*. v.18(3), pp. 241-255.
- AYRES NETO, A. & BAPTISTA NETO, J. A., 2004. Métodos diretos e indiretos de investigação do fundo oceânico. Em: *Introdução à Geologia Marinha*. Rio de Janeiro: s.n., pp. 127-151.
- AZEVEDO, L., s.d. *Processos sedimentares da Bacia Central de Bransfield, Antártica, a partir de evidências morfológicas, backscatter e sísmica de alta resolução*. Niterói(Rio de Janeiro): s.n.
- BELO, W. C., DIAS, G. & SPERLE, M., 2002. O fundo marinho da Baía da Ilha Grande, RJ: o relevo submarino e a sedimentação no canal central. *Revista Brasileira de Geofísica*. v. 20(1).
- DAMUTH, J. E., 1975. Echo character of the western equatorial Atlantic floor and its relationship to the dispersal and distribution of terrigenous sediments. *Marine Geology*; v. 18. n. 2155., pp. 17-45.
- DAMUTH, J. E. & HAYES, D. E., 1977. Echo Character of the East Brazilian Continental Margin and Its Relationship to Sedimentary Processes. *Marine Geology*. v. 24.n. 2489, pp. 73-95.
- DUCHESNE, M. J. & BELLEFLEUR, G., 2007. *Processing of single-channel, high-resolution seismic data collected in the St. Lawrence estuary, Quebec*. s.l.:s.n.
- DUCK, R. W. & HERBERT, R. A., 1992. Acoustical characterization of seafloor sediments and its relationship to active sedimentary processes in Cook Strait, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. v. 35, pp. 289-300.
- DUCK, R. W. & HERBERT, R. A., 2006. High-resolution shallow seismic identification of gas escape features in the sediments of Loch Tay, Scotland: tectonic and microbiological associations. *Sedimentology*. v. 53, p. 481–493..
- EDGETECH, 2019. *3200-XS Sub bottom system. User hardware manual*. [Online] Available at: https://www.edgetech.com/wp-content/uploads/2019/07/0004840_REV_E.pdf [Acesso em 18 08 2023].
- EDGETECH, 2019. *4125 – SAR Side Scan Sonar System Manual*. [Online] Available at: <https://www.edgetech.com/wp-content/uploads/2019/07/4125-SAR-Brochure-012219-LR.pdf> [Acesso em 07 07 2023].
- EVANS, G., HOLLAND, D. & SOUZA, L. A. P., 2017. Scouting for Energy Cable Route for an Island off Rio. *Sea Technology*, pp. 14-16.
- FONTOURA, C., 2001. *Caracterização do Canal Central Da Baía Da Ilha Grande Com Base em Sísmica Rasa de 7,0 Khz*. Niterói(Rio de Janeiro): s.n.
- IAGC, 2002. *Marine Seismic Operations*. s.l.:s.n.
- IGUATEMY, M. A. & AYRES NETO, A., 2010. Estudo comparativo entre fontes sísmicas de alta resolução que utilizam tecnologia Chirp e sistemas paramétricos. *IV Simpósio Brasileiro de Geofísica*.
- JUDD, A., 2004. Natural seabed gas seeps as source of atmospheric methane. *Environmental Geology*. v.46, pp. 988-996.

JUDD, . A. & HOVLAND, M., 1992. The evidence of shallow gas in marine sediments. *Continental Shelf Research*. v. 12(10), pp. 1081-1095.

KHUN, G. & WEBER, M. E., 1993. Acoustical characterization of sediments by Parasound and 3.5 kHz systems: Related sedimentary process on the southeastern Weddel Sean Continental slope, Antarctica. *Marine. Geology*. v. 113, pp. 201-217.

LIN, Y.-T., SCHUETTPELZ, C., WU, G. & FRATTA, D., 2009. A combined coustic and eletromagnetic wave-based techniques for bathymetry and subbottom profiling in shallow waters. *Journal of Applied Geophysiscs*, Volume 68, pp. 203-218.

LOWAG, J. & VAN DEN HEUVEL, M., 2002. Advanced Sub-Bottom Profiler Equipment for Soil Investigation Campaigns During Dredging Projects. *Port Technology International*.

MAGRANI, F. & AYRES NETO, A., 2014. Seismic characteristics and Sedimentary distribution on the south Shetland Islands Continental Margin, Antarctica.. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.32, pp. 549-560.

MAHIQUES, M. M., 1987. *Considerações sobre os sedimentos de superfície de fundo da Baía da Ilha Grande, estado do Rio de Janeiro*. São Paulo: s.n.

MEDEIROS, M. F., 2006. *Estudo da Sequência sedimentar holocênica das baías da Ribeira e Parati (Baía da Ilha Grande – RJ) através de métodos sísmicos e análises de testemunhos..* Niterói(Rio de Janeiro): s.n.

MUNIZ, A. L. L., 2023. *Aplicação de inversão sísmica para uma caracterização geotécnica robusta dos sedimentos marinhos do campo de Jubarte na Bacia de Campos*. Niterói(Rio de Janeiro): s.n.

OLIVEIRA E SILVA, A. C., 1999. *O controle litológico-estrutural na evolução da morfologia das bacias de drenagem da Ilha Grande, RJ*. Rio de Janeiro: s.n.

PINTO RIBEIRO, L. et al., 2015. *Determination of the base of the slope region in continental margins dominated by a long-slope depositional processes - the case of Madeira Island lower slope (Central Atlantic)*. Málaga: s.n.

PREMCHITT, J. et al., 1993. A study of gas in marine sediments in Hong Kong. *Continental Shelf Research*. v.12, pp. 1251-1264.

RAFAELSEN, B., 2002. *Seismic Resolution and Frequency Filtering..* s.l.:s.n.

ROQUE, C. et al., s.d. The Boomer sound source as a tool for shallow water geophysical exploration. *Marine Geophysical Researches*. v.26, pp. 171-181.

SGB, 2022. *Projeto de Prospecção e Exploração de Sulfetos Polimetálicos Maciços na Cordilheira Mesoatlancia Equatorial. Série de Recursos Minerais Marinhos..* s.l.:Serviço Geológico do Brasil.

SILVA, R., 2015. *Contribuições para a reconstrução paleoambiental holocênica da planície costeira das praias de Sul e de Leste – Ilha Grande, RJ*. Niterói(Rio de Janeiro): s.n.

SIMPKIN, P., 2005. The Boomer Sound Source as a Tool for Shallow Water Geophysical Exploration. *Marine Geophysical Researches*, Volume 26, pp. 171-181.

SOUZA, L. A. P., 2006. *Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas*. São Paulo: s.n.

SOUZA, L. A. P., AZEVEDO, A. A. & DA SILVA, M., 2013. Side Scan Sonar Applied to water reservoir. *IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium*.

TEIXEIRA, B. P. & AYRES NETO, A., 2017. Implementation of processing techniques in single-channel high-resolution seismic data. *IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics)*, pp. 1-8.

TELEDYNE, 2017. *2D multibeam Dual-Frequency Imaging Sonar manual*. [Online] Available at: https://videoray.com/images/specsheets/2017_BV_V9002250_-_V2.pdf [Acesso em 07 08 2023].

VAN REENAN, E. D., 1964. Subsurface Exploration by Sonar Seismic Systems. *Symposium on soil Exploration*.

WESCHENFELDER, J. et al., 2016. The control of paleotopography in the preservation of shallow gas accumulation: Examples from Brazil, Argentina and South Africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. V. 172, pp. 93-107.

WEVER, F. et al., 1998. hallow gasin the muddy sediments of Eckerforde Bay, Germany. *ContinentalShelf Research*. v. 18 , pp. 1715-1739.