

**Universidade Federal do Pará  
Instituto de Geociências  
Programa de Pós-Graduação em Geofísica**

**FÁBIO KIYOSHI WATANABE**

**MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE SÍSMICA RASA EM FUNDOS  
SUBMERSOS NO BAIXO CURSO DO RIO AMAZONAS**

**BELÉM-PARÁ**

**MARÇO - 2015.**

**FÁBIO KIYOSHI WATANABE**

**MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE SÍSMICA RASA EM FUNDOS  
SUBMERSOS NO BAIXO CURSO DO RIO AMAZONAS**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica – CPGF do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará-UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rollnic.

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro.

**BELÉM**

**2015**

**FÁBIO KIYOSHI WATANABE**

**MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE SÍSMICA RASA EM FUNDOS  
SUBMERSOS NO BAIXO CURSO DO RIO AMAZONAS**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica – CPGF do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará-UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

Data de Aprovação: 02/12/2014

Conceito: **Excelente**

Banca Examinadora:



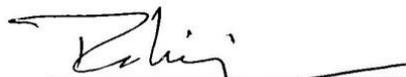
---

Prof. Marcelo Rollnic – Orientador  
Doutor em Oceanografia  
Universidade Federal do Pará



---

Prof. Roberto Vizeu Lima Pinheiro - Membro  
Doutor em Geologia Estrutural  
Universidade Federal do Pará



---

Prof. Maamar El-Kobrini - Membro  
Doutor em Physiographie des Océans et des Littoraux  
Universidade Federal do Pará

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)  
(Biblioteca do Instituto de Geociências/UFPA)

---

Watanabe, Fábio Kiyoshi, 1987-

Métodos de processamento de sísmica rasa em fundos submersos no baixo curso do rio Amazonas / Fábio Kiyoshi Watanabe. – 2015.

103 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Marcelo Rollnic

Coorientador: Roberto Vizeu Lima Pinheiro

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2014.

1. Método de reflexão sísmica. 2. Geofísica marinha – Rio Amazonas. I. Título.

CDD 22. ed. 622.1592

---

**Em memória a Odete Fátima Machado da Silveira,  
minha eterna professora da vida.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica – CPGF pelo momento de felicidade que é concluir mais uma etapa na minha carreira de cientista e tornar-se mestre em geofísica marinha.

A minha guerreira mãe que sempre me acompanhou nos melhores e piores momentos, pai e mãe ao mesmo tempo, devo a você esse feito em minha vida. Agradeço a minhas irmãs por me aturarem em casa e me ajudarem no que era necessário, a minha avó que sempre foi como uma segunda mãe e me ajudou a ser a pessoa que sou hoje, ao meu tio Humberto que sempre me ensinou a ser um cidadão honesto e justo. Devo a vocês minha vitória.

Ao meu mestre e filósofo Daisaku Ikeda, sempre preocupado no bem da humanidade, grande humanista e lutador dos direitos humanos, aos amigos da organização BSGI (Brasil Soka Gakai Internacional), que sempre estiveram me apoiando e me ajudando-nos mais diversos problemas de minha vida. Em especial, ao Sr. José Maria, mais conhecido como Zé, meu muito obrigado por sempre está disponível para me dar conselhos, ao Adriano Vasco e Marcio Vinicius, grandes amigos e companheiros que irei pra sempre lembrar.

A minha eterna e querida professora e toda sua família, Odete Fátima Machado da Silveira mulher digna, honesta, sincera, mãe e demais adjetivos que a completam como uma admirável pessoa, e que acreditou em mim por todos esses anos de curso, nos melhores e piores momentos, sempre sendo uma grande mãe nos acolhendo e protegendo, a finalização desse trabalho é o meu muito obrigado por ter a oportunidade de trabalhar com a senhora.

A minha eterna gratidão ao professor Marcelo Rollnic, por ter me acolhido em um momento tão difícil, a perda de nossa orientadora, além de ajudar de maneira significativa na concretização do trabalho. Sua ajuda foi determinante para esse final de etapa.

Um obrigado aos meus amigos de mestrado, Alberto Jacques, Aldo Fernandes, Camila Furtado e Caio Nascimento, que juntos aceitamos esse imenso desafio de fornecer conhecimentos e propagar nossas habilidades aos demais, sempre com muito esforço e dedicação.

Aos amigos do laboratório LIOG, grande parceiro, amigo e irmão, Artur Gustavo pelos momentos de amizade e momentos difíceis, a grande ajuda de Priscila Gozzi que há muito tempo vem compartilhando momentos emocionantes na minha vida e me ajudando de todas as

formas, Lidiane Araújo, Amanda Oliveira, Andrey Ferreira, André Luíz dentre outros que fizeram parte de momentos marcantes de minha vida.

Ao meu grande amigo e compadre Marcio Porfírio e sua esposa Kelly Pantoja que trouxeram a essa vida a minha linda afilhada Luna Porfírio, além dos demais membros da família Porfírio, que me acompanharam nessa caminhada, sempre me ajudando e fazendo companhia. Aos meus queridos amigos, comigo nas horas de diversão e descontração: Deyvison e família, Robert Neves, Rodrigo Corrêa, Renan Lima, Adjalbas Marinho e sua digníssima esposa e amiga, Ellen Regina, todos, sem exceção, amigos que sempre me mostram o lado bom da vida.

Aos amigos feitos no curso de oceanografia, em muitas práticas, emoções e aventuras vividas juntos. Aos “irmãos”: Marcus Vinicius (vulgo malandro), Ernan Raiol, Simão Farias, David Lima, Kleper Lima, Paulo Vitor Magno, Otávio Junior, Ivson Viana, dentre outros. As lindas e amigas Raqueline Monteiro, Renê Furtado, dentre outras que me fizeram companhia.

E finalizando, aos amigos que fazemos durante nossa vida, seja por motivos de necessidade ou diversão, mas que tiveram grande contribuição na realização desse trabalho: Josué na sua ajuda incondicional durante a coleta de dados, professores Amilcar Mendes e Valdenira Santos no auxílio de ideias e amparo na realização do trabalho, a Mary Nogueira na sua imensa colaboração no processamento dos resultados do trabalho, Sury Monteiro que esteve nessa jornada de coleta de dados, dentre outros que muito me ajudaram.

*“Tudo é loucura ou sonho no começo.*

*Nada do que o homem fez no mundo teve  
início de outra maneira.*

*Mas já tantos sonhos se realizaram que  
não temos o direito de duvidar de  
nenhum”.*

Monteiro Lobato

## **RESUMO**

A área de estudo está localizada na região nordeste do estado do Pará, a área de pesquisa englobou o rio Pará, desembocadura do Tocantins e Baía do Marajó. O estudo ficou restrito ao complexo estuarino amazônico caracterizado por regiões de planície costeira que se formaram durante a transgressão do mar no Holoceno, que inundou os vales de rios. O trabalho visa contribuir para o conhecimento e aprimoramento a cerca dos métodos de sísmica rasa na Amazônia, mais especificamente nos tributários, com o emprego do sistema X-STAR 3200-XS. O foco desse trabalho busca viabilizar meios de se processar as informações a partir desse sistema de aquisição geofísico, pouco utilizado na região, aplicando metodologias de tratamento em perfis sísmicos onde se possa visualizar a distribuição da continuidade horizontal, uma melhor identificação das morfologias de fundo e localizar a profundidade do embasamento acústico. O objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta metodológica para investigação das coberturas sedimentares inconsolidadas, depositadas em áreas submersas em diferentes ambientes amazônicos. A partir desses dados, a confecção de um fluxo de processamento em nossa região busca esclarecer alguns aspectos, relacionados principalmente com os seus limitadores além de critérios mais adequados para uma melhor aquisição de dados.

Palavras-chave: Método de Reflexão Sísmica. Geofísica Marinha. Rio Amazonas.

## **ABSTRACT**

The study area is located on northeast region of Pará state, it includes the Pará river, Tocantins river's outfall and Marajó bay. The study is restricted to Amazon estuarine complex, characterized by coastal lowland regions which have been formed during the Holocene marine transgression which flooded vales of rivers. This work aims to improve the knowledge about the shallow seismic methods in the Amazon, specifically on tributary rivers, applying the X-STAR 3200-XS system. The work's focus is to enable ways to process the information from this geophysical acquisition system, little used in the region, applying methods of treatment in seismic profiles where it's possible to perceive the horizontal continuity's distribution and a better morphological identification, besides that is also important locate the depth of acoustic basement. This work intents to present a methodological proposal to investigate the sedimentary unconsolidated covers deposited in submerged areas of different amazonian environments. From these data a processing flow in the region will be made to explain some aspects, related mainly to its limiters, besides more suitable criteria to a better data acquisition.

Key words: Seismic Reflection Method. Marine Geophysics. Amazon River.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01	Localização da área de estudo. Imagem do satélite Landsat 8.....	20
Figura 02	a) Mapa de localização da área de estudo (ver quadro), no sudoeste da Ilha do Marajó, mostrando sua inserção na Sub-bacia do Limoeiro, na porção central do Sistema de Graben do Marajó. Notar que este graben é definido por inúmeras falhas de direção principal NW-SE, NE-SW, bem como E-W a ENE-WSW e NE-SW. b) Coluna estratigráfica simplificada, ilustrando as unidades litoestratigráficas depositadas na Sub-Bacia do Limoeiro.....	23
Figura 03	Os quatro tipos fundamentais de canais fluviais.....	26
Figura 04	Tipos de padrões de canal, baseando-se na carga sedimentar, com variáveis associadas e estabilidade relativa.....	27
Figura 05	Registro sísmico obtido na baía de Marajó – PA. Área da baía de Marajó. Ilustração de uma das principais propriedades dos métodos sísmicos que é a possibilidade da correlação praticamente direta, entre um perfil sísmico obtido em campo (parte superior da figura) e um perfil geológico (parte inferior da figura).....	30
Figura 06	Tipos de ondas sísmicas, o movimento de partículas e, em vermelho, amostra de pulso sísmico em função do tempo: a) compressional (P) onda viajando em um bloco de material, b) polarização vertical, c) ondas horizontais de cisalhamento polarizadas viajando em um bloco de material, d) onda Rayleigh itinerante em uma seção da superfície da terra e e) onda love viajando ao longo de uma seção da superfície da Terra.....	33
Figura 07	Esboço de levantamento sísmico: modelo de camadas, raios sísmicos (Azul: ondas odiretas, Verde: onda de cabeça ou refratada, Vermelho: ondas refletidas) e resultado dos sinais sísmicos no sismograma.....	35
Figura 08	Definições de onda. Tempo e período são geralmente dados em segundos (s) ou milissegundos (ms), a frequência em hertz (Hz), comprimento de onda em metros (m) e velocidade em metros por segundo (m / s).....	37
Figura 09	Refletores sísmicos de um registro sísmico raso obtido no furo do Canapijó, próximo á cidade de Barcarena - PA, Área do Furo do Carnapijó, com o perfilador de subfundo (0.5 - 4.5 kHz).....	39
Figura 10	Convolução entre o pulso sísmico e camadas com impedâncias distintas, resultando no traço sísmico sintético.....	40
Figura 11	Correlação entre: Tipo de fontes sísmicas, espectro de frequências emitido, energia da fonte (kJ), profundidade de investigação.....	45
Figura 12	Organograma de interpretação sismoestratigráfica de uma sequencia sísmica.....	46

Figura 13	Ilustração esquemática de uma aquisição de sísmica rasa a partir de um perfil não tratado.....	48
Figura 14	Ilustração dos compartimentos da embarcação REY Benedito. Divisão dos compartimentos de acordo com a aquisição de dados geofísicos e oceanográficos.....	49
Figura 15	Ilustração dos equipamentos utilizados na aquisição dos dados do Sub-Bottom profile (sistema X-Star).....	50
Figura 16	Programas na aquisição dos dados de sísmica rasa. O <i>GPS TrackMaker</i> é utilizado na visualização do percurso e o <i>Discover Subbottom</i> é o programa de aquisição fornecido pela fabricante.....	51
Figura 17	Ilustração da disposição das linhas de aquisição geofísicas ao longo da área de estudo.....	53
Figura 18	Fluxograma das etapas de análise e aplicação das fases de processamento nos dados de sísmica rasa.....	54
Figura 19	Visualização do programa de processamento dos dados. <i>ReflexW</i> ....	55
Figura 20	Opções de visualização dos dados no programa <i>ReflexW</i> .....	56
Figura 21	Correção geométrica dos dados no programa <i>ReflexW</i> .....	57
Figura 22	Espectro de distribuição no domínio das frequências ente 1 e 4 kHz	59
Figura 23	Imagem de satélite <i>Landsat 8</i> da baía de Marajó com a localização das linhas sísmicas.....	62
Figura 24	Comparação com uma seção não filtrada e outra com o filtro de frequências passa-banda ( <i>bandpass frequency</i> ).....	65
Figura 25	Comparação ente uma seção filtrada ( <i>Bandpass Frequency</i> ) e outra com o filtro <i>Runing Average</i> (com média entre quatro traços).....	66
Figura 26	Aplicação do filtro de função de ganho ( <i>gain function</i> ).....	67
Figura 27	Aplicação do filtro de ganho manual ( <i>manual gain</i> ).....	68
Figura 28	Atenuação da múltipla de fundo em uma seção bruta (A) através da Deconvolução Preditiva (B) e da Função de Ganho (C).....	69
Figura 29	Imagem de satélite <i>Landsat 8</i> da área do Rio Pará com a localização as linhas sísmicas.....	71

Figura 30	Trecho da seção sísmica <i>L4_A2</i> , localizada no rio Pará com a detecção das unidades identificadas.....	73
Figura 31	Trecho da seção sísmica <i>L4_A2</i> , localizada no rio Pará com a detecção das unidades identificadas. ....	74
Figura 32	Trecho da seção sísmica <i>L4_A2_001</i> , localizada no rio Pará com diferentes faixas de frequência de pulso, e logo abaixo a detecção das unidades identificadas.....	76
Figura 33	Espectro de distribuição no domínio FK (frequência/ nº de onda) mostrando as faixas de amplitudes nas frequências ente 1 e 8 kHz...	77
Figura 34	Imagem de satélite <i>Landsat 8</i> da área do rio Tocantins com a localização as linhas sísmicas.....	78
Figura 35	Em (A): seção sísmica <i>L8_A3</i> executada longitudinalmente a desembocadura do rio Tocantins, com morfologia comprimida pelo modo de visualização no ambiente ReflexW. Em (B): Trecho da seção sísmica processada. Em (C): Identificação dos sismoestratos presente acima da múltipla, que representam descontinuidades deposicionais/erosivas.....	81
Figura 36	Em (A): seção sísmica <i>L10_A3</i> executada em diagonal na desembocadura do rio Tocantins, com morfologia comprimida pelo modo de visualização no ambiente ReflexW. Em (B): Trecho da seção sísmica processada. Em (C): Identificação dos sismoestratos presente acima da múltipla, que representam áreas de preenchimento de sedimentos.....	82
Figura 37	Em (A): seção sísmica <i>L9.1_A3</i> (ponta do Tatuoca), executada transversalmente a desembocadura do rio Tocantins, com morfologia comprimida pelo modo de visualização no ambiente ReflexW. Em (B): Trecho da seção sísmica processada. Em (C): Identificação dos sismoestratos presente logo abaixo da superfície de fundo, que representam regiões com preenchimento de material sedimentar mais lamoso devido o menor fluxo de corrente no local.	83
Figura 38	Imagem de satélite <i>Landsat 8</i> da área da Costa Sul aos Estreitos com a localização as linhas sísmicas.....	85
Figura 39	Seção sísmica <i>L12_A3</i> executada longitudinalmente ao canal fluvial. Dois trechos (B) e (C) processados com a identificação dos sismoestratos subparalelos representando camadas de deposição de material lamoso (B') e (C').....	90
Figura 40	Seção sísmica <i>L12_A3</i> executada longitudinalmente ao canal fluvial (A). Em (B): trecho da seção processada. Em (C): Identificação dos sismoestratos preenchendo depressões com material sedimentar mais lamoso.....	88

Figura 41	Em (A): seção sísmica <i>L14.1_A3</i> (ponta do Tapera), executada transversalmente ao canal fluvial, com morfologia comprimida pelo modo de visualização no ambiente ReflexW. Em (B): Trecho da seção sísmica processada com a identificação de um banco transversal ao canal. Em (C): Identificação dos sismoestratos intercalados presente logo abaixo da superfície de fundo, que pode ser a estrutura de um banco de material sedimentar mais fino.....	89
Figura 42	Em (A): seção sísmica <i>L15_A4</i> executada longitudinalmente ao canal fluvial, com morfologia comprimida pelo modo de visualização no ambiente ReflexW. Em (B): Trecho da seção sísmica processada com a identificação de refletores subparalelos. Em (C): Identificação dos sismoestratos depositados paralelamente.....	90
Figura 43	Imagem de satélite <i>Landsat 8</i> da área da ilha do Carnapijó com a localização as linhas sísmicas.....	91
Figura 44	Em (A): seção sísmica <i>L20</i> executada longitudinalmente ao canal fluvial, com a identificação de refletores paralelos. Em (B): Trecho da seção sísmica processada na diagonal do canal com a identificação de refletores paralelos e subparalelos.....	93
Figura 45	Em (A): seção sísmica <i>L20</i> executada na diagonal do canal fluvial, com a identificação de refletores subparalelos.....	94
Figura 46	Em (A): seção sísmica <i>L23_furo do Carnapijó</i> executada transversalmente a desembocadura do furo, com morfologia representativa de um terraço fluvial com a identificação dos sismoestratos paralelos e subparalelos.....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Velocidades (m/s) e densidades (g/cm <sup>3</sup> ) dos meios relacionados nas interfaces para o cálculo do Coeficiente de Reflexão. ....	38
Tabela 02	Caraterização mais detalhada dos parâmetros e descrição visual dos perfis sísmicos da area da baia de Marajó.....	63
Tabela 03	Caraterização mais detalhada dos parâmetros e descrição visual dos perfis sísmicos da area do rio Pará.....	72
Tabela 04	Caraterização mais detalhada dos parâmetros e descrição visual dos perfis sísmicos da area da desembocadura do rio Tocantins.....	79
Tabela 05	Caraterização mais detalhada dos parâmetros e descrição visual dos perfis sísmicos da area da Costa Sul aos Estreitos.....	86
Tabela 06	Caraterização mais detalhada dos parâmetros e descrição visual dos perfis sísmicos da area da ilha do Carnapijó.....	92

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1	Apresentação.....	17
1.2	<b>Objetivos</b> .....	19
1.3	<b>Localização da área de estudo</b> .....	20
2	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	21
2.1	<b>A geologia da área</b> .....	21
2.1.1	Bacia do Marajó.....	21
2.1.2	Sedimentos.....	24
2.2	<b>Morfologia fluvial</b> .....	25
2.3	<b>Métodos Sísmicos</b> .....	28
2.3.1	Apresentação.....	28
2.3.2	Sub-bottom profile.....	30
2.3.3	Propagação das ondas.....	32
2.3.4	Os tipos de ondas.....	32
2.3.5	A interação das ondas.....	37
2.3.6	Fontes sísmicas.....	41
2.3.6.1	Fontes ressonantes.....	41
2.3.6.2	Fontes impulsivas.....	43
2.3.7	A sismoestratigrafia.....	45
3	<b>AQUISIÇÃO DE DADOS DE CAMPO</b> .....	47
3.1	<b>Embarcação</b> .....	48
3.2	<b>Equipamentos</b> .....	49
3.3	<b>Plano de navegação</b> .....	51
3.4	<b>Teste do equipamento</b> .....	52
4	<b>TRATAMENTO DOS DADOS DE SÍSMICA RASA</b> .....	53
4.1	<b>Apresentação dos dados</b> .....	53

4.2	<b>Fluxo de processamento.....</b>	54
4.3	<b>Importação dos dados.....</b>	55
4.4	<b>Análise espectral dos dados.....</b>	58
4.5	<b>Ganhos e filtros.....</b>	60
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO DAS SEÇÕES SÍSMICAS.....</b>	62
5.1	<b>Baia de Marajó.....</b>	62
5.2	<b>Rio Pará.....</b>	71
5.3	<b>Desembocadura do Rio Tocantins.....</b>	78
5.4	<b>Área dos Estreitos.....</b>	85
5.5	<b>Área da ilha do Carnapijó.....</b>	91
6	<b>CONCLUSÃO.....</b>	97
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	99

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

A bacia de drenagem do rio Amazonas tem uma área de  $6 \times 10^6 \text{ km}^2$ , que contém a maior extensão de floresta tropical do mundo. O Amazonas é um dos maiores rios em termos de descarga de água e também está entre os três maiores contribuintes de sedimentos fluviais, junto com o Ganges-Brahmaputra e o Huanghe, com uma descarga de sedimentos estimada em 1.200 toneladas/ano (NITTROUER et al., 1995.; KUEHL et al.; 1997; PRIOR et al., 1986). Ao longo de seu curso desde o Peru até o Oceano Atlântico, como característica, as paisagens são dominadas por bancos de areia, várzeas ou terraços fluviais antigos depositados pelo rio ou seus afluentes (MEADE, 1994).

A região amazônica foi palco de diversos trabalhos de pesquisas acerca dos processos hidrodinâmicos, geológicos e geofísicos, por exemplo, (CT-HIDRO, 2008; DAMUTH ; KUMAR, 1975; DAMUTH et al., 1983; HÜBSCHER et al., 2002; KUEHL, 1996; LENTZ, 1995; NITTROUER et al., 1995; SILVEIRA, 1989; VITAL et al., 1998). A iniciativa de realização desse trabalho busca gerar conhecimento a cerca dos métodos sísmicos rasos na região amazônica e faz parte do projeto de pesquisa: “Rede de Hidrologia Amazônica” com financiamento pelo MCT/FINEP CT-HIDRO 01/2010.

Tanto a sísmica convencional como a sísmica rasa empregam os mesmos princípios de reflexão sísmica, mas são diferentes nos seus sistemas de aquisição de dados, nas fontes acústicas, nos espectros de frequências emitidos, nos receptores, nos sistemas de processamento e até mesmo nas formas de apresentação dos dados. Atualmente, a sísmica rasa tem sido intensamente utilizada para o mapeamento de feições geológicas com pequenas dimensões e de pouca profundidade (como do Quaternário), na investigação dos processos sedimentares, na engenharia costeira, na exploração mineral e nos estudos de habitats subaquáticos dentre outros temas (SOUZA, 2006).

No Baixo Amazonas trabalhos de Vital (1998) resultaram em uma caracterização ampla de perfis acústicos de alta resolução (método utilizado pela primeira vez nessa região), que permitiu a identificação de uma variedade de refletores sísmicos importantes na classificação de áreas de transporte ou deposição de sedimentos.

Na plataforma continental Hübscher et al. (2002) realizaram levantamentos sísmicos de alta resolução mais especificamente na região do delta sub-aquático do Amazonas identificando estruturas deposicionais a fim de compreender os processos sedimentares antigos e sua evolução ao longo dos processos isostáticos do nível do mar.

Os temas relacionados à “investigação de áreas submersas” são subdivididos em duas áreas de interesse: (1) águas profundas e (2) águas rasas. Os estudos geofísicos aplicados em áreas submersas são, na sua grande maioria, voltados à investigação em águas profundas (plataforma continental externa, talude continental e bacias oceânicas), acompanhando a necessidade de grandes empresas de petróleo e gás na busca de novos reservatórios.

Nos últimos anos, a necessidade de estudar regiões interiores como: plataforma continental interna, áreas costeiras, rios, lagos natural ou artificial e reservatórios, vêm ocupando espaço nos estudos científicos, governamentais e de planejamento a cerca dos impactos ambientais.

As informações da superfície e subsuperfície de fundo podem auxiliar o desenvolvimento de inúmeras atividades, das quais se podem destacar: caracterização de sedimentos, localização de afloramentos rochosos, assoreamento de rios, navegação, mapeamento ambiental, prospecção mineral, arqueologia subaquática, lançamentos de cabos, estimativa de sobrevivência de reservatórios, dentre vários outros.

Os estudos geofísicos aplicados à sísmica de reflexão rasa desenvolvem-se em ambientes de coluna d’água menor que 70 até mesmo menores que 30 metros. Nestes ambientes, exige-se comumente a obtenção de dados de alta resolução e precisão com amplo espectro de cobertura de forma a evidenciar quaisquer características relevantes ou significantes do ambiente estudado (SOUZA, 2006).

A importância de se estudar os “sedimentos inconsolidados” ocorre devido à necessidade de dimensionamento das extensões e das espessuras destes corpos sedimentares, bem como, do conhecimento dos processos de evolução destas coberturas, pois se entende que estes aspectos são importantes no entendimento geológico regional de uma dada região. O método apresentado neste trabalho constitui uma ferramenta útil para investigações em subsuperfície de um corpo d’água (GOMES, 2009).

A apresentação dos dados de perfilagem de subfundo é feita através da utilização dos recursos disponíveis do programa ReflexW 6.0 para obter a parametrização do processamento, contando com etapas básicas necessárias para uma metodologia geral e alguns processos suplementares que podem ser utilizados a fim de melhorar a performance do processamento (tempo de máquina) e/ou da qualidade dos dados. Além dos fins da interpretação dos dados também é possível fazer avanços significativos na configuração da aquisição, melhorando, por exemplo, a frequência de aquisição, o intervalo entre os traços, o tempo de registro, na tentativa de realizar futuros trabalhos com maior eficiência e resultados satisfatórios.

## 1.2 Objetivos

O objetivo de estudo deste trabalho é apresentar uma proposta metodológica para investigação das coberturas sedimentares inconsolidadas depositadas em áreas submersas em diferentes ambientes amazônicos. São esses sedimentos, de origem marinha ou continental, que cobrem grandes áreas da plataforma continental interna, áreas costeiras, rios e no fundo de lagos e reservatórios.

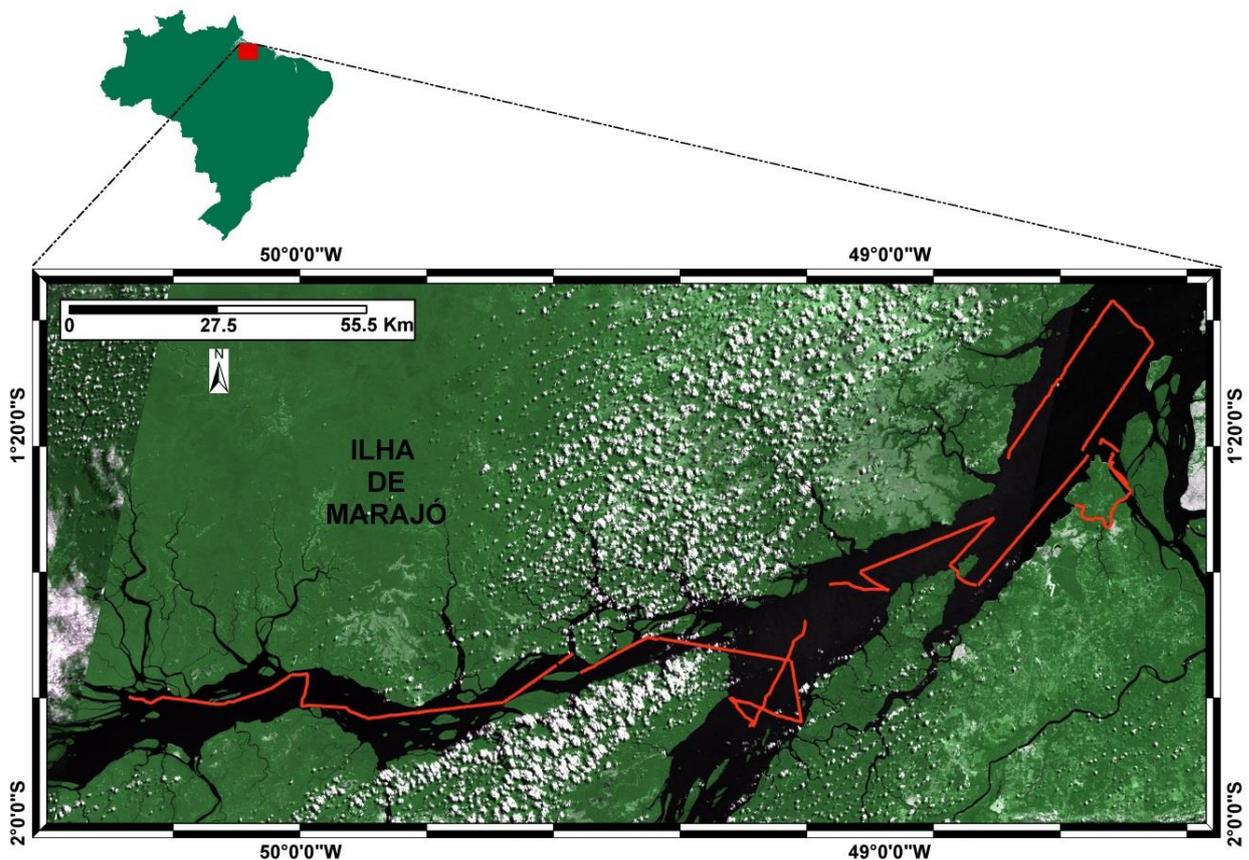
Na utilização desse método espera-se:

- 1) Visualizar a distribuição da continuidade horizontal das estruturas tectônicas e geológicas;
- 2) Aferir a profundidade do embasamento acústico;
- 3) Questionar as vantagens e desvantagens do uso do da sísmica monocanal na região amazônica;
- 4) Propor critérios mais adequados para uma melhor aquisição.

### 1.3 Localização da área de estudo

A área de estudo está localizada na região nordeste do estado do Pará. A área de pesquisa englobou o rio Pará, desembocadura do Tocantins e Baía do Marajó (Fig. 1).

Figura 1: Localização da área de estudo. Imagem do satélite *Landsat 8*.



Fonte: Do autor.

No complexo estuarino amazônico as regiões de planície costeira se formaram durante a transgressão do mar no Holoceno, inundando os vales de rios. Esse tipo de estuário é relativamente raso, não excede 30 m de profundidade (CUNHA et al., 2006). Nesses tipos de estuários a área de seção transversal do rio aumenta estuário abaixo, às vezes, de forma exponencial e a configuração geométrica tem a forma de “V”, em que a razão entre a largura/profundidade é grande (MIRANDA et al., 2002; CUNHA, 2006).

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 A geologia da área

A geomorfologia da área constitui um fator importante no entendimento geológico regional, dentre eles a caracterização do padrão de drenagens que demonstra um controle estrutural nos canais fluviais na Amazônia (RADAM 1974; BEMERGUY 1997, 1981; BEMERGUY et al., 2002; ROSSETTI et al., 2007; 2008a,b). Particularmente, em áreas de altitudes muito baixas, como é o caso da ilha do Marajó, a análise de drenagem torna-se de especial interesse na caracterização geológica do terreno.

#### 2.1.1 Bacia do Marajó

O preenchimento da bacia do Marajó (Fig. 3) é composto por um empilhamento sedimentar iniciado no Cretáceo inferior até o Oligoceno e atinge uma espessura de até 11 km (LIMA, 1987).

A ilha do Marajó abrange partes das sub-bacias de Limoeiro e Mexiana, e da Plataforma continental do Pará (Fig. 3). As sub-bacias de Limoeiro e Mexiana, juntamente com a Sub-bacia de Cametá, localizada a Sudeste, são depressões formadas por falhas normais e de transcorrência inseridas em um conjunto de rifts que compõem o Sistema de Graben do Marajó (AZEVEDO, 1991, GALVÃO, 1991, VILLEGAS, 1994).

O Sistema de Graben do Marajó cobre uma área aproximada de  $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ , e consiste em uma estrutura definida por falhas orientadas a NW-SE e NE-SW, além de falhas E-W a ENE-WSW e NE-SW, que foram reativadas a partir de estruturas antigas do embasamento pré-cambriano e cretáceo (AZEVEDO, 1991, VILLEGAS, 1994, COSTA ; HASUI, 1997). Estas reativações resultam de extensão relacionada à abertura do Oceano Atlântico Equatorial, iniciado no Juro-Cretáceo (SZATMARI et al., 1987).

Em subsuperfície inclui sedimentos: clástico-arenosos da Formação Breves (Albiano); clásticos conglomeráticos da Formação Jacarezinho (Aptiano-Cenomaniano); sílticos e argilosos da Formação Anajás (Eocretáceo); areníticos friáveis, finos a grossos, com frequentes níveis conglomeráticos e intercalações de argilitos da Formação Limoeiro (Cretáceo Superior); carbonático-siliciclásticos da Formação Marajó (Paleoceno-Eoceno); e areníticos quartzosos intercalados a argilitos da Formação Tucunará (Quaternário). Estas

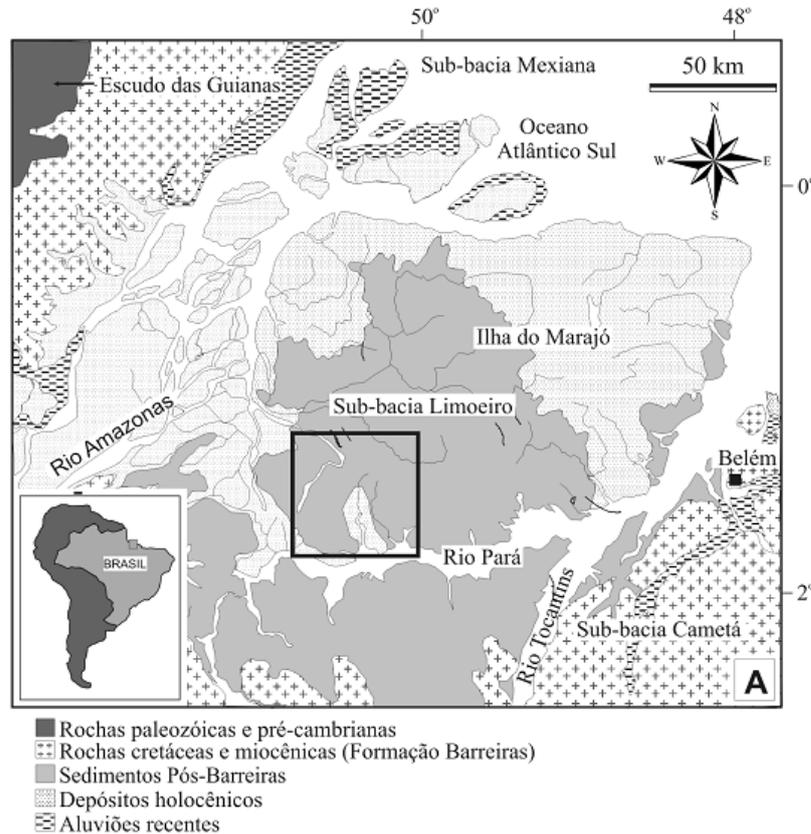
unidades são atribuídas a ambientes que variam de fluvial a marinho raso e aluvial (Avenius 1988, VILLEGAS, 1994).

A aquisição dos dados geofísicos no rio Pará deu-se em seções localizadas ao Sul da Sub-bacia de Limoeiro, caracterizada por sedimentos do Pós-Barreiras. No rio Tocantins foram realizadas seções localizadas ao Sudeste da Sub-bacia de Limoeiro, caracterizada por sedimentos do Barreiras (rochas cretáceas e miocênicas) e Pós-Barreiras.

Na baía de Marajó, área localizada na porção leste, existe uma extensa área tectonicamente estável entre as bacias paleozóicas do Amazonas e do Parnaíba, cujos limites são os arcos de Gurupá e Tocantins. Esta região é composta por depósitos miocênicos (sucessão Pirabas/Barreiras), além de depósitos de sedimentos do Pós-Barreiras (ROSSETTI ; TRUCKENBRODT, 1989).

A Formação Pirabas representa uma sucessão de fácies carbonáticas com intercalações de folhelhos e arenitos (GÓES et al., 1990). A Formação Barreiras é caracterizada por arenitos maciços a estratificados, argilitos laminados a maciços e pelitos com acamamentos heterolíticos, (ROSSETTI ; TRUCKENBRODT, 1989; ROSSETTI, 2001). Os sedimentos Pós-Barreiras englobam arenitos finos a médios, maciços e de coloração amarelada (ROSSETTI ; TRUCKENBRODT, 1989).

Figura 2: a) Mapa de localização da área de estudo (ver quadro), no Sudoeste da Ilha do Marajó, mostrando sua inserção na Sub-bacia do Limoeiro, na porção central do Sistema de Graben do Marajó. Notar que este graben é definido por inúmeras falhas de direção principal NW-SE, NE-SW, bem como E-W a ENE-WSW e NE-SW. b) Coluna estratigráfica simplificada, ilustrando as unidades litoestratigráficas depositadas na Sub-Bacia do Limoeiro.



Idade		Litoestratigrafia	
		Subsuperfície	Superfície
Quaternário		Grupo Pará	Sed. Pós-Barreiras.
Terciário			Formação Pirarucu/Tucunaré
			Formação Pirabas/Barreiras
			Formação Marajó
CRETÁCEO	Neocretáceo	Maastrichtiano	Formação Limoeiro
		Campaniano	
		Santoniano	
		Coniaciano	
		Turoniano	
	Cenomaniano	Formação Anajás	
Eocretáceo	Albiano	Formação Breves/Jacarezinho	
	Aptiano		

Fonte: Mantelli ; Rossetti, 2009.

### 2.1.2 Sedimentos

A análise das características hidrossedimentológicas de uma bacia hidrográfica é fundamental para o desenvolvimento de diversas atividades econômicas exercidas pelo homem. Um importante exemplo é a navegação, onde a deposição de sedimentos nos canais, a formação de deltas e o movimento de bancos de areia no fundo dos rios são grandes problemas para o exercício dessa atividade.

Todas as atividades que dependem de bombeamento de água sofrem prejuízos quando da presença de sedimentos na fonte de captação, seja por entupimento ou por desgaste desses sistemas. Além disso, os sedimentos têm ampla influência sobre a qualidade dos recursos hídricos, o que pode causar impactos diretos na saúde humana (OLIVEIRA, 2010).

Em ambientes estuarinos com elevadas concentrações de sedimentos finos em suspensão diversos fatores governam a estrutura vertical das suspensões de sedimento coesivo, como por exemplo, os efeitos da mistura hidrodinâmica originada principalmente pela maré, a velocidade de sedimentação e as propriedades físicas e químicas do fluido e do sedimento. A formação de lutoclinas (fortes gradientes de concentração de sedimentos) e de camadas de lama fluida (camadas de sedimento em suspensão de elevadas concentrações nas proximidades do fundo) são características destes ambientes (KINEKE et al., 1995).

O perfil vertical de concentrações do sedimento em suspensão apresenta um amplo intervalo de valores (4 a 5 ordens de magnitude) entre a superfície da água e o leito coesivo e fortes gradientes nas proximidades do fundo, dividindo o escoamento em camadas, sendo a parte superior turbulenta e a inferior predominantemente viscosa (ROSS; MEHTA, 1989).

A distribuição superficial dos sedimentos, a noroeste da foz do rio Pará, é marcada pela presença de sedimentos terrígenos, compostos por lama na plataforma continental interna, passando a areias na plataforma continental externa. Sedimentos carbonáticos ocorrem restritos à plataforma continental externa e se concentram em frente à foz do rio Amazonas (MILLIMAN et al., 1975).

A topografia do leito é uma feição que apresenta rápida mutualidade de formas. Isso porque, o material detrítico é bastante inconsistente, tornando mais fácil a movimentação dos sedimentos e a construção das formas topográficas. A dinâmica do fluxo, os mecanismos de transporte e os processos morfogênicos atuantes no curso de água só agem quando houver

força suficiente para ultrapassar a resistência (SCHUMM 1985, CHRISTOFOLETTI 1981, CUNHA, 2007).

Diversos métodos de prospecção geofísica (acústicos e eletromagnéticos) têm sido amplamente utilizados nos estudos de fácies morfológicas (processo-forma) e estruturação interna de barras e dunas de areia nos ambientes fluvial e marinho, para descrever as sequências deposicionais antigas e modernas, bem como suprir dados para modelos sedimentológicos (SAMBROOK; SMITH et al., 2006; HUGENHOLTZ et al., 2007).

## **2.2 Morfologia Fluvial**

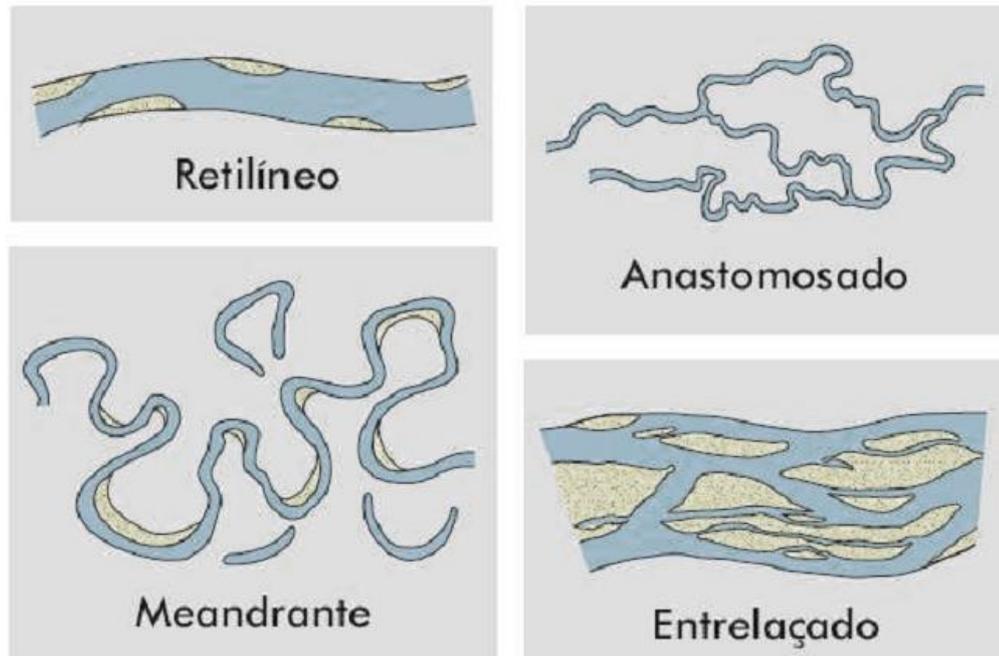
Os rios são cursos naturais de água doce, na maioria das vezes com canais definidos e fluxo permanente ou sazonal que migram em direção ao oceano, lago ou outro corpo d'água. Dada sua capacidade de erosão, transporte e deposição, constituem-se em um dos principais agentes de processos exógenos (MENEZES, 2004).

A geometria do rio é resultante do ajuste do canal à sua seção transversal e reflete o inter-relacionamento entre as variáveis: descarga líquida, carga sedimentar, declive, largura do canal, profundidade do canal, velocidade do fluxo e rugosidade do leito (CUNHA, 2007).

Os rios podem ser classificados de acordo com o comportamento que apresentam em relação ao substrato e na morfologia dos canais. Os principais estudos morfológicos a cerca dos padrões fluviais classificam os rios em quatro (04) tipos: (1)retilíneo, (2)meandrante, (3)entrelaçado e (4)anastomosado (MIALL, 1977).

Ao longo de um mesmo curso fluvial podem ser observadas passagens gradativas de um padrão para outro, em função de variações na descarga do rio nas épocas de cheia e estiagem (RICOMINI et al., 2000).

Figura 3: Os quatro tipos fundamentais de canais fluviais.



Adaptado de Miall (1977).

Canais retilíneos (1) são raros e ocorrem em trechos curtos. Possuem sinuosidade extremamente baixa, elevada estabilidade e domínio de carga de suspensão ou mista. Rios meândricos (2) são altamente sinuosos, de estabilidade alta a média, em geral com domínio de carga mista. Rios anastomóticos (3) são estáveis, ligeiramente sinuosos, que contornam ilhas vegetadas. Rios entrelaçados (4) mostram sinuosidade e estabilidade baixas e com domínio de carga de fundo. Esses tipos podem ocorrer de forma isolada ou em conjunta dentro de uma mesma bacia de drenagem, dependendo da evolução do seu sistema fluvial em virtude das variações temporais da drenagem. Portanto, uma zona do rio pode ser anastomosada em períodos de estiagem (sem chuva) e meandrante em épocas de cheia (CUNHA,1994).

A classificação de Shumm (1981) relaciona os padrões dos rios com base no regime predominante do transporte da carga sedimentar (suspensão, por tração ou misto). As formas geométricas do canal fluvial podem ser agrupadas em:

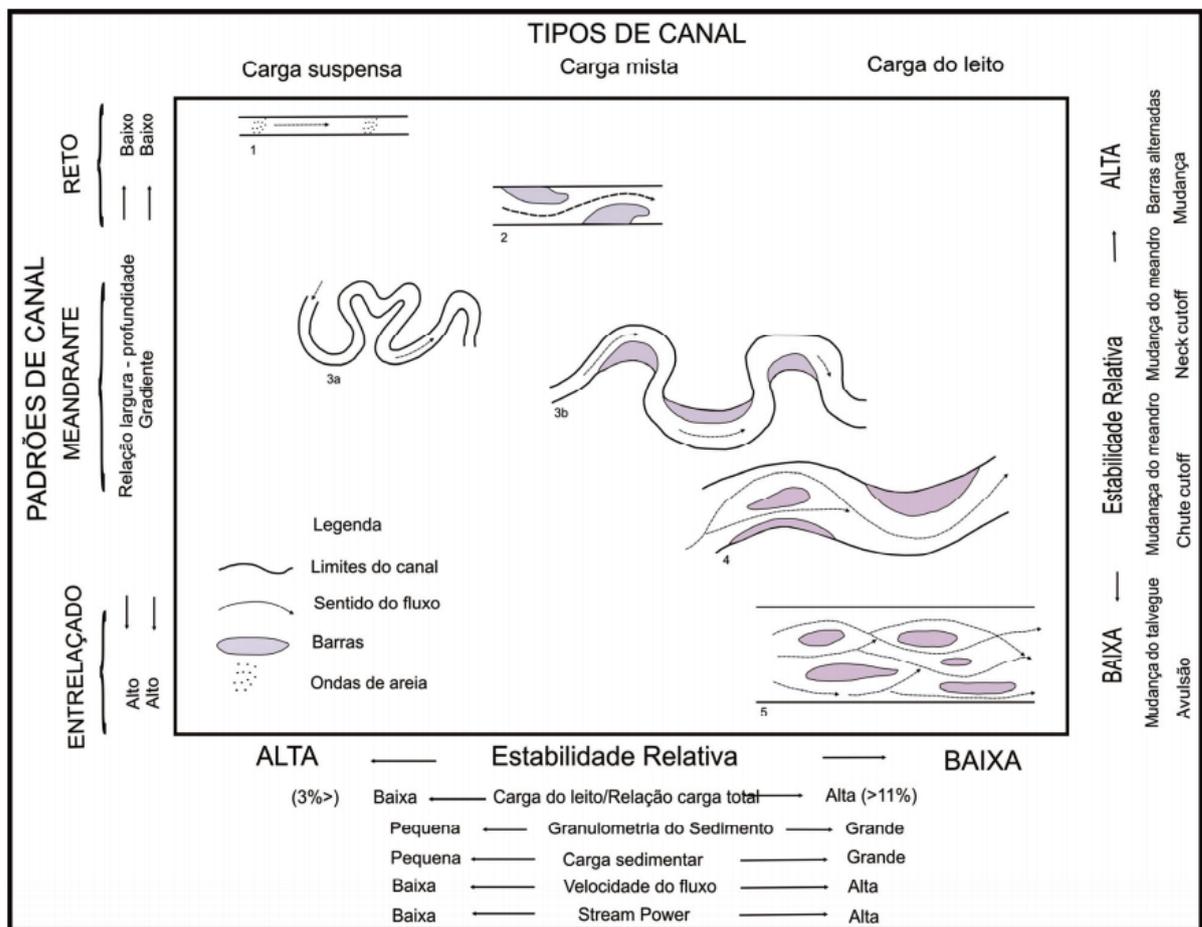
- Leito de vazante: incluído no leito menor, acompanhando o talvegue correspondente às vazões de estiagem;

- Leito menor: bem delimitado, encaixado entre margens bem definidas. Este apresenta irregularidades de fundo, com soleiras e depressões;

-Leito maior: ocupado periodicamente pelas cheias, podendo ser identificado o leito maior periódico, associado à ocorrência frequente e o leito maior excepcional ou Planície de inundação com ocupação por cheias em intervalos menos frequentes;

-Diques marginais: delimitam o leito menor, sendo usualmente caracterizados por vegetação abundante.

Figura 4: Padrões de canais fluviais, baseando-se na carga sedimentar, com variáveis associadas e estabilidade relativa.



Adaptado de Schumm (1981).

## 2.3 Métodos sísmicos

### 2.3.1 Apresentação

Os métodos sísmicos de alta resolução têm sido utilizados intensamente nestas últimas duas ou três décadas no mapeamento do Quaternário, na investigação dos processos sedimentares, na engenharia costeira, na exploração mineral e nos estudos de *habitats* subaquáticos entre outros temas (SOUZA, 2006).

A utilização do termo perfilagem sísmica contínua tem sido muito utilizado por pesquisadores dentro dos estudos de investigação acústica em meios submersos. São muitos os métodos utilizados na investigação dos substratos através da penetração na superfície de fundo a partir de fontes acústicas de diferentes potências como do tipo SBP (*Sub-Bottom Profilers*) que utiliza baixa potência.

De acordo com Vital (2005), os levantamentos geofísicos são planejados de tal forma a cobrir o máximo da superfície de interesse, entretanto, quando o interesse é mais amplo, a espacialização dos perfis procura privilegiar uma caracterização mais ampla, em detrimento do detalhamento local.

De acordo com Souza (2006), o produto final de uma investigação geofísica é geralmente um mapa de distribuição de uma determinada, ou de várias, propriedade física, ou não raramente um mapa ilustrando os resultados da interpretação dos parâmetros geofísicos observados. Este mapa pode ser considerado mais um instrumento de análise de um problema exposto e não a solução da questão propriamente dita.

O detalhamento dos levantamentos em sísmica rasa é de certa forma inversamente proporcional à área analisada, no entanto a qualidade de ambos os objetivos é diretamente relacionada a uma boa aquisição.

Em áreas submersas, os métodos acústicos ou sísmicos se destacam quando comparados com outros métodos geofísicos. Este destaque tem como base, algumas características especiais, dentre as quais podem ser ressaltadas:

- A grande precisão, resolução e penetração dos sinais sísmicos;
- O produto obtido em campo, em tempo real, é um perfil contínuo onde se identificam os refletores (contatos geológicos) em subsuperfície, à medida da evolução dos

levantamentos, sem a necessidade de complexos processamentos dos dados, que comumente são feitos a *posteriori* com objetivo de obtenção de detalhes adicionais;

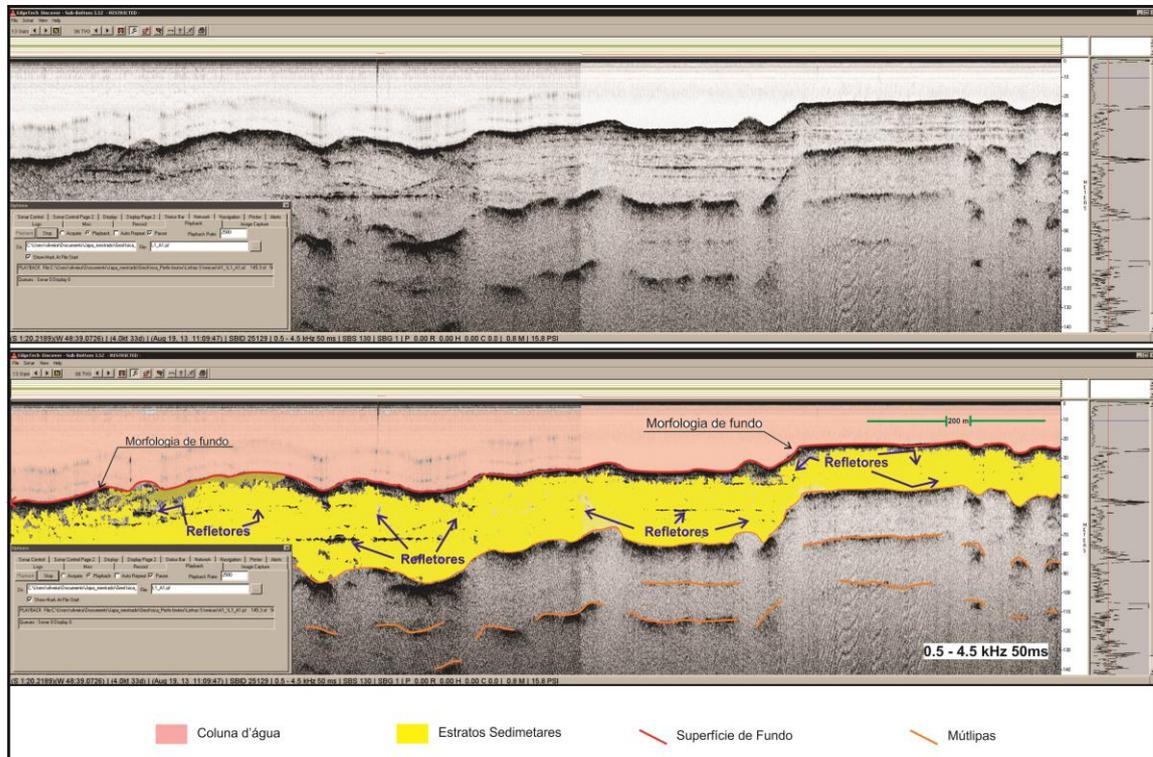
- Os perfis obtidos em campo, em tempo real, podem ser interpretados praticamente como uma seção geológica sobrelevada, possibilitando que decisões estratégicas possam ser tomadas durante a própria aquisição de dados (Fig. 6);

- Os levantamentos podem ser conduzidos em embarcações de pequeno e médio porte que se movem a velocidades comumente superiores a 6 km/h, o que possibilita rápida e ampla cobertura da área investigada;

- Fontes acústicas não-explosivas podem ser utilizadas (*boomers, sparkers, air-guns*) sem prejuízos ou restrições ambientais;

- A geração de ondas acústicas na superfície da água é relativamente fácil, bem como a propagação das ondas acústicas no meio, já que sofrem pouca absorção na coluna d'água.

Figura 5: Exemplo de registro sísmico obtido na baía de Marajó. Área da baía de Marajó. Ilustração de uma das principais propriedades dos métodos sísmicos que é a possibilidade da correlação praticamente direta, entre um perfil sísmico obtido em campo (parte superior da figura) e um perfil geológico (parte inferior da figura).



Fonte: Do autor.

### 2.3.2 Sub-Bottom Profiler

O sistema “X-STAR” funciona como sonares utilizados na investigação do fundo do mar (ou na superfície e subsuperfície de rios e lagos), fornecem registros através de imagens da superfície e subsuperfície (camadas sedimentares, estruturas geológicas além de morfologia do leito). Outros sistemas de aquisição como o monofeixe (ecosondas) utilizam métodos acústicos de estimação da velocidade na energia refletida para mensurar profundidades.

As frequências utilizadas para alcançar as profundidades de penetração são desde 0.5kHz a 20 kHz, onde as faixas de baixa frequência promovem uma boa penetração do substrato.

Os vários tons de cinza que se observam nos registros resultam da intensidade da reflexão do sinal. Essa reflexão se dá em função da textura e morfologia do fundo, da granulometria do sedimento e de características particulares do sedimento como, por exemplo, o grau de compactação (QUARESMA, 2001).

Nos seus trabalhos Oliveira (2010) empregou o perfilador acústico de subfundo para identificar as áreas de maior mobilidade de material sedimentar no fundo do baixo curso do rio Tocantins, como resultado caracterizou o fundo, nos trechos retilíneos, com pouco acúmulo de sedimentos e presença de fundo rochoso. Já os trechos anastomosados possuem uma maior presença de atividades erosivas e sedimentação, e contém um maior número de macroestruturas (barras de areia, canais naturais, embasamento com cobertura rasa de areia e depressão morfológica).

O método de reflexão sísmica consiste, basicamente, em gerar ondas sísmicas artificiais através de explosivos, canhões de ar comprimido ou outra fonte sísmica e registrar as reflexões provenientes das diversas interfaces em subsuperfície usando como receptores geofones ou hidrofones, equipamentos estes análogos aos microfones.

A onda gerada propaga-se pelo interior da terra, sendo parcialmente refletida ao encontrar interfaces entre camadas com contraste significativo de propriedades elásticas (impedância acústica). Os tempos de chegada de cada reflexão são relacionados às velocidades de propagação da onda sísmica em cada camada e, em primeira aproximação, a amplitude registrada está relacionada ao contraste de impedância acústica, produto entre velocidade compressional e densidade das camadas que definem a interface (GOMES, 2009).

Segundo Yilmaz (2000), a análise sísmica é dividida em três partes:

- a. Aquisição sísmica
- b. Processamento sísmico
- c. Interpretação sísmica

### 2.3.3 Propagação das ondas

A utilização de medições sísmicas na exploração de hidrocarbonetos é aplicada no mapeamento de estruturas subterrâneas rasas. O método é comparável a um ecobatímetro onde ondas sísmicas são criadas por um impulso na superfície se deslocando na coluna de água e no subsolo. Estas são refletidas e refratadas quando atingem um limite entre as diferentes camadas do subsolo.

As ondas utilizam o tempo necessário para voltar à superfície e a velocidade de viagem pode determinar a profundidade dos diversos limites geológicos. Os valores da velocidade das ondas transportadas são calculadas de forma a inferir sobre o tipo de sedimento e/ou rocha. Este método é importante não só para informações estruturais, por exemplo, em delinear falhas ou estruturas do vale, mas também para a caracterização física de camadas e, portanto, é muito útil em investigações hidrogeológicas.

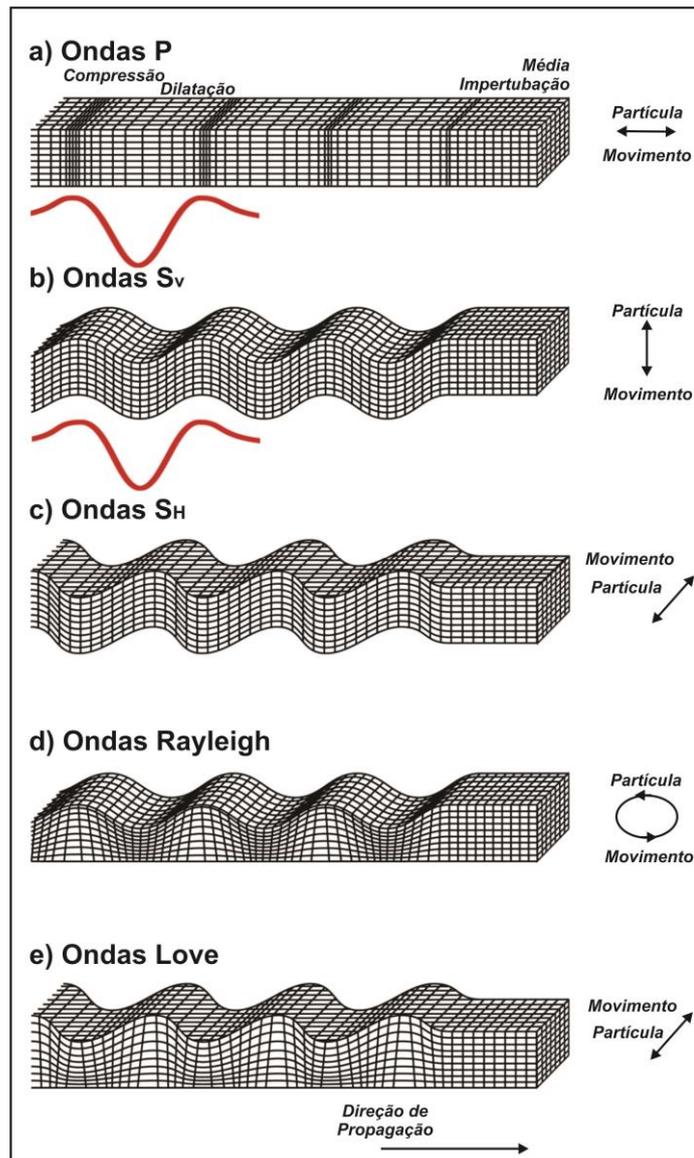
Desde a década de 1920, técnicas de reflexão sísmica têm sido utilizadas para pesquisa de petróleo e técnicas de refração e aplicadas na engenharia. Além disso, desde 1980, avanços significativos foram feitos em ambos, nos levantamentos sísmicos de reflexão e no desenvolvimento de métodos de sísmica rasa de refração, perto da superfície.

### 2.3.4 Os tipos de ondas

As ondas sísmicas incluem ondas de corpo que se deslocam tridimensionalmente através de volumes de terra sólidos e ondas de superfície, com propagação junto à superfície de terra.

As ondas de superfície são classificadas ainda em ondas do tipo Love e Rayleigh (Fig. 7). Para a investigação sísmica em superfícies terrestres, a utilização de ondas de corpo é mais usual. A diferença entre ondas de compressão (Ondas P) e ondas de cisalhamento (ondas S) está no movimento das partículas de ondas e na propagação através do tipo de material (STEEPLES, 2005).

Figura 6: Tipos de ondas sísmicas. O movimento de partículas e, em vermelho, amostra de pulso sísmico em função do tempo: a) compressional (P) onda se deslocando em um bloco de material, b) polarização vertical, c) ondas horizontais de cisalhamento polarizadas se deslocando em um bloco de material, d) onda Rayleigh itinerante em uma seção da superfície da terra e e) onda love se deslocando ao longo de uma seção da superfície da Terra.



Modificado de Steeples (2005).

Para os sedimentos não consolidados, como cascalho, areia, silte e argila, as velocidades da onda P variam de 200-800 m/s no estado seco. Para o material saturado em água de 1500-2500 m/s, a velocidade da onda S é muito mais lenta, na faixa de 100-500 m/s, e não diferem

entre material seco ou saturado de água. Devido a sua lentidão, a onda S chega mais tarde do que a onda P e é chamada de onda secundária (S), em contraste com a onda primária (P).

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

Equação 1: Velocidade de propagação das ondas P.

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Equação 2: Velocidade de propagação das ondas S.

Onde as constantes de elasticidade  $k$  (módulo de elasticidade) e  $\mu$  (módulo de cisalhamento) e a densidade de massa  $\rho$  do material através do qual a onda está em propagação.

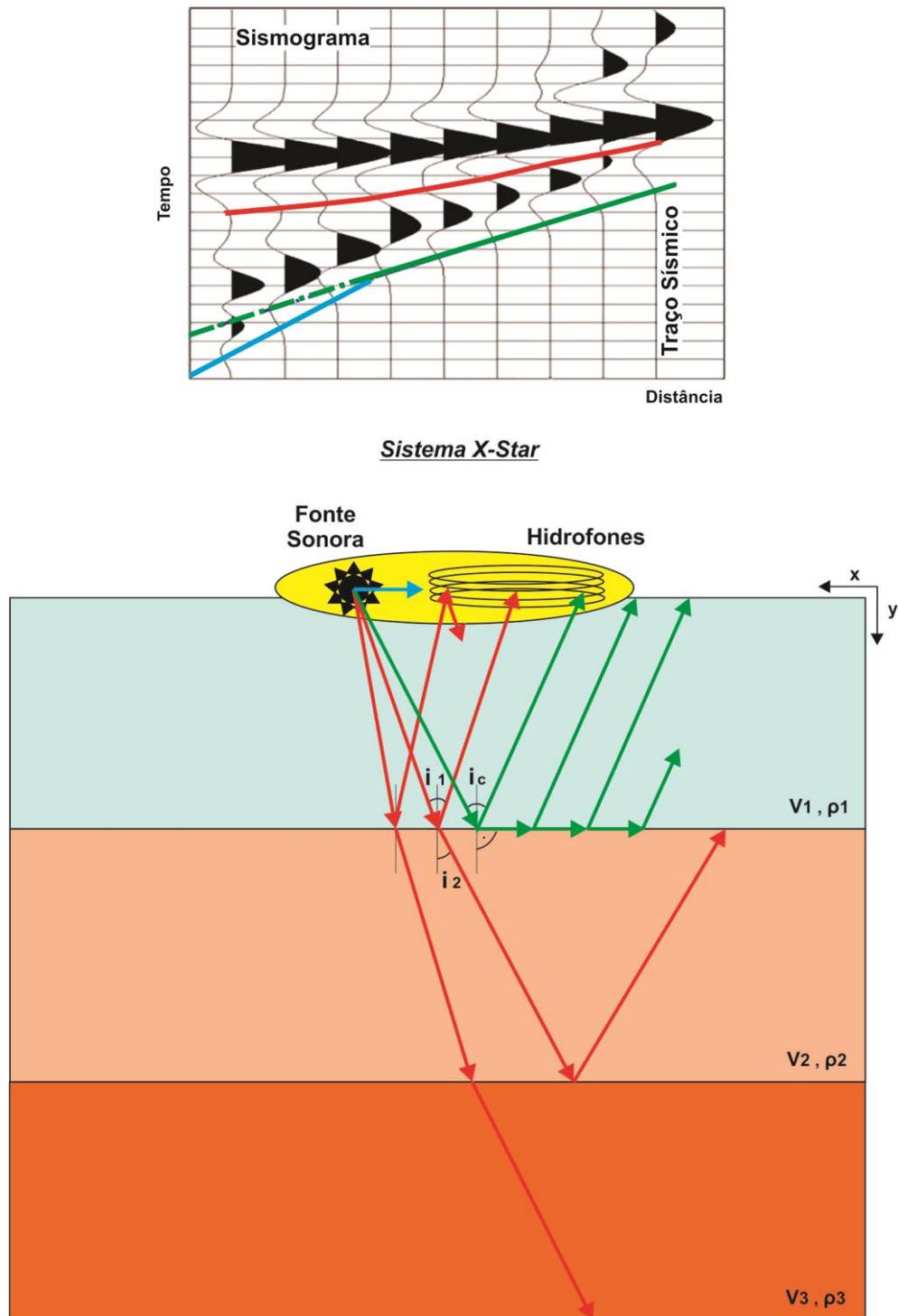
No material sedimentar, a elasticidade e a densidade dependem fortemente da porosidade. Numa camada limite, por exemplo, entre areia e argila, uma mudança de porosidade ocorre normalmente, levando a um contraste de densidades e velocidades sísmicas. A onda sísmica que incide sobre esta camada limite será parcialmente refletida e refratada (Fig. 8). A intensidade da onda refletida depende da magnitude do contraste entre as velocidades sísmicas e densidades neste limite, independentemente do sinal do contraste. O produto da velocidade  $V$  e a densidade do  $\rho$  é a impedância acústica  $I = V \cdot \rho$  de um meio. A força de reflexão de um contraste na interface acústica é definida pelo coeficiente de reflexão  $R$ .

$$R = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1}$$

Equação 3: Cálculo do coeficiente de reflexão.

Onde  $I_1$  é a impedância acústica da primeira camada e  $I_2$  é a impedância acústica da segunda camada. A Eq. 3 acima é válida para ondas incidentes normais (raio perpendicular à camada limite).

Figura 7: Esboço de levantamento sísmico: modelo de camadas, raios sísmicos (Azul: ondas diretas, Verde: onda de cabeça ou refratada, Vermelho: ondas refletidas) e resultado dos sinais sísmicos no sismograma.



Modificado de Kirsch (2006).

A discussão sobre as ondas sísmicas pode ser feita levando em consideração as frentes de onda ou caminhos dos raios, sendo este último uma linha perpendicular às frentes de onda.

A energia de uma onda sísmica é proporcional ao quadrado de sua amplitude. Uma importante relação da frequência no espaço e no tempo é o comprimento de onda ( $\lambda$ ), que descreve a distância no espaço entre picos sucessivos (ou calhas) da onda sísmica e limita a resolução sísmica, ou seja, a capacidade de discriminar camadas.

Camadas com espessura menor a  $\lambda / 4$ , não são compatíveis com o método de reflexão sísmico. A velocidade de propagação ( $V$ ) de uma onda é o produto da sua frequência ( $f$ ) e comprimento de onda ( $\lambda$ ):

$$V = \lambda * f.$$

Equação 4: Velocidade de propagação das ondas.

Como  $V$  é uma propriedade física intrínseca do material, em dados sísmicos, maiores frequências resultam em um comprimento de onda mais curto e melhor resolução. Para os fundamentos da óptica a propagação de raios geométricos são válidos, por exemplo, princípio de Fermat do tempo mínimo para o menor caminho e a Lei de Snell, descrevem como a onda muda de direção, quando cruza a fronteira entre dois meios:

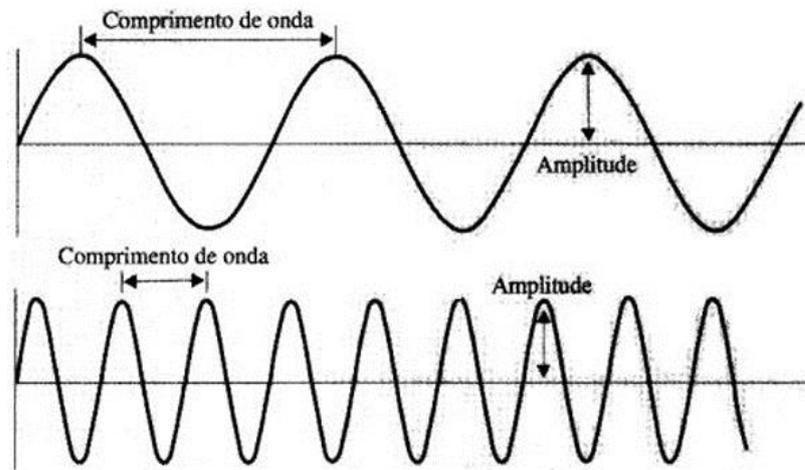
$$\frac{\sin(i_1)}{V_1} = \frac{\sin(i_2)}{V_2}$$

Equação 5: Definição da Lei de Snell.

Com  $i_1$ ,  $i_2$  ângulos de incidência e  $V_1$ ,  $V_2$  velocidades da mídia. Um tipo especial de propagação da onda ocorre em fronteiras de camadas, com velocidades sísmicas maiores ( $V_1 > V_2$ ). Em um ângulo de incidência chamado ângulo crítico ( $i_c$  sen  $i_c = V_1 / V_2$ ) a frente de onda refratada se propaga ao longo da interface, em vez do próprio meio. Esta é a cabeça da onda usada no método de refração sísmica. Para o método de reflexão sísmica, raios com

ângulos de incidência menores que o ângulo crítico são usados na transmissão para o próximo meio; com ângulos de incidência maior do que o ângulo crítico, ocorre o efeito de reflexão total com relativa visualização de fortes amplitudes. Ambas as ondas refletida e refratada podem ser gravadas na superfície e seus tempos de deslocamento podem ser medidos e usados para detecções de estruturas subterrâneas (Fig. 8).

Figura 8: Definições de onda. Tempo e período são dados em segundos (s) ou milissegundos (ms), a frequência em hertz (Hz), comprimento de onda em metros (m) e velocidade em metros por segundo (m / s).



### 2.3.5 A interação das ondas

A propagação da onda pode ser atenuada por duas formas: por dispersão e absorção. Observando isoladamente a dispersão, onde ocorre o decaimento de energia com a distância percorrida pela onda, a energia é distribuída na frente de onda que se espalha radialmente (espalhamento geométrico ou divergência esférica) numa área sempre maior; isso significa que a amplitude do pulso sísmico na frente de onda decresce à medida que ela se espalha. A frequência utilizada pelos equipamentos de sísmica rasa torna a rugosidade das superfícies, ou das interfaces, propriedades físicas relevantes, pois contribuem na análise do espalhamento do sinal acústico (GOMES, 2009).

A maioria dos coeficientes de reflexão para interfaces de diferentes tipos de rochas são inferiores a  $\pm 0.5$ , resultando em uma pequena parte de energia refletida. Assim, os métodos sísmicos sondam profundidades maiores, porém limitando-se pela atenuação do retorno do sinal (TELFORD et al., 1990).

Tabela 1: Velocidades (m/s) e densidades (g/cm<sup>3</sup>) dos meios relacionados nas interfaces para o cálculo do Coeficiente de Reflexão.

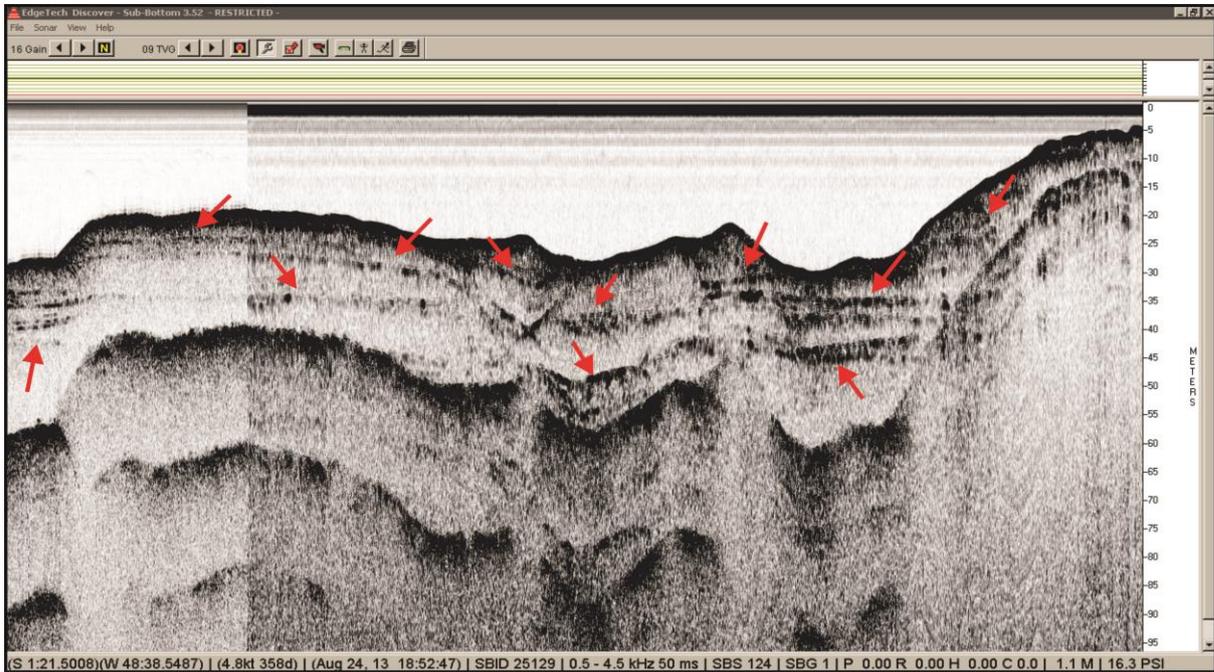
INTERFACES	Camada Superior		Camada Inferior	
	$V$	$\delta$	$V$	$\delta$
Arenito / Folhelho	2000	2,4	2500	2,5
Folhelho / Arenito	2500	2,5	2000	2,4
Superfície do Mar / Ar	1500	1,0	360	0,0012

Modificado de Telford et al., (1990).

Quanto maior o contraste de impedância acústica maior a proporção de energia refletida e melhor demarcação do fenômeno de reflexão das ondas nas interfaces entre meios com variação de densidade e velocidade de propagação. Se não houver contraste de impedância,  $R = 0$ , toda a energia será transmitida. No dado sísmico a interface ou superfície, que marca o contato entre dois meios acusticamente distintos, é representada por uma linha com certa continuidade denominada de refletor sísmico (Fig. 10).

Interfaces com baixo contraste de impedância promovem uma pequena parte da energia refletida. Quando grande parte da energia é refletida, como no fundo oceânico, na superfície do oceano e na base do manto de alteração, são gerados ruídos coerentes, como múltiplas e outros. A inversão de sinais de  $R$  indica uma defasagem de 180° da onda incidente, isso ocorre quando a impedância da camada superior excede a impedância da camada inferior (GOMES, 2009).

Figura 09: Refletores sísmicos de registro sísmico raso obtido no furo do Carnapijó, próximo á cidade de Barcarena, Área do Furo do Carnapijó, com o perfilador de subfundo (0.5 - 4.5 kHz).

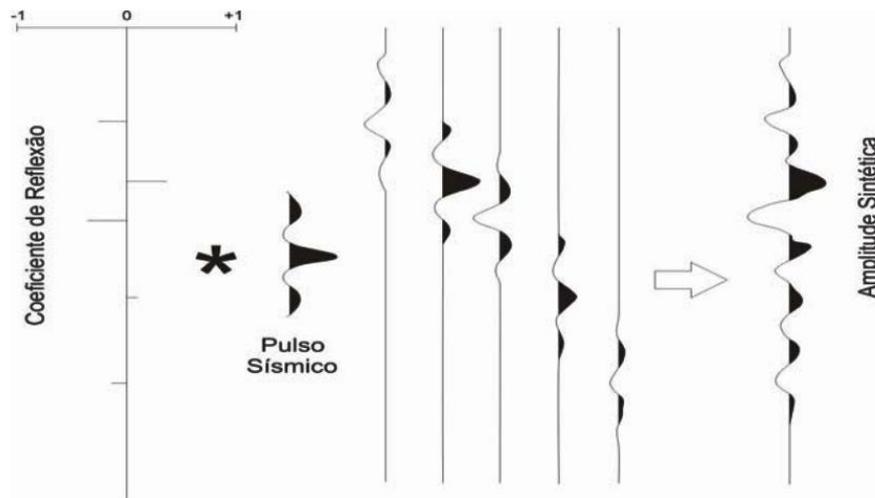


Fonte: Do autor.

A proximidade dos sinais sísmicos em traços sísmicos define a resolução sísmica. O sinal sísmico é o registro da informação de interesse para identificar as feições em subsuperfície. Duas resoluções dependem da frequência: a vertical e a lateral (YILMAZ, 1987). A resolução vertical é a menor distância entre os picos de dois refletores, no caso do X-Star é diretamente influenciada pelo tipo de pulso FM. A resolução lateral é relativa à distância horizontal entre dois sinais (entre traços).

O traço sísmico ou traço ondulado (*wiggle trace*) é o registro das amplitudes na forma de sucessão de picos (positivo) e depressões (negativo), que representam a convolução do pulso sísmico refletido e refratado, vertical e unidimensional, ao atravessar os meios com contrastes de impedância (Fig. 11). Para melhor caracterização de padrões entre refletores, convencionou-se que os picos à direita sejam preenchidos com uma cor determinada pelo usuário (GERHARDT, 1998).

Figura 10: Convolução entre o pulso sísmico e camadas com impedâncias distintas, resultando no traço sísmico sintético.



Modificado de Gerhadt (1998).

A Razão Sinal-Ruído (*SNR/Signal-to-Noise Ratio*) é definida como a razão da potência de um sinal e a potência do ruído sobreposto ao sinal, ou seja, compara o nível de um sinal (desejado) com o nível do ruído de fundo (YLMAZ, 1987):

$$SNR = \frac{P_{sinal}}{P_{ruído}} = \frac{A_{sinal}^2}{A_{ruído}^2}$$

Equação 6: Definição da razão Sinal-Ruído.

Onde **P** é a potência média e **A** é o valor quadrático médio (RMS) da amplitude. Quanto mais alto for a relação sinal-ruído, menor é o efeito do ruído de fundo sobre a detecção ou medição do sinal.

### 2.3.6 Fontes sísmicas

Em um levantamento geofísico, a escolha do equipamento para realizar a aquisição dos dados sísmicos é um dos principais fatores para se levar em consideração, uma vez que, o foco principal do trabalho está diretamente dependente do alcance de penetração/resolução do equipamento. A escolha do tipo de fonte acústica apropriada aos objetivos de um determinado estudo resultará sempre de um raciocínio teórico entre as necessidades de maior penetração (que necessitam de fontes que emitem baixas frequências), e de maior resolução, o que demanda fontes acústicas que emitem largas bandas de frequências (SOUZA, 2006).

De acordo com Reynolds (1990), a ampla discussão deste tema apresenta resultados que comparados permitem avaliar o desempenho de algumas fontes acústicas com relação à resolução e à penetração.

Qualquer fonte acústica utilizada na investigação sísmica de áreas submersas tem por objetivo converter/transmitir a energia acumulada em um capacitor, em movimento da massa de água ao redor da fonte (MCGEE, 1995a; MOSHER; SIMPKIN, 1999). Este movimento da massa d'água se manifesta na forma de variações de pressão e se propaga na coluna d'água a partir da fonte, obedecendo às leis físicas da reflexão, absorção, difração, refração e espalhamento (*scattering*).

São vários os tipos de fontes acústicas desenvolvidos para atuar na água e, como tal, podem ser classificadas de várias maneiras.

Mcgee (1995a) classifica as diferentes fontes de energia usadas na investigação de áreas submersas basicamente em dois tipos: ressonantes e impulsivas.

#### 2.3.6.1 Fontes ressonantes

Em relação à classificação de fontes ressonantes, McGee (1995a) e Mosher; Simpkin (1999) incluem desde fontes usadas na batimetria convencional (ecobatímetros) até fontes mais modernas que possuem capacidade de penetração, ou seja, agem como perfiladores propriamente ditos (*chirp*). Este tipo de fonte produz um sinal acústico com forma conhecida, altamente repetitiva, e origina-se a partir da frequência de ressonância de pastilhas (cristais) piezelétricas.

De acordo com Souza (2006), este tipo de fonte acústica é o mais empregado na investigação de áreas submersas. Utilizam este sistema desde ecobatímetros de alta frequência, que emitem frequências específicas em intervalos de tempo mínimos (50 kHz; 200 kHz), até as modernas fontes denominadas *chirp*, que emitem amplos espectros de frequências num determinado intervalo de tempo (0.5 a 12 kHz, Sub-Bottom Profile).

No entanto, as fontes ressonantes possuem limitações físicas com relação à absorção da energia, ou seja, não é ilimitada a capacidade ou a potência de emissão de sinais acústicos. Os sistemas sísmicos com fontes acústicas do tipo *chirp* hoje disponíveis são digitais e disponibilizam várias alternativas operacionais que permitem o controle total do espectro de frequências e das características dos pulsos emitidos, propriedades estas que estão diretamente relacionadas com a resolução e penetração do sistema (SOUZA, 2006).

Em um de seus levantamentos, Placzek; Haeni (1994) compararam o desempenho, em águas rasas, de fontes acústicas do tipo ressonantes em projeto piloto de avaliação de processos erosivos atuantes em áreas próximas aos pilares de uma ponte sobre o rio *Connecticut* (EUA). Utilizaram fontes ressonantes de frequência fixa de 3,5, 14 e 20 kHz e também fontes do tipo *chirp* que emitem espectros de frequência mais amplos, no caso entre 2-16 kHz.

Estes autores observaram que estas fontes acústicas são perfeitamente aplicáveis na investigação de áreas rasas, já que todas elas apresentaram resultados satisfatórios nos ensaios em áreas com coluna d'água até mesmo inferiores a 1 m. Destacam ainda que o *chirp* apresentou excelentes resultados em coluna d'água de até 0,3 m. Quanto à resolução, a fonte fixa de 3,5 kHz e a fonte *chirp* mostraram resultados semelhantes, permitindo identificar estratos de até 0,8 cm.

As fontes de maior frequência apresentaram melhor resolução, permitindo identificar estratos de até 0,3 cm de espessura. Quanto à penetração, as fontes acústicas com frequências superiores a 10 kHz alcançaram não mais que poucos metros (3 m para a fonte de 20 kHz; 6 m para a fonte de 14 kHz). A fonte fixa de 3,5 kHz penetrou cerca de 30 m, e a fonte *chirp*, 61 m, ratificando a necessidade de utilização de fontes de baixa frequência quando o projeto indica a necessidade de penetração nas camadas sedimentares rasas.

### 2.3.6.2 Fontes impulsivas

As fontes acústicas impulsivas classificadas por McGee (1995a) são aquelas que liberam grande quantidade de energia num intervalo de tempo que é próximo de zero. Mosher; Simpkin (1999) desenvolvem classificação análoga para fontes desta natureza, subdividindo este tipo de fonte de aceleração de massa, implosivas e explosivas.

Fontes acústicas do tipo “aceleração de massa” (MOSHER; SIMPKIN, 1999) são as que provocam rápido deslocamento de massa d’água quando da emissão do sinal acústico e têm sido muito utilizadas atualmente na sísmica de reflexão de alta resolução. Os *Boomers* são os representantes mais comuns deste tipo de fonte.

O princípio deste tipo de fonte está relacionado com o deslocamento da massa d’água quando a energia elétrica armazenada em um capacitor é descarregada sobre uma mola plana conectada a uma placa vibradora. Ao contrário das fontes do tipo “forma de onda controlada”, estas fontes podem absorver até 1000 J de energia e, portanto, tornarem viável a emissão de sinais de um amplo espectro de frequências (500 a 20.000 Hz) com alta potência, possibilitando a obtenção de excelentes registros sísmicos com grande penetração no substrato.

Os *Air-Guns* de pequeno porte são incluídos neste tipo de fonte, já que tem também por princípio provocar rápido deslocamento de massa d’água quando o ar comprimido contido em recipientes apropriados é subitamente liberado na coluna d’água através de válvulas especiais.

Apesar de se constituírem em fontes acústicas com grande capacidade de absorção de energia e com poder de emissão de espectros de frequências mais baixas, tornando viável, maior penetração no substrato, além de maior relação sinal/ruído, quando comparado às demais fontes acústicas, sistemas desta natureza têm limitações com relação ao rebocamento a maiores profundidades, a pouca diretividade dos sinais emitidos, à maior complexidade nas operações de manutenção, mais exigentes e constantes, e finalmente com a maior complexidade operacional (cuidados especiais no manuseio), o que comumente não permite a utilização destes sistemas em águas muito rasas.

Sob a denominação de fontes do tipo implosivas, Mosher; Simpkin (1999) classificam aquelas fontes impulsivas que utilizam a implosão de uma bolha para criar uma onda de pressão (*pressure wave*) na coluna d’água. *Vaporchoc*, *flexichoc*, *waterguns* são alguns dos exemplos deste tipo de fonte.

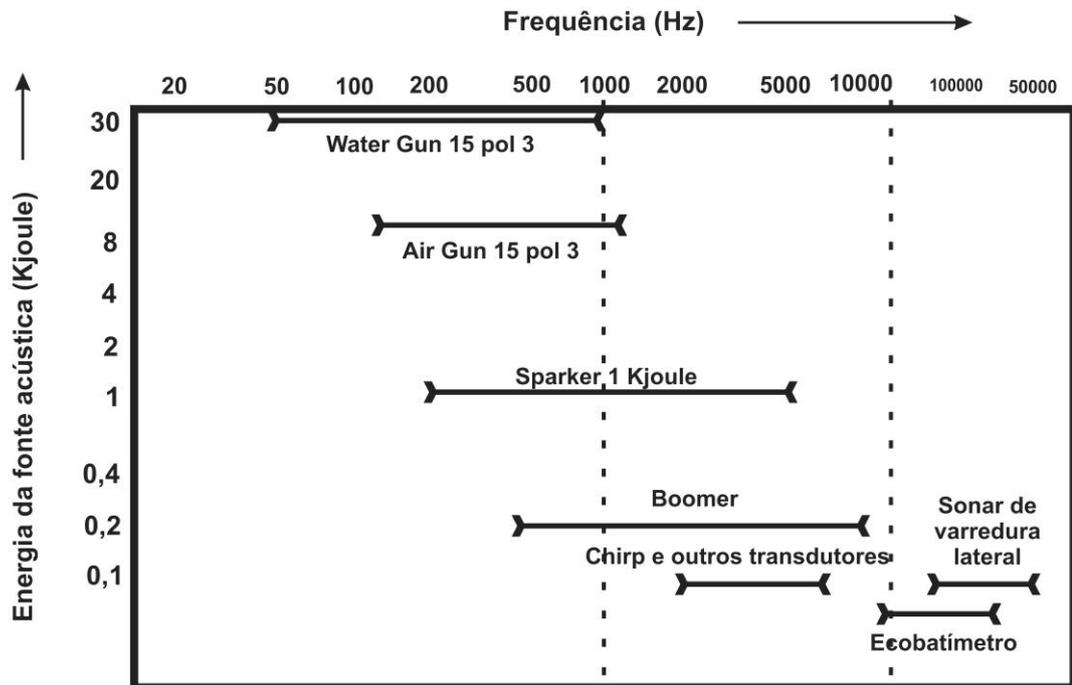
Estes sistemas empregam ar comprimido para deslocar subitamente um pistão encapsulado, que se choca em alta velocidade com a massa de água ao redor, gerando uma cavidade na coluna d'água preenchida pelo vácuo. A imediata implosão desta cavidade gera o sinal sísmico de interesse e com uma assinatura bastante definida que produz resultados muito interessantes na investigação de áreas submersas. Estas fontes acústicas são utilizadas basicamente na investigação profunda, embora muitas delas fossem, nos dias atuais, fabricadas também em versões de menor porte, o que as tornam viáveis na investigação de águas rasas (SOUZA, 2006).

Um último tipo de fonte impulsiva, segundo Mosher; Simpkin (1999) são as fontes explosivas que, como expressa o próprio nome, utilizam dinamites, espoletas elétricas, gás, entre outros meios, para gerar ondas acústicas na coluna d'água.

Apesar de se constituírem em fontes acústicas de relativo baixo custo, alta potência e grande poder de emissão de amplos espectros de frequências (inclusive altas frequências) oferecendo excelente penetração e razoável resolução, este tipo de fonte possui algumas limitações técnicas específicas, a se destacar a pobre repetitividade, e a limitada diretividade, além de restrições ambientais.

A fonte sísmica explosiva utilizada na investigação de áreas submersas ainda nos dias de hoje é o *sparker*. Este tipo de fonte tem por princípio a geração de uma descarga elétrica, num eletrodo mergulhado num meio condutor (água do mar) conectado a um banco de capacitores instalado e gerenciado na embarcação. A descarga elétrica no meio condutor cria uma bolha de vapor que em rápida expansão gera um impulso positivo que se propaga na coluna d'água gerando o sinal sísmico desejado (SOUZA, 2006).

Figura 11: Correlação entre: Tipo de fontes sísmicas, espectro de frequências emitido, energia da fonte (kJ), profundidade de investigação.



Modificado de Trabant (1984).

### 2.3.7 A sismoestratigrafia

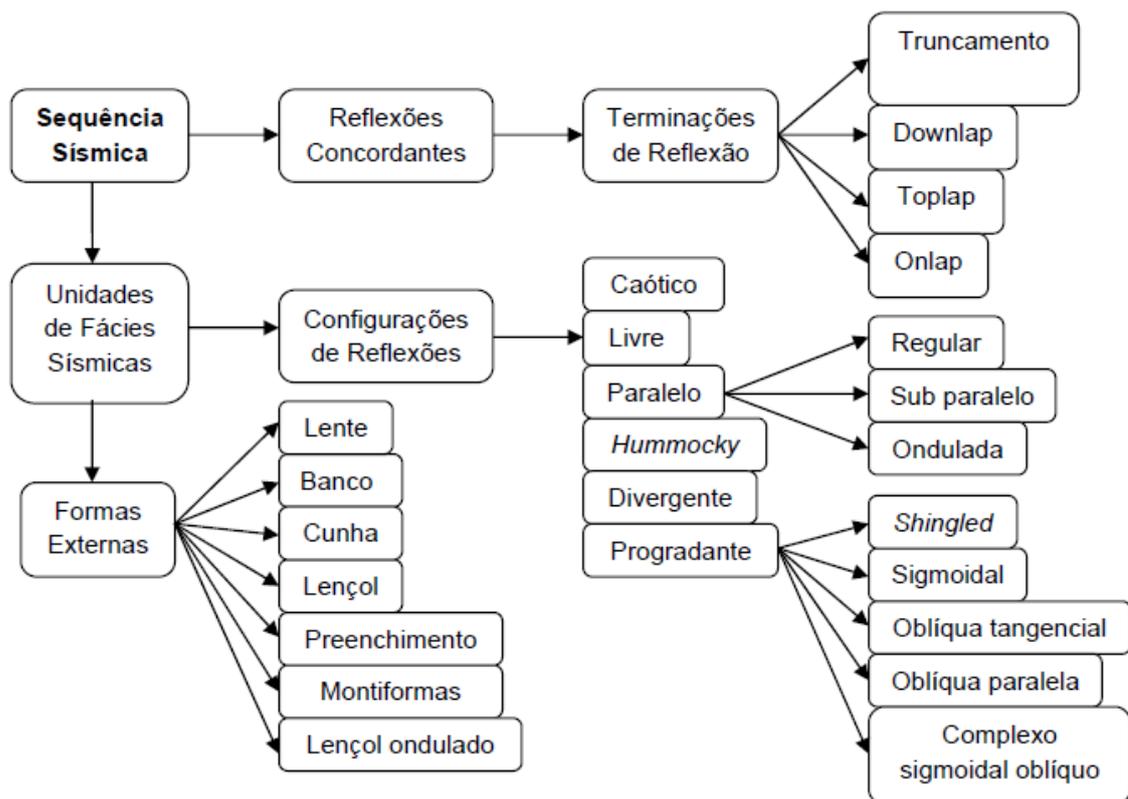
A sismoestratigrafia é o estudo da estratigrafia e fácies deposicionais de acordo com a interpretação dos dados sísmicos, permitindo a compreensão da evolução tectono-sedimentar da bacia (RIBEIRO, 2000). Para tanto, é preciso entender as reflexões sísmicas, estabelecendo suas terminações e configurações para posterior interpretação dos padrões de estratificação, utilizados para o reconhecimento e correlação das sequências deposicionais, interpretação do ambiente deposicional e estimativa das litofácies (MITCHUM, et al., 1977).

Os levantamentos sísmicos de alta resolução, que utilizam o método de perfilagem de subsuperfície em ambiente marinho, incluem em sua área operacional a coluna d'água e as primeiras dezenas de metros como sendo os meios investigados. Portanto, comparando-se à escala de trabalho dos métodos sísmicos, o primeiro refletor registrado pela sísmica convencional representaria toda a espessura investigada na sísmica rasa. Essa distinção orientará a observação da hierarquia das unidades definidas pela estratigrafia de sequência.

Nos estudos relacionados à cronoestratigrafia, as reflexões sísmicas visualizadas em uma seção sísmica são entendidas como superfícies estratais ou discordâncias. Gomes (2009) explica que os contrastes de impedância acústica acabam resultando em interfaces de tempo das litologias, porém as reflexões não se constituem necessariamente nos conceitos de contatos litológicos; por vezes as reflexões constituem-se em diácronas (linhas de tempo síncronas).

Essas reflexões ocorrem devido ao contraste de velocidade-densidade (impedância acústica) encontrado nos limites das unidades litológicas que cortam linhas de tempo (diácronas), sendo destacadas por superfícies estratais e pelas discordâncias (RIBEIRO, 2000).

Figura 12: Organograma de interpretação sismoestratigráfica de uma sequência sísmica.



Adaptado de Mitchum et al. (1997).

### 3 AQUISIÇÃO DE DADOS DE CAMPO

A partir da delimitação de quatro grandes áreas de concentração onde o trajeto sísmico foi realizado, procurou-se identificar características sísmicas diferenciadas com linhas de aquisição variando de 30 a 50 km, cobrindo 250 km de linhas contínuas na área estudada.

A arquitetura do projeto baseou-se nas cartas batimétricas disponíveis no site da Marinha do Brasil - DHN. A projeção das linhas ao longo dos rios obedeceu aos limites das cotas batimétricas seguindo as diferentes mudanças morfológicas, a fim de se obter melhores resultados na caracterização de fundo e subfundo dos diferentes subambientes amazônicos.

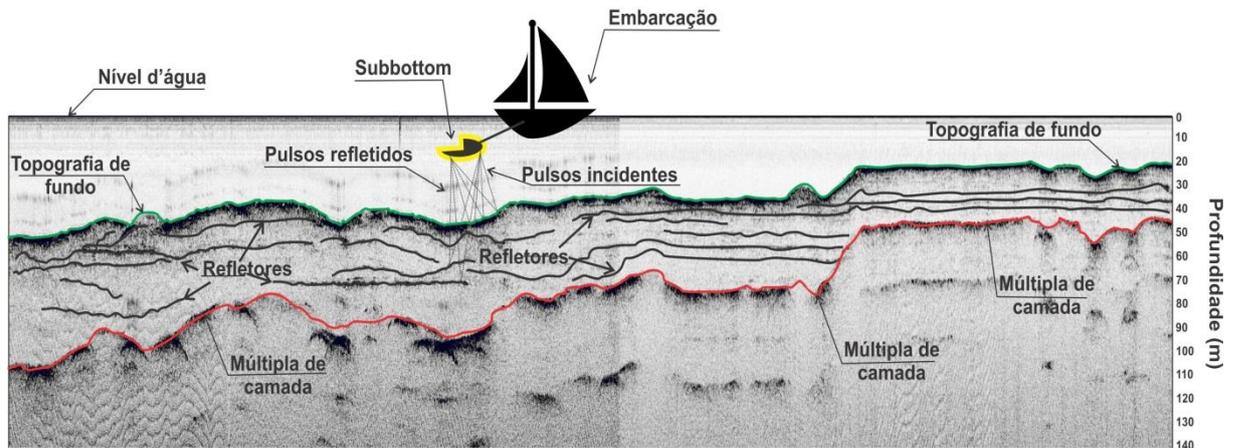
Ao longo dos ambientes navegados foi estabelecida uma cota de velocidade média com o objetivo de obter melhores visualizações dos estratos e assim melhorar a qualidade dos dados, uma vez que, esse método pode ser executado de forma contínua e livre sobre a superfície de água. Uma grande vantagem dos métodos sísmicos de alta resolução em relação aos demais métodos utilizados na investigação dos meios submersos está na obtenção, em tempo real, de registros sísmicos semelhantes a seções geológicas.

A interpretação é realizada traçando-se linhas ao longo dos principais refletores identificados. Os refletores sísmicos em uma seção são nada mais que fortes contrastes de impedância acústica identificados pelas ondas ao se propagarem através desse meio, representando assim, os contatos entre meios geológicos com propriedades acústicas distintas.

Em uma visualização da seção sísmica bruta pode-se inferir que quanto maior o contraste de impedância e maior coeficiente de reflexão, maior será a nitidez com que será visualizada a interface (o refletor) na seção obtida, podendo ser observado na seção sísmica ilustrada na (Figura 14).

Nos registros obtidos em campo por meio da perfilagem sísmica contínua, observam-se basicamente camadas atravessadas pelo sinal acústico ao longo da coluna d'água, dos estratos sedimentares inconsolidados e do embasamento acústico (entendido como limitador da penetração do sinal sísmico).

Figura 13: Ilustração esquemática da aquisição de sismica rasa a partir de um perfil não tratado.



Fonte: Do autor.

### 3.1 Embarcação

A coleta de dados foi feita a bordo da embarcação NM Rey Benedito que possui características apropriadas para o levantamento. Todas as estruturas necessárias para adequar a embarcação à aquisição foram feitas anteriormente junto com testes de aquisição.

A logística de planejamento levou em consideração todos os materiais necessários para o abastecimento satisfatório durante todo o levantamento como material de manutenção, segurança e combustível. Devido a grande extensão dos cursos navegáveis na Amazônia, há lugares remotos (mais específicos dos rios amazônicos) com pouca informação de estudos batimétricos ou de maré feitos pelo órgão responsável, a Marinha do Brasil, podendo oferecer riscos ao levantamento.

O trabalho envolveu grandes distâncias e duração de dias necessita de uma organização extra com os materiais de campo além dos materiais e mantimentos destinados à tripulação. A organização do projeto foi adequada às necessidades de melhores posicionamentos de materiais, pessoas e arranjos dentro da embarcação, de forma a familiarizar o ambiente como sendo um laboratório de pesquisas flutuante, buscando uma praticidade nos trabalhos ao decorrer dos dias de aquisição.

Figura 14: Ilustração dos compartimentos da embarcação REY Benedito. Divisão dos compartimentos de acordo com a aquisição de dados geofísicos e oceanográficos.



Fonte: Do autor.

### 3.2 Equipamentos

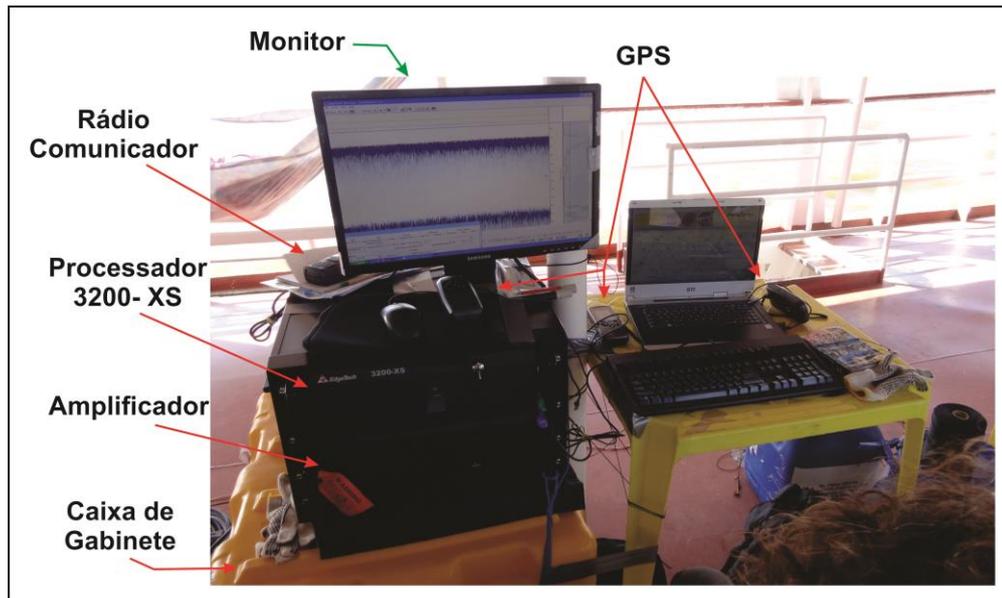
O levantamento sísmico foi realizado através de perfilagem sísmica com o sistema *X-Star 3200-XS* da *Edgetech*, operando nas principais faixas de frequências (0.5–8.0 kHz/5, 0.5–6.0 kHz/20, 0.5–4.5 kHz/50, 0.5–6.0 kHz/9 e 0.7–12.0 kHz/20), a bordo da embarcação NM Rey Benedito numa velocidade de navegação de 5 a 7 nós em média, sendo os dados gravados no formato original da EdgeTech (\*.jsf).

Os equipamentos para a aquisição foram todos testados e ajustados com o intuito de verificar possíveis danos ou falhas provenientes de levantamentos anteriores, o que poderia interromper ou até mesmo atrasar a continuidade da campanha.

Devido às questões de logísticas e financeiras a proposta do levantamento ocorreu de forma sistemática, com o aproveitamento das condições atmosféricas (de tempo), condições de maré/correntes e duração do dia de sol, uma vez que, torna-se impraticável a realização da aquisição com o Sub-Bottom em condições de pouca luminosidade em regiões amazônicas

devido principalmente a alta frequência de flutuação de objetos na água (troncos de madeira, por exemplo).

Figura 15: Ilustração dos equipamentos utilizados na aquisição dos dados do Sub-Bottom profile (sistema X-Star).



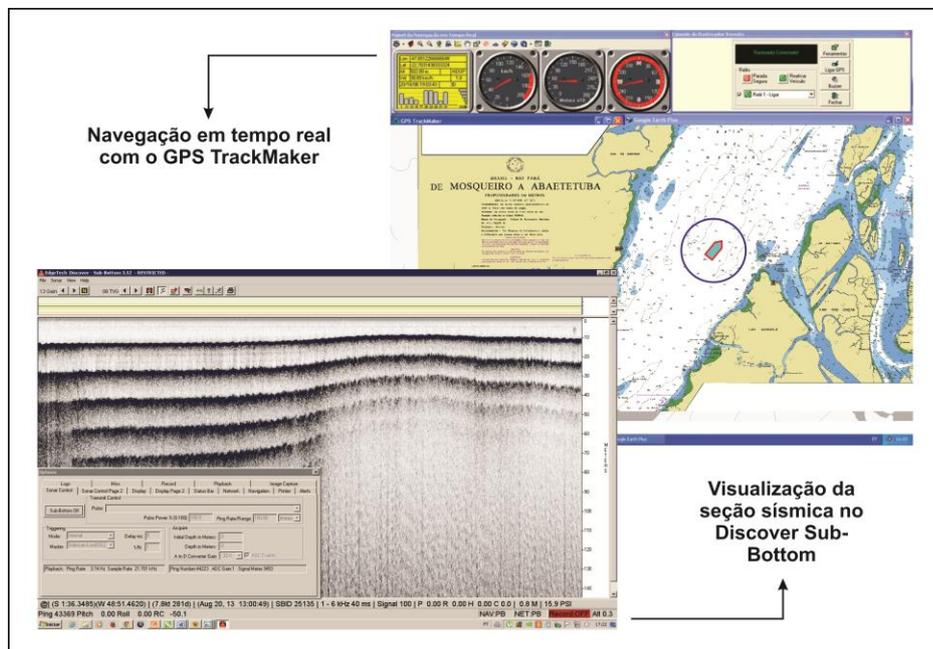
Fonte: Do autor.

Durante a campanha foram feitos arranjos para preservar os equipamentos de quedas provenientes do balanço da embarcação, cuidados com o contato com a chuva nos materiais elétricos além de amarrações diversas. Nos períodos onde as condições de aquisição não eram boas buscou-se paralisar o levantamento, guardar os materiais e procurar um local mais abrigado do mal tempo.

### 3.3 Plano de navegação

A rota de navegação para a aquisição sísmica foi traçada visando estudar a maior extensão possível do complexo de rios amazônicos e seus diferentes ambientes deposicionais. A caracterização através da utilização da perfilagem de sísmica rasa não é uma ferramenta usualmente utilizada em nossa região, trabalhos como de Silveira (1989) e Vital (1996) demonstraram algumas características da superfície e subsuperfície, respectivamente através de perfis sísmicos rasos de alta resolução.

Figura 16: Programas na aquisição dos dados de sísmica rasa. O *GPS TrackMaker* é utilizado na visualização do percurso. O *Discover Subbottom* é o programa de aquisição fornecido pela fabricante.



Fonte: Do autor.

Para isso as linhas foram confeccionadas dentro do programa de georeferenciamento de imagens *ArcGIS*, a localização das linhas de aquisição geofísicas procurou inferir um possível arranjo de estruturas diferenciadas imersas a partir dos mapas de drenagens tectônicas da região do Marajó (AZEVEDO, 1991; ROSSETTI, 2010; ROSSETTI et al., 2002; 2008) para uma teoria de visualização de eventos em subsuperfície além de analisar as diferentes morfologias de fundo dos rios e seus estratos de camadas. Todas essas possibilidades de resultados partiram da observação das cartas náuticas (números 304, 305, 306) disponibilizadas no site da Marinha do Brasil (DHN).

O acompanhamento do percurso da embarcação foi feito de forma instantânea e simultânea a aquisição dos dados através do programa *GPS Track Maker* (Fig. 17), muito utilizado para a navegação em tempo real conectado a um receptor GPS. O sistema *X-star* proporciona a visualização ao mesmo tempo em que ocorre a aquisição dos dados, facilitando a observação de eventos sísmicos indesejados ou mesmo a visualização de refletores em boas condições de penetração do substrato.

Na área de estudo a cota batimétrica encontrada na maioria das regiões de análise não excedeu aos 50 m de profundidade, com exceção de localidades como o Furo do Capim com profundidades variando de 60 a 70 m, indicando esforços estruturais diferenciados nessa região.

### 3.4 Testes do equipamento

A finalização da infraestrutura de aquisição junto à embarcação foi realizada nas vésperas da saída de campo, uma vez que, a checagem dos equipamentos foi realizada previamente em laboratório.

Nos levantamentos de sísmica rasa é importante considerar que o arranjo de equipamentos e logística de campo é muito oneroso para uma simples coleta de dados. Outro fator relevante é o objetivo principal do trabalho, que vai desde a investigação do embasamento geológico ou até mesmo a mensuração das espessuras dos refletores sísmicos (camadas sedimentares).

A improvisação de um suporte de guincho lateralmente a embarcação possibilitou o arrasto do equipamento (sistema *X-Star*) e assim a estabilidade apropriada para aquisição dos dados. O sistema de roldanas na extremidade do guincho facilitava as mudanças de profundidade que o peixe se submetia nas diferentes situações de coleta, sempre regulando um máximo 3m de profundidade em relação à superfície na tentativa de se evitarem arrastos com o fundo.

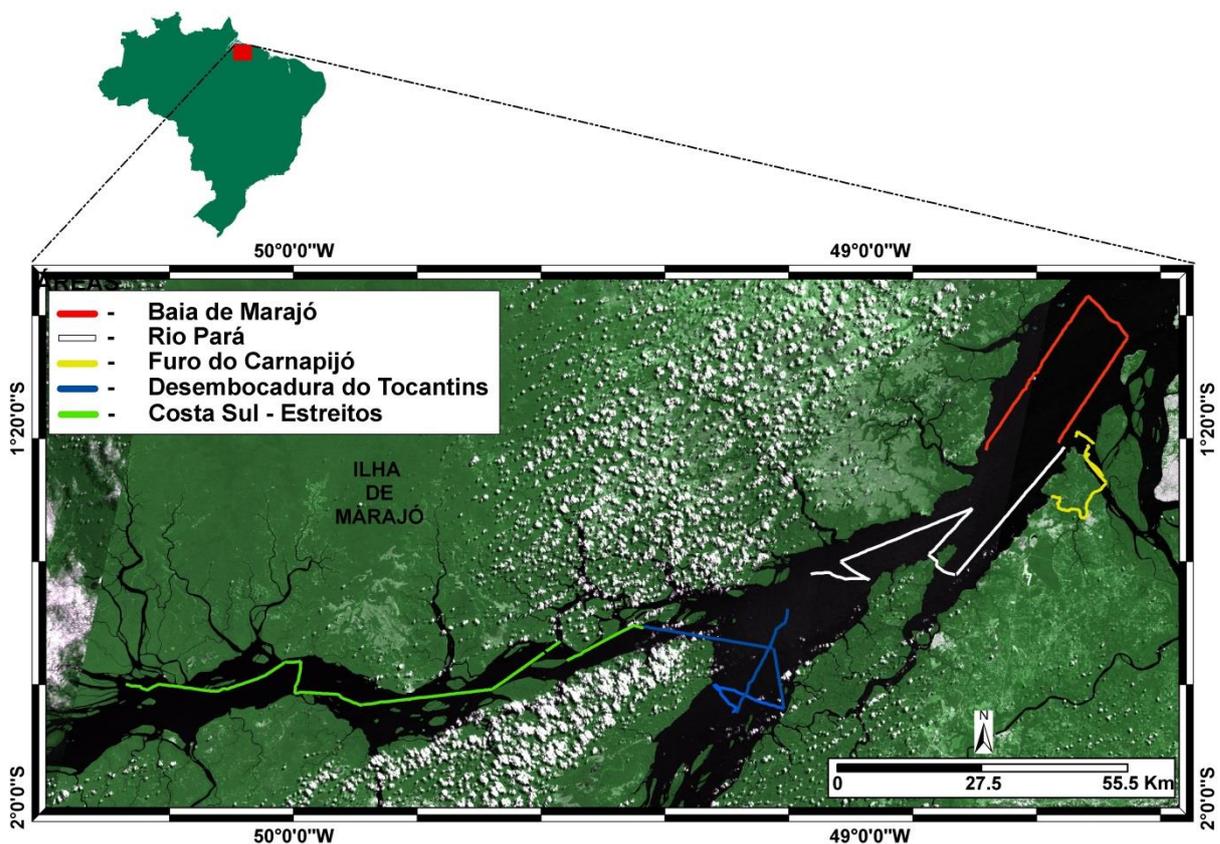
Durante os percursos iniciais de teste foram observadas as seguintes limitações no que se refere à resolução dos dados sísmicos: as camadas de areia e afloramento de rochas atenuam as altas frequências emitidas pela fonte. As maiores frequências podem ser notadas na parte superior da seção sísmica enquanto os eventos localizados na parte inferior são caracterizados por baixas frequências

## 4 TRATAMENTO DOS DADOS DE SÍSMICA RASA

### 4.1 Apresentação dos dados

Devido à espacialidade das linhas sísmicas serem consideradas como regionais as seções sísmicas foram inicialmente separadas em cinco (5) grandes áreas (Fig. 18), a localização e nomeação das áreas basearam-se na carta náutica disponibilizada pela Marinha do Brasil (cartas náuticas de números 304, 305, 306), onde está identificada a denominação de cada localidade. O limite das áreas não obedece nenhuma demarcação territorial, sendo definido de acordo com o trabalho.

Figura 17: Ilustração da disposição das linhas de aquisição geofísicas ao longo da área de estudo.



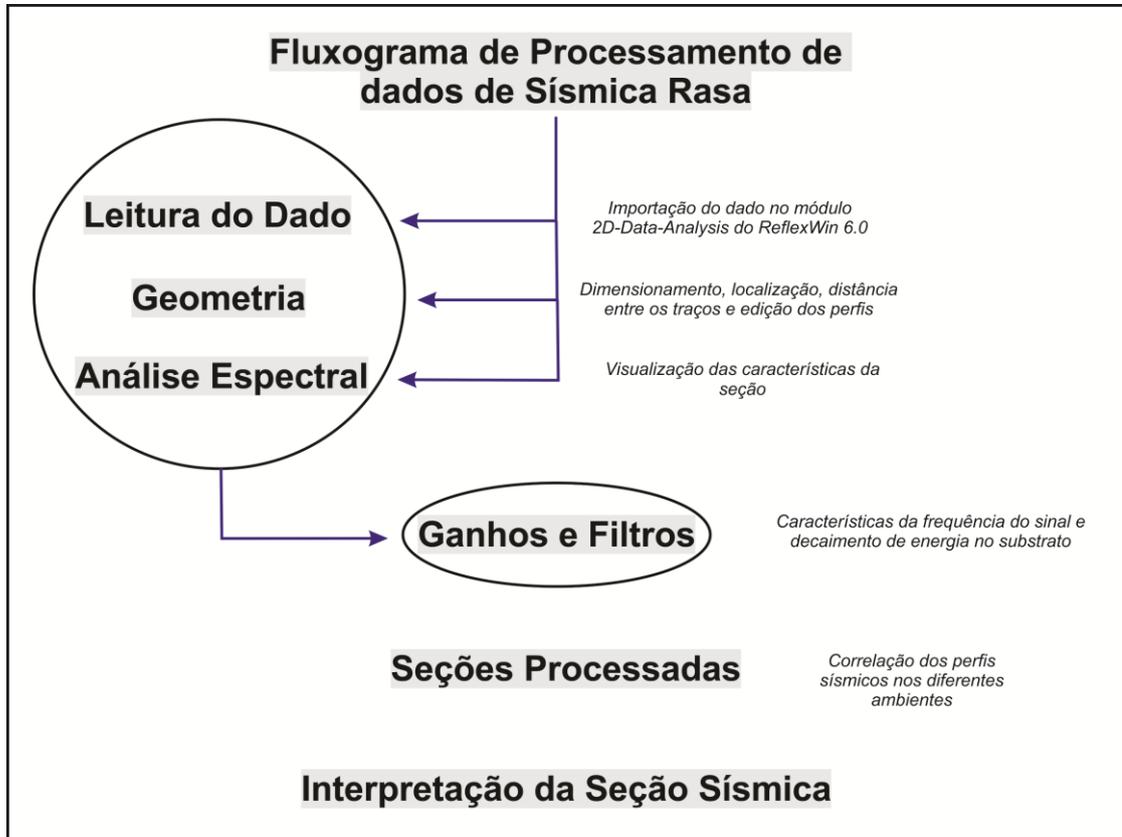
A partir de um fluxograma desenvolvido em laboratório foram selecionados alguns processos e filtros para cada perfil sísmico tratado, de forma a definir suas características sísmicas e correlacionados dentro de sua área. Na tentativa de conseguir uma metodologia apropriada, buscou-se uma boa apresentação dos dados, destacando características sísmicas

marcantes, além de relacionar parâmetros geológicos em uma tentativa de entendimento de cada área.

#### 4.2 Fluxo de processamento

As seções sísmicas seguiram a sequência de processamento de sísmica rasa desenvolvido por (GOMES, 2009), alterando algumas etapas de acordo com as necessidades ocasionadas pela distinção da área de aquisição, onde procurou centralizar as principais etapas do processamento editando a geometria do traço, extraíndo ou atenuando ruídos que se apresentam no domínio da frequência e da amplitude, atenuando múltiplas de fundo do rio, compensando a perda de amplitude pelo decaimento de energia do sinal e interpretando a seção.

Figura 18: Fluxograma das etapas de análise e aplicação das fases de processamento nos dados de sísmica rasa.

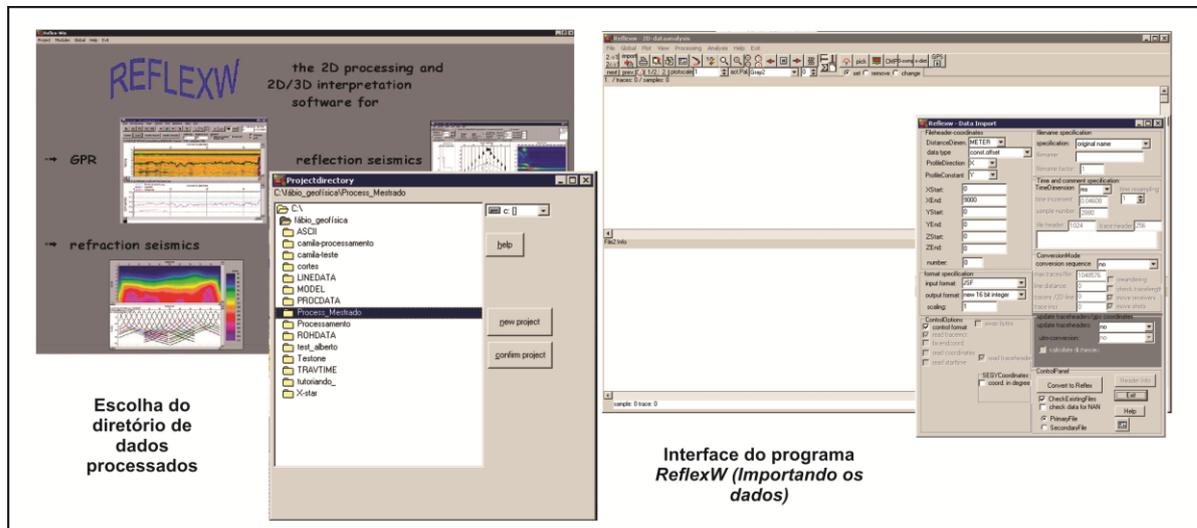


### 4.3 Importação dos dados

A aquisição da sísmica rasa foi feita utilizando-se o *Discover Sub-bottom*, programa disponibilizado pela empresa *EdgeTech*, os dados brutos foram todos salvos no formato *.jsf*, formato padrão de aquisição do fabricante, possuindo ainda a opção padrão de processamento o SEG-Y. O formato *.jsf* elimina o padrão SEG-Y EBCDIC e os cabeçalhos binários, e acrescenta uma mensagem no início do cabeçalho de cada traço.

Inicialmente todos os perfis sísmicos foram detalhadamente analisados no programa de aquisição *Discover Sub-Bottom* e mensurados seus tamanhos através de suas coordenadas inicial e final dentro do *Software* de visualização terrestre *Google Earth*. Para facilitar a aproximação das distâncias os perfis foram considerados como retas ao longo dos traçados, com exceção dos perfis com sinuosidade considerável, como por exemplo, curvas acentuadas modificando a rota em 90° ou mais, na aquisição em rios com pequena largura ou sinuosos.

Figura 19: Visualização do programa de processamento dos dados. *ReflexW*.



Fonte: Do autor.

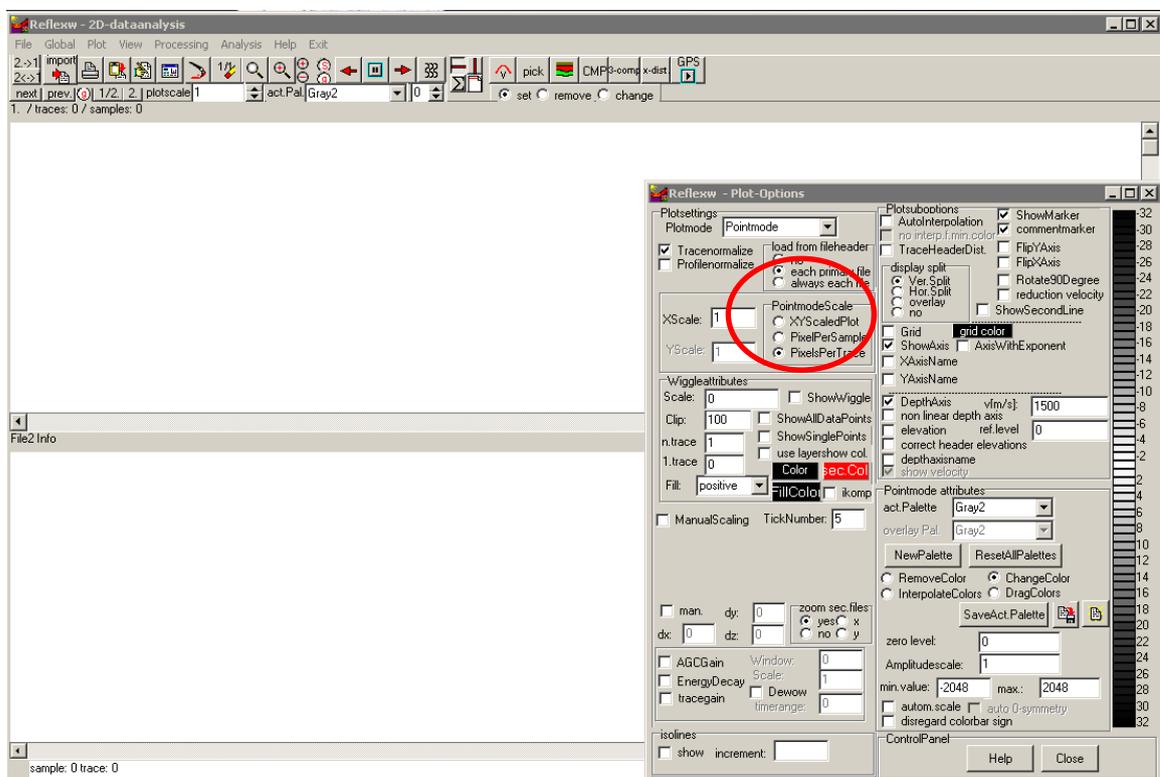
A visualização do posicionamento real das linhas sísmicas e sua individualização por regiões ocorreu através do programa de aquisição de dados e processamento *SonarWiz* cedido pelo fabricante por um período definido.

Ao final da etapa de avaliação das linhas sísmicas foram selecionadas para a edição e processamento no *Software ReflexW* cerca de 250 km de linhas sísmicas através do módulo, o *2D-Data Analysis*.

A caracterização geométrica foi realizada de forma individual, perfil por perfil, na tentativa de minimizar possíveis prejuízos na formatação do dado, identificando distorções nos registros de posicionamento das coordenadas durante a aquisição digital. O primeiro modo de observação do dado no ambiente *ReflexW* é feito ao escolher o formato de visualização, no menu *Plot/Options*.

A visualização do perfil pode ser feita de duas maneiras, em relação a visualização do dado, no modo *Plotmode* os dados são traçados através de pixels coloridos e no modo *Wigglemode* os dados são representados através de uma linha poligonal, além de ser representada em diferentes escalas horizontais *PointmodeScale*. Outras opções vão desde a modificação da disposição dos traços, ganhos, tabela de cores, display de visualização dos perfis, dentre outros.

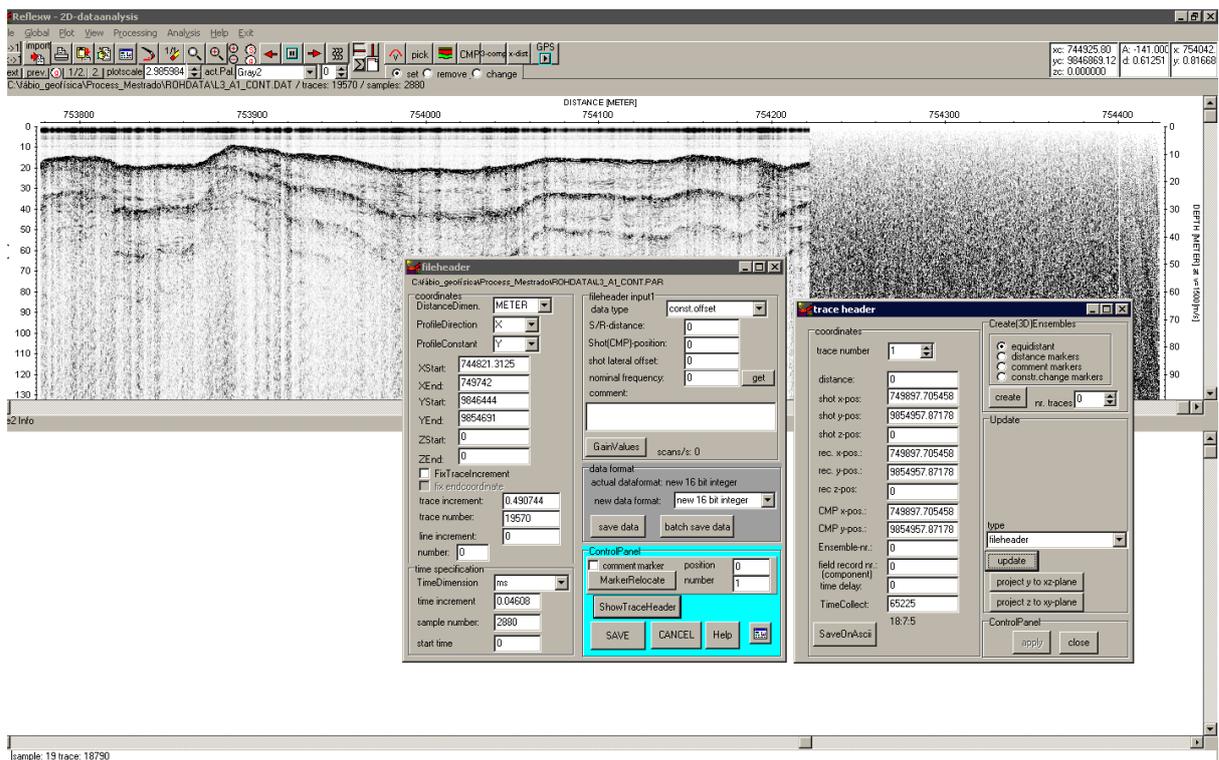
Figura 20: Opções de visualização dos dados no programa ReflexW.



Fonte: Do autor.

Como exemplo, utilizou-se o perfil **L3**, perfil localizado na margem esquerda da baía de Marajó, o qual possui 79.570 traços distribuídos ao longo de 9157 metros de linha sísmica. As coordenadas (UTM) são inseridas no cabeçalho dos traços e automaticamente identifica-se a distância entre os traços (*trace increment*), que para o Perfil 16 foi de 0,50m (Fig. 22).

Figura 21: Correção geométrica dos dados no programa *ReflexW*.



Fonte: Do autor.

Para uma melhor visualização do perfil sísmico pode-se dispor da utilização de outras ferramentas disponíveis no *software*. A comumente utilizada é a retirada da coluna d'água, através do passo *Processing / StaticCorretion / muting*. A partir da marcação da superfície de fundo o *software* realiza qualquer sinal/ruído da coluna de água resultando em uma coluna visualmente “limpa”.

Outra ferramenta de edição do dado é a remoção de grupos de traços através do passo *Processing / Edit traces\_traceranges / remove*, que remove parte da extensão horizontal da seção, uma vez que, a realização de perfis sísmicos muito longos, chegando a quilômetros de

distância, muitas vezes necessita de operações para poder dar enfoque em trechos específicos do perfil, em regiões com pouca profundidade, como é comum na região amazônica.

Em aquisições de dados de sísmica rasa, sempre se depara com o aparecimento de múltiplas de altas amplitudes abaixo da superfície investigada, fato de conhecimento que esse fenômeno é intrínseco ao método e se destaca por repetidas vezes no registro sísmico, com essa dificuldade torna-se necessária algumas etapas, a mais simples etapa consiste na remoção de parte da seção a partir do corte do tempo duplo: *time cut*, embora essa etapa não seja um método de atenuação da múltipla.

#### 4.4 Análise espectral dos dados

O perfilador X-Star funciona de modo a emitir um pulso de frequência modulada FM em um dado intervalo de tempo (ms), esse pulso carrega uma faixa de altas frequências, como por exemplo 2-12 KHz, que ao convoluir nas camadas e retornar ao sensor formará o traço sísmico. A emissão dessas ondas resulta na duplicidade da captação de reflexões em tempos diferentes o que gera a duplicação das estruturas e dificulta a sua identificação, uma vez que grande quantidade de ruído possui valores de amplitude próximos às amplitudes naturais, portanto, de difícil exclusão pelos métodos existente na etapa de tratamento destes dados (HOULDING, 1994).

Durante o processo de aquisição uma quantidade de sinais é captada com valores incoerentes que resultam principalmente em falhas de aquisição e estruturas fantasmas (ROBINSON; TREITEL, 1980).

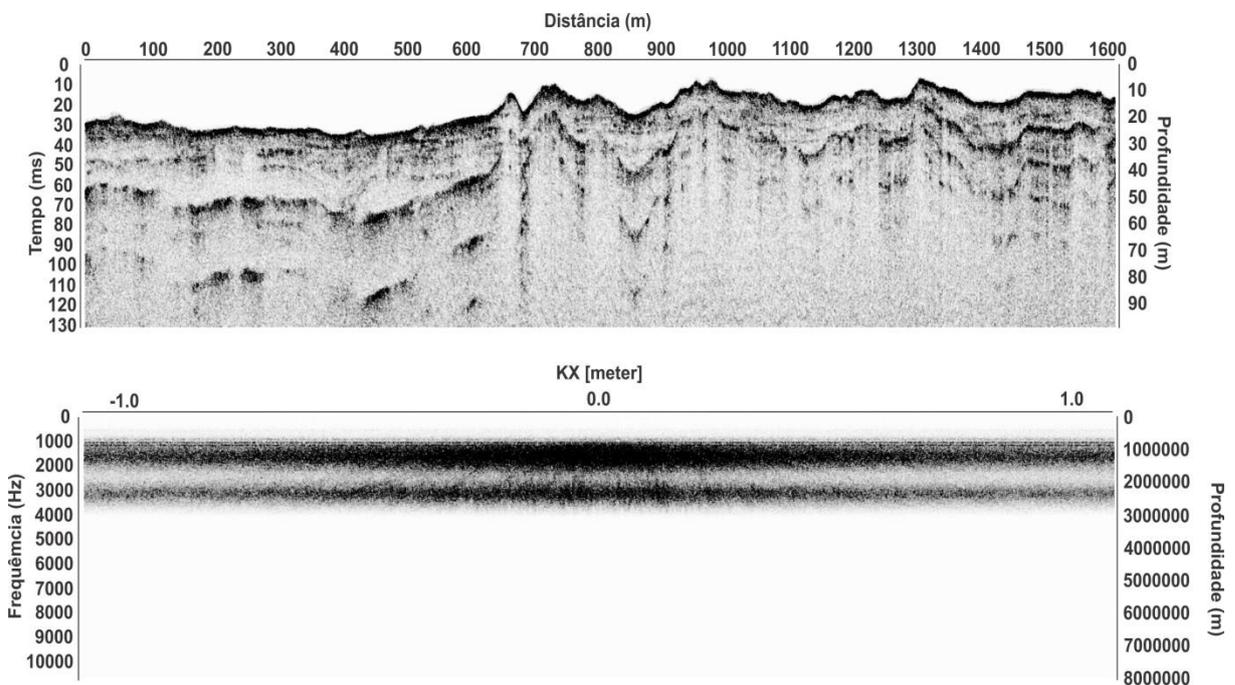
O produto gerado pelo sistema X-Star é uma seção geológica definida a partir de métodos indiretos de análise e, juntamente com a resposta que se deseja apurar (o alvo da pesquisa) o dado acompanha outros resultados inerentes aos fenômenos ondulatórios do método e que dificultam uma visualização mais nítida da seção – os ruídos e as múltiplas.

A partir da visualização do dado bruto é feita a análise na sua morfologia e estratificação de camadas, a utilização dos filtros tem por objetivo enfatizar essas feições, amenizar os sinais aleatórios (ruídos) e as múltiplas. O processamento dos dados decorre da edição de cada traço sísmico dentro do perfil de forma a alterar os parâmetros como espectros de amplitude, tempo, frequência, etc.

Um importante parâmetro de análise é o estudo do espectro de frequências dos traços, que demonstra uma concentração de frequências (KHz) dos traços dentro de uma seção sísmica. Esses valores de frequência que predominam no dado estarão com maiores valores de amplitude (GOMES, 2009). Com isso é possível identificar parte das anormalidades no dado e a partir disso realizar a filtragem desses sinais.

O espectro de frequências dos traços do perfil **L3** (Fig. 23), localizado na margem esquerda da Baía de Marajó, apresenta uma faixa de frequências entre 1 e 4 kHz. A identificação dessas faixas no domínio das frequências dentro de uma seção permite relacionar a possível origem dos sinais, identificando e determinando as frequências de sinais indesejáveis como os ruídos, que aparecem no registro, com um período pequeno, sugerindo valores altos nas frequências.

Figura 22: Espectro de distribuição no domínio FK (frequência/ n° de onda) mostrando as faixas de amplitudes nas frequências ente 1 e 4 kHz.



Fonte: Do autor.

Outro importante parâmetro de análise dos sinais em uma seção sísmica é o espectro de frequência com o tempo (ms), que representa a soma dos traços sísmicos, podendo as faixas

de frequências serem correlacionadas com a profundidade e a amplitude do sinal em um dado. A partir da análise do espectro da seção observam-se faixas de frequências distribuídas

#### 4.5 GANHOS E FILTROS

No decorrer da aquisição, a interação das ondas sísmicas com o substrato gera perdas energéticas devido o espalhamento geométrico e conseqüente diminuição da amplitude de onda, para contornar essa perda o uso dos ganhos nas seções torna o dado visualizável quanto aos eventos de interesse fornecendo um dado de melhor qualidade.

A utilização de filtros nos registros sísmicos tem por finalidade enfatizar o substrato de estudo realçando suas características, retirando quaisquer faixas de frequências indesejáveis decorrentes de outros fenômenos ondulatórios (múltiplas), ou sinais adicionais que são registrados de forma aleatória, os ruídos.

Dentre os principais processos de filtragem e ganhos se destaca:

Os filtros no domínio da frequência:

-O *Spectral Whitening*: Pode ser entendido como uma aproximação da deconvolução de fase-zero, não modificando a fase do sinal, mas o espectro de amplitude (nivela o espectro de uma determinada faixa de frequências), (Claerbout, 1975, Yilmaz, 1987).

- O *Filtro passa-banda*: É usualmente empregado para remover ou atenuar ruídos de baixa frequência, como o *ground roll*, ou algum ruído de alta frequência do ambiente. Este filtro é definido por quatro componentes de frequência: frequência baixa de corte; frequência baixa de passagem; frequência alta de passagem; e frequência alta de corte.

- O *Average xy-filte*: Esse método funciona como um filtro passa-baixa no domínio do tempo (y) e do espaço (x), ele atenua grande parte dos sinais de altas frequências em detrimento das de menor, enfatizando-as no registro sísmico.

Os filtros no domínio da amplitude (decaimento da energia):

-O *Automatic Gain Control - AGC*: A função desse ganho é equivalente à razão entre uma amplitude de referência e a média das amplitudes dentro de uma janela temporal escolhida

(Eq. 6.1; YILMAZ, 2001). Após o filtro, todos os pontos são multiplicados por um fator de escalonamento, enfatizando faixas de baixa amplitude contra faixas de altas amplitudes.

- *Gain Function*: Esse filtro funciona como um compensador de perdas da amplitude do sinal por amortecimento ou espalhamento geométrico, atua na atenuação ou ênfase de determinadas faixas de amplitude em diferentes faixas de tempo (ms).

- *Manual gain (y)*: Responsável por enfatizar faixas na direção (y) onde as estruturas são mais evidentes. Essa opção permite definir uma curva de ganho, de forma interativa, digitalizada na direção y (tempo).

Outro recurso utilizado para o filtro das seções sísmicas é a deconvolução Preditiva que pode ser entendida com uma resposta sísmica (traço sísmico) descrita pela convolução da assinatura da fonte (*wavelet*), com o coeficiente de reflexão, incluindo os ruídos. A deconvolução é uma correção determinística (filtro inverso) (GADALLAH, 1994). Essa etapa é normalmente empregada no processamento de dados sísmicos com o objetivo de comprimir o pulso sísmico ou predizer e “suprimir” reflexões múltiplas.

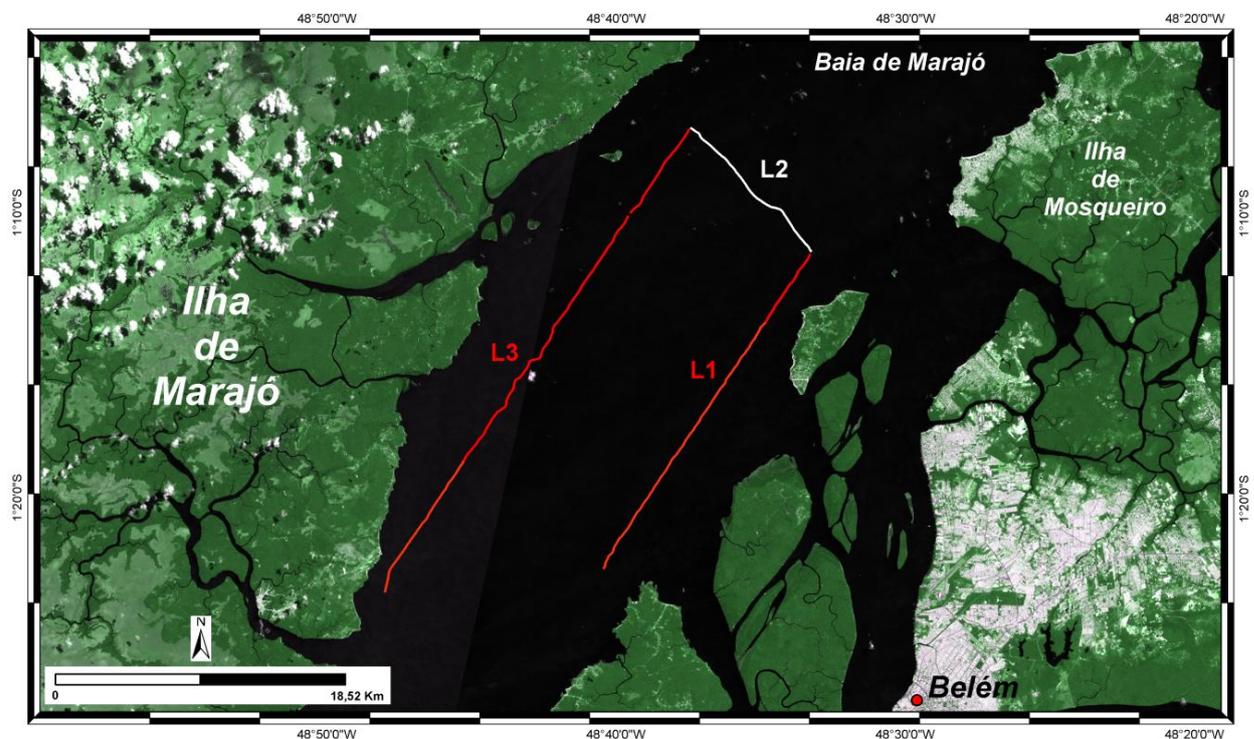
O primeiro objetivo é alcançado utilizando-se o operador de erro de predição unitária que corresponde ao filtro inverso de *Wiener-Levinson*. Para a predição e atenuação de reflexões múltiplas utiliza-se o filtro preditivo com a distância de predição pouco menor que o período da múltipla que se deseja suprimir (ROBINSON, 1984; ROBINSON; TREITEL, 1980; YILMAZ, 1990). O filtro preditivo de *Wiener-Levinson* estima eventos periódicos, como múltiplas no sismograma, permitindo assim que a componente estimada seja removida.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS DADOS SÍSMICOS

### 5.1 Baía de Marajó

A Baía de Marajó (Fig. 24) é um típico estuário no contexto do sistema estuarino amazônico com uma hidrodinâmica alta com variações diárias nos níveis de maré, responsável pela descarga de todo material sedimentar continental da região, e, local de intenso balanço do transporte sedimentar continente-oceano.

Figura 23: Imagem de satélite *Landsat 8* da baía de Marajó com a localização das linhas sísmicas.



A Baía de Marajó possui morfologia caracterizada por bancos, coroas e canais, uma granulometria variada (areia média à fina, silte e argila) dependente de seu regime hidrodinâmico (CORRÊA, 2005; SOUZA, 2006).

De modo a facilitar a visualização e entendimento do trabalho algumas denominações foram feitas como forma de padronizar os dados nesse trabalho. Os perfis sísmicos foram agrupados em partes maiores – as linhas sísmicas (Tab. 2), por exemplo, linha L1 é composta pelos perfis sísmicos *L1\_A1* e *L1\_A1.001*.

Tabela 2: Caracterização detalhada dos parâmetros e descrição visual dos perfis sísmicos da Baía de Marajó.

<b>Perfis Sísmicos</b>				
<b>Perfil</b>	<b>Seções Sísmicas</b>	<b>Banda de Pulso</b>	<b>Coefficiente Reflexão RC</b>	<b>Descrição</b>
<b>L1</b>	<b>L1_A1 L1_A1.001</b>	<b>0,5-4,5 kHz 50ms</b>	<b>-46,0</b>	Linha sísmica localizada na margem direita da baía de Marajó, forte atenuação do sinal sísmico na superfície e presença de margens com material rochoso.
		<b>0,4-4 kHz 40ms</b>	<b>-35,5</b>	
		<b>0,5-6 kHz 9ms</b>	<b>-48,1</b>	
<b>L2</b>	<b>L2_Diagonal</b>	<b>0,5-4,5 kHz 50ms</b>	<b>-46,3</b>	Linha sísmica transversal a baía de Marajó com presença de dunas de areia e forte atenuação do sinal.
		<b>0,5-6 kHz 9ms</b>	<b>-48,1</b>	
<b>L3</b>	<b>L3_A1 L3_A1_cont L3_A1_cont.001</b>	<b>0,5-6,0 kHz 9ms</b>	<b>-48,1</b>	Linha sísmica próxima a margem esquerda da baía de Marajó com forte atenuação do sinal sísmico na superfície, sem muitas mudanças na morfologia superficial.
		<b>0,5-4,5 kHz 50ms</b>	<b>-46,3</b>	
		<b>1-6 kHz 40ms</b>	<b>-50,1</b>	

A linha sísmica **L1** localizada nas proximidades da ilha de Cotijuba e desembocaduras dos canais do Carnapijó e Cotijuba, na margem direita da baía de Marajó (Fig. 24), apresenta uma forte atenuação do sinal sísmico e pouca penetração com exceção às proximidades da desembocadura do canal do Carnapijó, que apresentou refletores sísmicos bem evidentes e morfologias mais expressivas, resultado de uma margem com presença de materiais rochosos denominado na carta náutica como “pedras de Carnapijó”, havendo um depósito de materiais mais finos no seu entorno.

No decorrer da análise da linha **L1** constatou-se que um dos perfis sísmicos apresentou um erro durante o salvamento do registro (erro na saída do formato), suspeita-se que tenha decorrido por falta de atenção operacional e má configuração.

A linha sísmica **L2** localiza-se transversalmente da Baía de Marajó. Apresenta uma forte atenuação do sinal sísmico e pouca penetração, com presença de bancos de areia ao longo de seu trajeto.

A linha sísmica **L3** localiza-se às proximidades da desembocadura do rio Arari e Marajó-Açu, na região sudeste da ilha de Marajó. Apresenta refletores sísmicos bem evidentes e morfologias mais expressivas devido à hidrodinâmica de descarga e o aporte de sedimento dos rios. No registro sísmico, a resposta dessas modificações em ambientes com hidrodinâmica diferente é notada a partir da visualização de um subfundo com fortes

atenuações de sinal e pouca penetração ou um subfundo com uma melhor penetração e resolução de sequências de refletores.

A partir da delimitação do trajeto sísmico da linha podem-se inferir os limites de coordenadas do início ao final de toda seção sísmica, isso auxilia na percepção das distâncias de estruturas e morfologia de fundo.

A realização da sísmica rasa de alta resolução em ambientes fluviais apresenta dados através da visualização de trechos de pouco mais de algumas centenas de metros de extensão, diferenciando-se da visualização convencional (na geofísica de prospecção ou até mesmo em estudos geofísicos na plataforma continental) em escalas de visualização superiores a alguns quilômetros de distância. Na sísmica rasa são delimitados trechos de maior interesse para que se possam realizar os principais processos de realce e retirada de ruídos.

De forma a não tornar o trabalho repetitivo em relação aos procedimentos tomados em cada etapa do processamento e utilização dos filtros, a realização do processamento dos dados provenientes da região da baía de Marajó será demonstrada em detalhes, e as variadas ferramentas serão aplicadas para o processamento dos demais perfis sísmicos.

Em trechos da seção sísmica *L3\_AI\_cont.001* (Fig. 23) é possível verificar o domínio de frequências em duas faixas principais, entre 1-2 kHz e entre 3-4 kHz. Consequentemente, estes valores de frequência que estão no dado irão compor os maiores valores de amplitudes verificados no dado, indicando partes com maiores contrastes (Fig. 23).

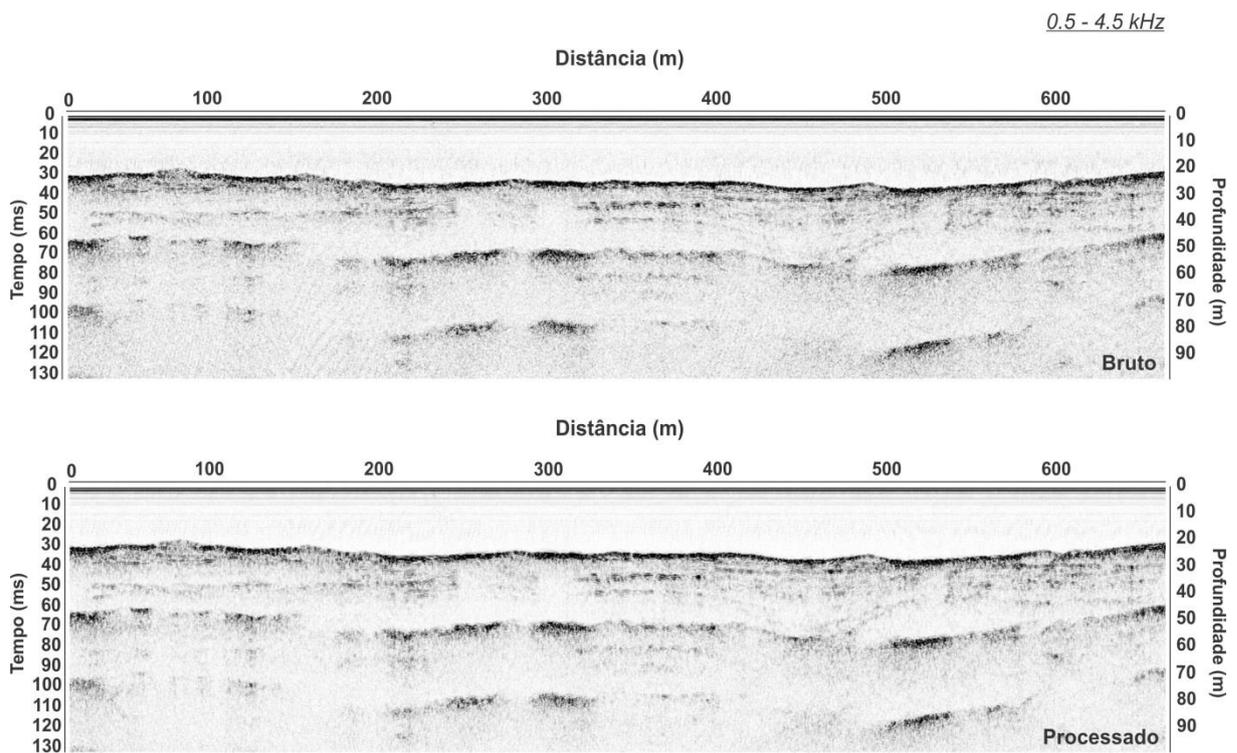
No trecho do perfil sísmico *L3\_AI\_cont.001* é possível visualizar faixas de frequências pertencentes à seção ocasionada por sinais aleatórios que adentram o registro resultando em ruídos de sinal. Uma das principais causas de ruídos diz respeito às altas frequências relacionadas a ruídos diversos.

A partir da análise desses processos iniciais, foi feito uso dos filtros de processamento disponibilizados pelo programa *ReflexW*, de forma a obter uma melhor visualização dos dados. Inicialmente, é comumente utilizado o filtro de frequência passa-banda (*Bandpassfrequency*), o qual remove frequências indesejadas e reduz ruídos de diversas origens (Fig. 26).

Em águas rasas, a proximidade com o fundo favorece o aparecimento de ruídos aleatórios somados aos sinais de interesse (resposta da incidência do sinal gerado com o substrato),

esses ruídos são comuns nas aquisições de dados geofísicos e muitas vezes difíceis de serem removidos da seção sísmica, aparecem no registro compondo o espectro de frequências, como também são geradas por outros equipamentos ocasionando pequenas interferências eletromagnéticas.

Figura 24: Comparação de uma seção não filtrada com outra utilizando-se o filtro de frequências passa-banda (*bandpass frequency*).



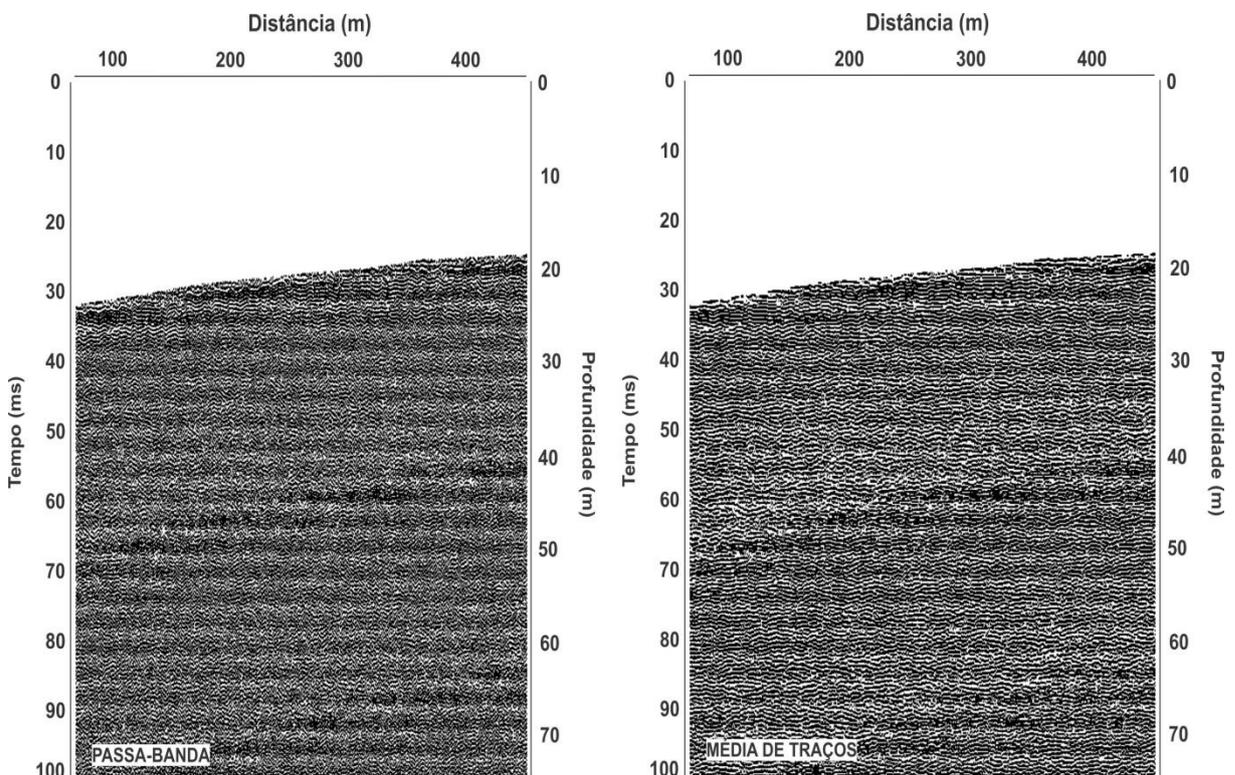
Na seção sísmica, nota-se algumas interferências na seção por frequências aleatórias e que foram retiradas a partir da etapa de análise do espectro (*Bandpassfrequency*). Esse filtro mostrou uma seção mais nítida e amenização dos padrões caóticos dos ruídos entre os refletores sísmicos.

A aplicação desses passos antes do processamento fornece uma melhor visualização do dado que se deseja tratar, uma vez que, o ambiente de aquisição é diferenciado dos demais trabalhos comumente apresentados no meio científico, pois ele é realizado em pequenas profundidades, o que acaba gerando a adição de outros sinais dentro do registro, como reflexões do fundo.

Em algumas seções sísmicas, uma boa visualização dos refletores é determinada principalmente por uma boa aquisição, planejamento prévio e o conhecimento do ambiente de estudo.

Um bom exemplo são os depósitos de materiais mais finos, que na maioria dos casos apresenta menor resistência na penetração do sinal (consequentemente uma boa penetração com faixas mais altas de frequência), pois necessitam de uma menor energia para poder penetrar no substrato. No entanto, Gomes (2009) exalta que o efeito de frequências muito altas acaba ocasionado o serrilhamento dos refletores, que são corrigidas com um filtro de médias de traços (*Average xy-filte*), resultando na suavização desse efeito.

Figura 25: Comparação ente uma seção filtrada (*Bandpass Frequency*) e outra com o filtro *Running Average* (com média entre quatro traços).



A próxima etapa de confecção da seção é a aplicação de filtros de ganho, pois em decorrência da remoção de frequências através de filtros anteriores, a energia do pulso sofre uma ligeira diminuição, ou até mesmo, para dar ênfase nos refletores mais ofuscados,

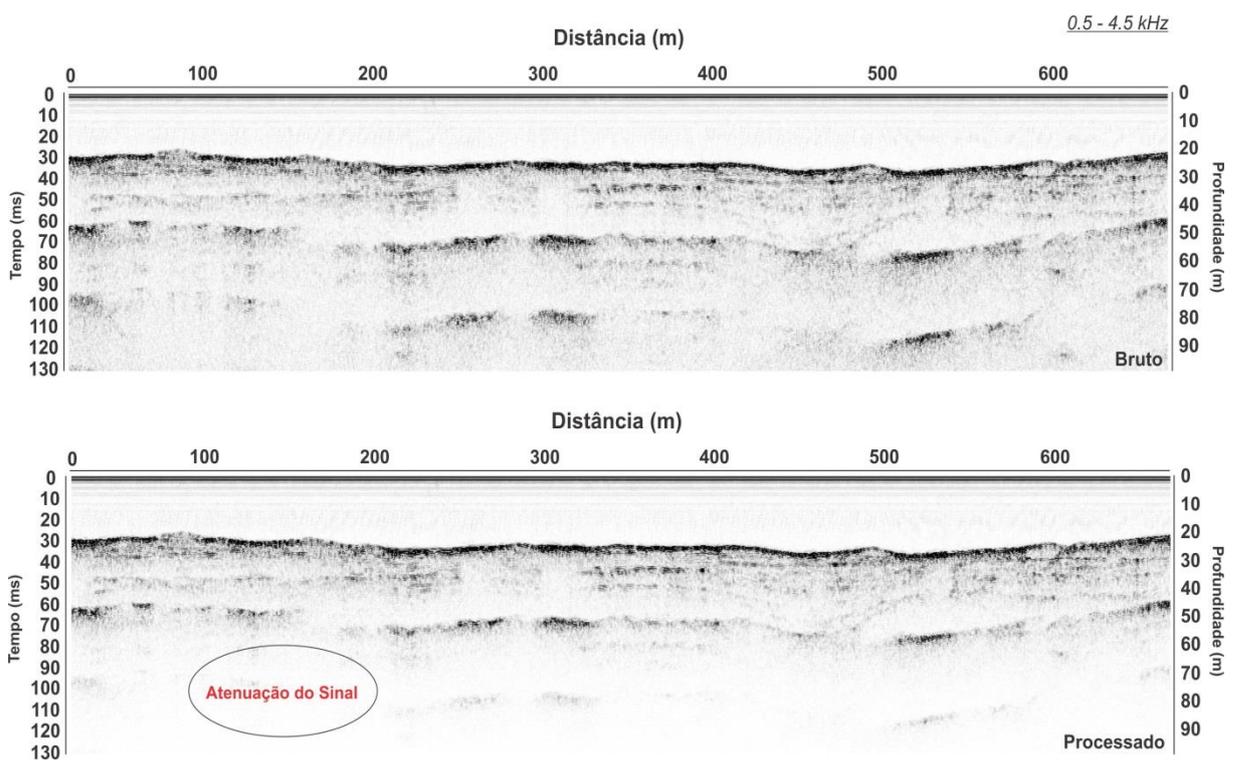
ocasionados principalmente pela atenuação da energia da onda com os estratos sedimentares, sofrendo ligeira diminuição na amplitude do sinal.

Um ponto importante é que apesar de ocorrer à perda de energia, a largura de banda é preservada nesse processo e não se modificam as estruturas adquiridas.

A aplicação do filtro de ganho (*Gain Function*) funciona como um multiplicador de amplitudes em determinadas áreas da seção (em diferentes tempos) de acordo com o objetivo, ele proporciona um incremento nos valores em decibéis.

O filtro buscou suavizar os refletores e atenuar as amplitudes das múltiplas, no entanto os sinais abaixo da primeira múltipla receberam uma forte atenuação, sem identificação de estruturas (Fig. 28).

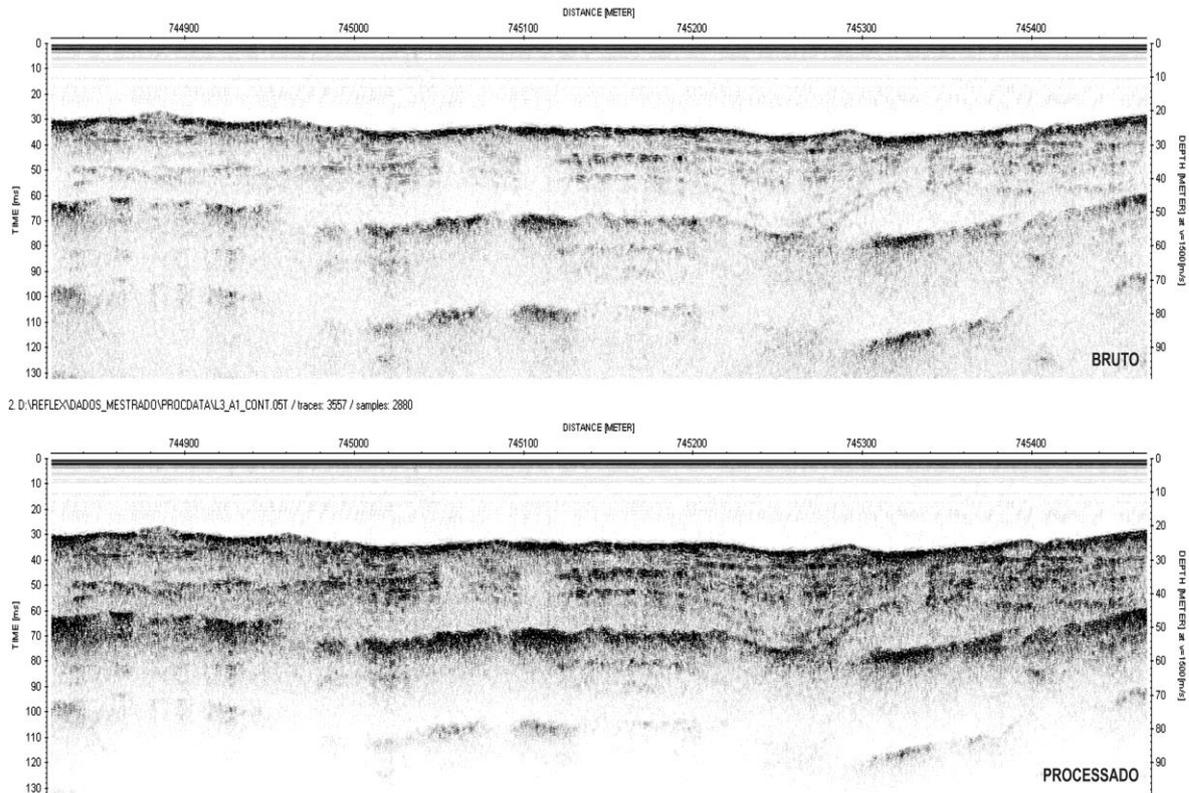
Figura 26: Aplicação do filtro de função de ganho (*gain function*).



Além do filtro de função de ganho (*Gain Function*), foi utilizado outro filtro de amplificação de amplitudes, o filtro de ganho manual (*manual gain*), que se mostrou mais eficiente na ênfase dos refletores e atenuação da seção abaixo da múltipla. O filtro possibilita a escolha dos valores de ganho em relação ao tempo (*ms*), tanto valores negativos

quanto negativos, resultando em ganhos diferenciados em relação a profundidade ( $m$ ) da seção.

Figura 27: Aplicação do filtro de ganho manual (*manual gain*).



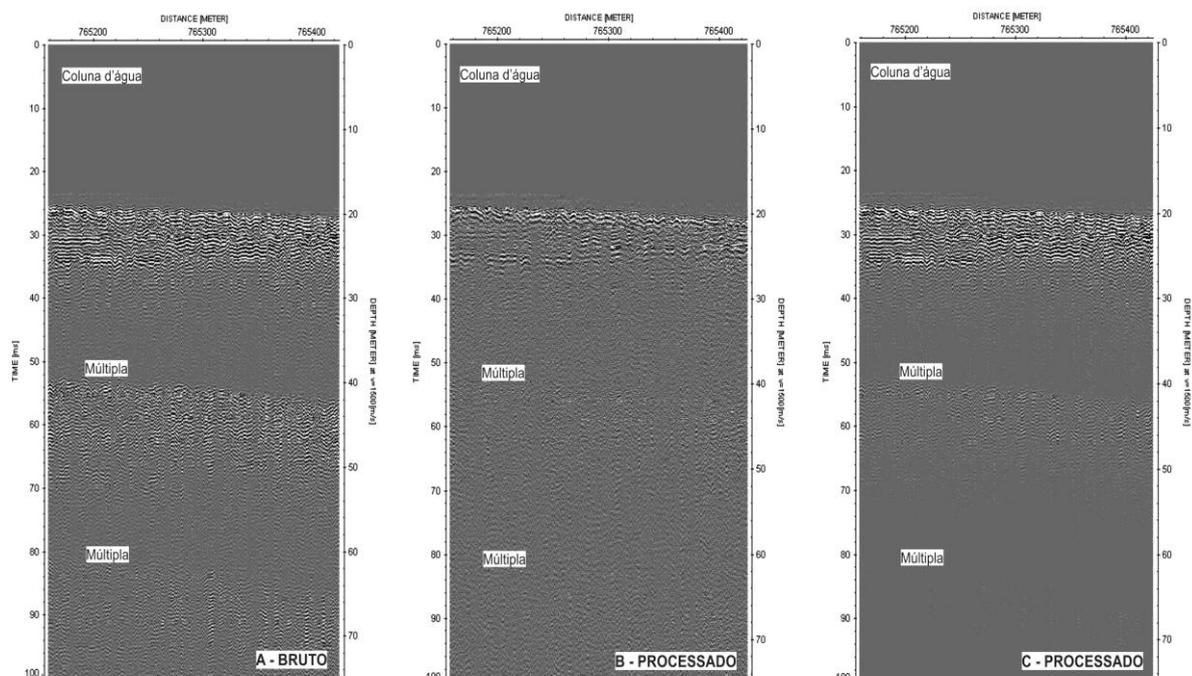
Todas essas etapas constituem passos importantes para um bom processamento, porém um dos principais problemas decorrentes da aquisição nos registros sísmicos, diz respeito às múltiplas que muitas vezes apagam parcialmente o sinal sísmico desejado sendo muito difícil eliminá-las nos tratamentos convencionais por apresentam múltiplas de forte amplitude.

O perfil sísmico *L2\_diagonal* (Fig. 30), foi submetido a um processamento por deconvolução preditiva, o valor de início da autocorrelação corresponde ao instante anterior ao tempo da primeira reflexão de fundo chegando ao valor próximo ao tempo de término do registro. A seção apresenta um tempo de registro de 100 ms, o tempo decorrente do contato com o fundo ocorre aos 25 ms e os valores do comprimento do operador do filtro encontra-se entre 50 ms e 60 ms (intervalo da múltipla), e o percentual de ruído branco ficou em torno de 5%.

Para uma melhor análise foi realizada uma comparação entre os resultados apresentados pelos filtros (função de ganho e deconvolução preditiva) onde pode-se verificar que a deconvolução a partir de cálculos determinísticos consegue atenuar as múltiplas e suavizar a visualização de faixas de frequências pertencentes à seção sísmica, enquanto que as funções de ganho retiram faixas de frequências predefinidas a partir do déficit da energia (ganhos negativos em decibéis).

No entanto, para a sísmica rasa torna-se difícil a retirada satisfatória desses efeitos sem prejudicar a visualização dos estratos abaixo das múltiplas, uma vez que, o tipo de aquisição monocanal difere dos realizados pela sísmica convencional (aquisição multicanal). A característica intrínseca do sistema de aquisição geofísica monocanal é o fato de haver um único tiro de pulso resultando em apenas um traço no registro sísmico. Por essa razão qualquer efeito de filtragem elimina grande parte das informações juntamente com as reflexões múltiplas.

Figura 28: Atenuação da múltipla de fundo em uma seção bruta (A) através da Deconvolução Preditiva (B) e da Função de Ganho (C).



Uma particularidade da baía de Marajó no que se refere a utilização deste método encontra-se na limitação do equipamento em atingir grandes profundidades de penetração, principalmente nas regiões mais centrais da Baía. Muitos são os fatores que somados dificultam essa investigação como: expressivas diferenças nas amplitudes do sinal; zonas de diferentes morfologias alternando altas ou baixas frequências; além do efeito indesejado da múltipla que acaba encobrindo as demais camadas do substrato.

No total foram realizados 70 km de linhas sísmicas nessa área, dentre elas cerca de 60 km das seções mostraram uma baixa penetração do substrato, resultado da atenuação do sinal na superfície. Nos outros 10 km de linhas, apresentou uma boa penetração do sinal nas proximidades de pequenas ilhas (afloramentos rochosos emersos) e cursos fluviais, a explicação seria a sua proximidade com o aporte de sedimentos mais finos (deposição de camadas sedimentares) gerando a visualização de refletores sísmicos provavelmente com predominância lamosa.

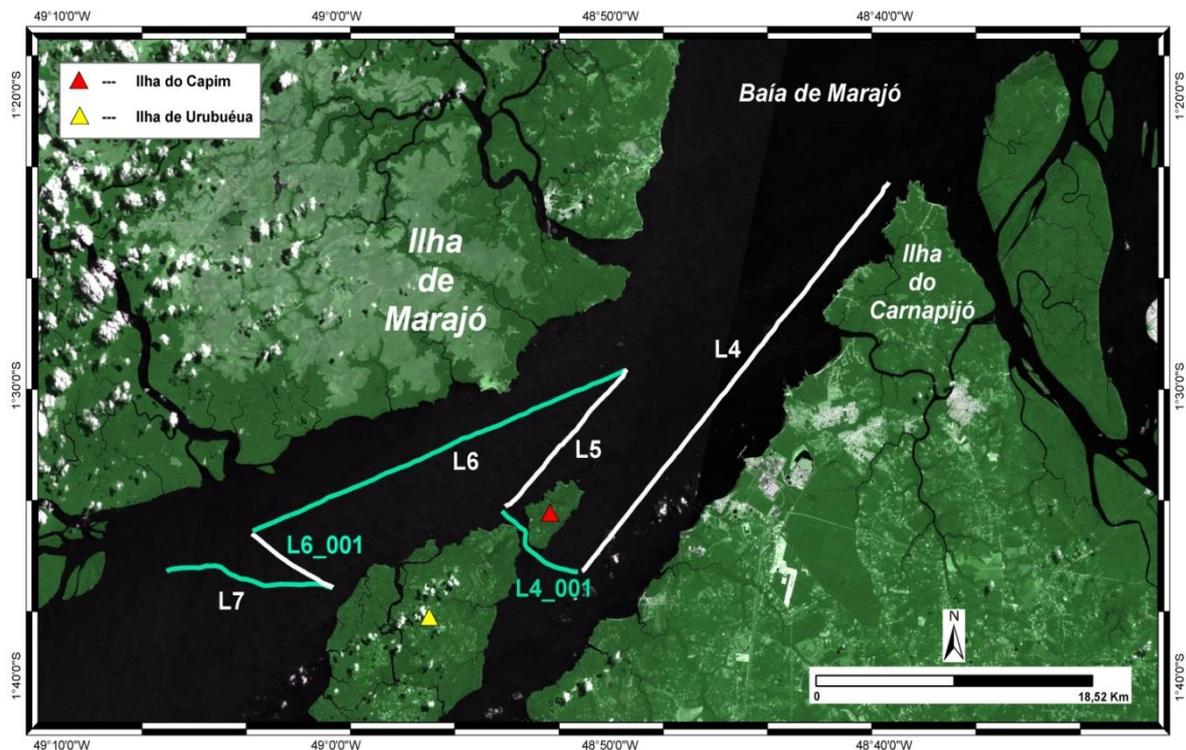
A presença de bancos arenosos e dunas subaquosas caracterizam a superfície de fundo da área, sua dinâmica hidrológica ocasionada pelo efeito de correntes de enchentes e vazantes da marés proporcionam fluxos relativamente altos favorecendo processos de erosão e migração. Os sedimentos nessa região demonstram a presença de areia com uma granulometria grossa favorecendo a compactação do mesmo, resultando em bloqueio das ondas acústicas emitidas pelo Sub-Bottom.

As interpretações do trabalho limitam-se aos grupos de refletores acima da primeira múltipla, o sinal acabou recebendo um processo intenso de atenuação na superfície, gerando a visualização de poucos refletores. As múltiplas de fortes amplitudes suprimiram os sinais mais abaixo das seções acarretando na perda de dados, apesar do esforço no processamento em atenuar esse efeito indesejado.

## 5.2 Rio Pará

O rio Pará é uma região de forte fluxo hidrodinâmico e intenso transporte de sedimentos, possivelmente devido suas larguras variáveis e receber aporte de água e sedimentos de dois grandes contribuintes de aporte de água: (1) Baía de Marajó e (2) desembocadura do Tocantins. A área apresenta profundidades batimétricas com média de 30 m (Fig. 31).

Figura 29: Imagem de satélite *Landsat 8* da área do Rio Pará com a localização as linhas sísmicas.



No rio Pará foram realizados 6 (seis) perfis sísmicos, os quais apresentaram elevada atenuação do sinal na superfície, resultando em um maior bloqueio do sinal sísmico e menor penetração. De forma geral, o coeficiente de reflexão dos perfis manteve-se elevado, uma possível resposta do caráter coesivo do sedimento (maior consolidação), apresentaram poucos refletores sísmicos no decorrer das linhas, apesar de se recorrer à mudança nos valores de frequência de pulso, resultando na visualização de estruturas de fundo como *megaripples*, canais e bancos de areia (Tab 3).

A análise das frequências de aquisição foi um dos principais focos do processamento nessa área, uma vez que, poucos foram os perfis sísmicos que apresentaram penetração e refletores sísmicos bem evidentes.

Tabela 3: Caracterização detalhada dos parâmetros e descrição visual dos perfis sísmicos da área do rio Pará.

<b>Perfis Sísmicos</b>				
<b>Perfil</b>	<b>Seções Sísmicas</b>	<b>Banda de Pulso</b>	<b>Coefficiente Reflexão RC</b>	<b>Descrição</b>
<b>L4</b>	<b>L4_A2 L4-A2.001</b>	<b>0,5-4,5 kHz 50ms 1-6 kHz 40 ms</b>	<b>-46,4 -50,1</b>	Forte atenuação do sinal, superfície acústica bem refletiva. Localizado na margem direita da do rio Pará.
<b>L4_001</b>	<b>L2_A2_DigCapim</b>	<b>1-6 kHz 40 ms</b>	<b>-50,0</b>	Presença de um vale profundo, dunas de areia e estratificações de camadas ao longo do canal do Capim.
<b>L5</b>	<b>L5_A2</b>	<b>1-6 kHz 40 ms 0,5-6 kHz 9ms 0,5-4,5 kHz 50ms</b>	<b>-50,1 -48,1 -46,4</b>	Forte atenuação do sinal sísmico na superfície, presença de dunas subaquosas.
<b>L6</b>	<b>L6_A2 L6_A2.001</b>	<b>1-6 kHz 40 ms</b>	<b>-50,1</b>	Forte atenuação do sinal na superfície, com baixa penetração do substrato.
<b>L6_001</b>	<b>L6_A2_Trasv_ida</b>	<b>1-6 kHz 40 ms</b>	<b>-50,1</b>	Presença de superfície acústica bem refletiva com baixa penetração do substrato.
<b>L7</b>	<b>L7_A2_new</b>	<b>1-6 kHz 40 ms</b>	<b>-50,1</b>	Baixa penetração do substrato com presença de dunas subaquosas na superfície de fundo.

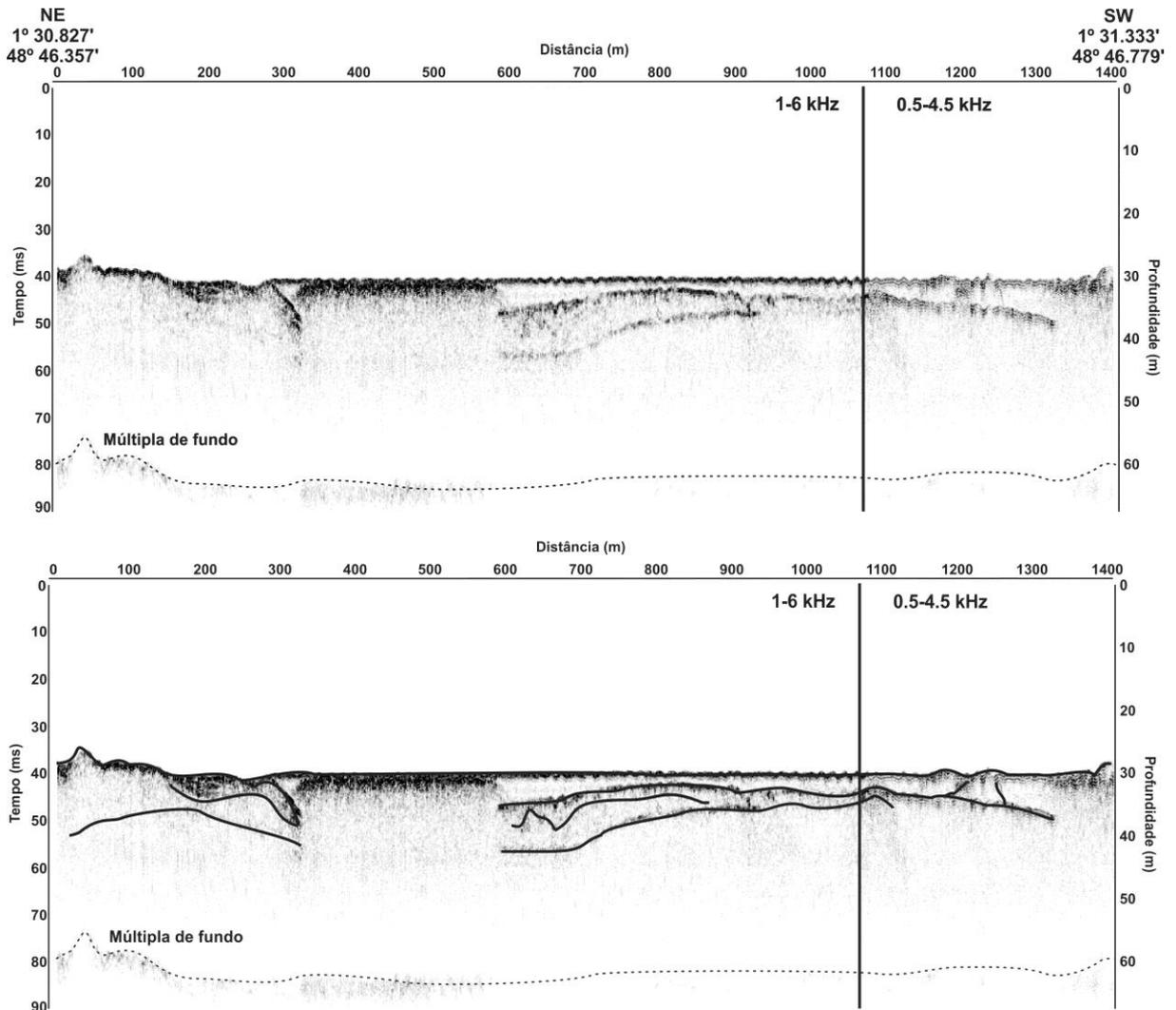
O perfil sísmico *L4\_A2* foi realizado na margem direita do rio Pará, com início à proximidade da ilha do Carnapijó e finalizando-se na Baía do Capim, nas proximidades do complexo industrial da ALBRAS, na região metropolitana de Barcarena.

Na área, a visualização dos afloramentos rochosos ocorre nas margens e em alguns pontos do rio (através da batimetria na carta náutica), indicando uma controle tectônico relacionado à blocos falhados.

Outro ponto diz respeito à litologia (embasamento acústico) observada na maioria das seções sísmicas obtidas que pode ser interpretado como formados por sedimentos mais grossos, consolidados, ocasionados favoravelmente por um regime de fluxo superior. Pode-se observar que os refletores sísmicos sobrepostos indicam sequências deposicionais separadas

por discordâncias erosivas bem marcadas lateralmente, com mais de 5 m espessura de pacote sedimentar.

Figura 30: Trecho da seção sísmica *L4\_A2*, localizada no rio Pará com as unidades identificadas.

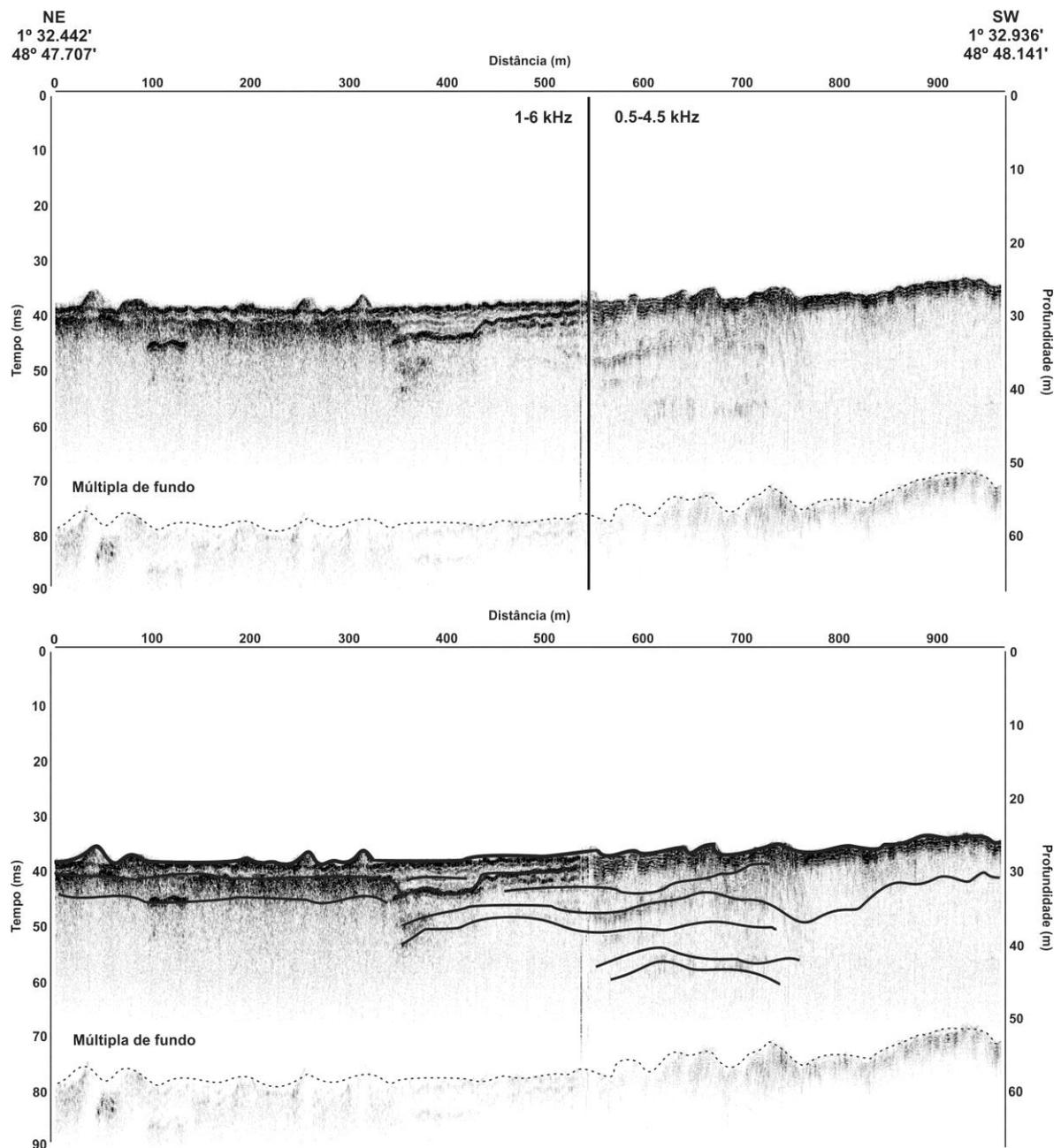


A aquisição dos dados nessa área foi feita utilizando-se frequências diferentes a partir do qual se analisou a interferência das mudanças de penetração e resolução nos resultados. A Figura 32 mostra o resultado de uma mudança de frequência de pulso modificando os parâmetros de sinal/ruído na visualização do registro. A mudança da frequência na seção para uma faixa de pulso menor resultou em uma sensível diminuição na resolução das sismofáceis.

Para possibilitar uma maior penetração do sinal foram estudadas mudanças consecutivas de frequência. Neste caso a tentativa não resultou na observação de mais refletores,

ocasionado possivelmente por um bloqueio acústico (limitação no alcance do sinal) ou mesmo limitado pelo embasamento geológico local. Ao contrário, na Figura 33 se obteve maior penetração e detecção dos refletores que não eram observados na faixa de frequência anterior, porem há perda da resolução dos estratos.

Figura 31: Trecho da seção sísmica *L4\_A2*, localizada no rio Pará com a detecção das unidades identificadas.



Na seção sísmica *L4\_A2\_001* a aquisição foi feita utilizando-se mais de duas faixas de frequências diferentes, onde também se analisou a interferência das mudanças de penetração e resolução nos resultados. A Figura 34 mostra o resultado das mudanças nos parâmetros de resolução e penetração na visualização do registro, a mudança da frequência na seção para maiores faixas de pulso resultou em uma menor penetração das sismofáceis.

A seção sísmica composta por variadas faixas de frequência mostra a íntima relação da escolha do comprimento do pulso emitido pelo Sub-Bottom com a relação penetração/resolução, onde em áreas rasas a muito rasas se tem a expectativa de se encontrar estrato sedimentares de espessura muito pequena, devido à própria natureza dos processos que o formam.

A teoria intuitiva baseada por Badley (1985) mostra que os sinais refletidos nas extremidades de uma camada sedimentar serão identificados desde que a camada tenha espessura maior ou igual à metade do comprimento de onda do sinal emitido, assim sinais acústicos com frequência principal de 50 Hz (utilizados em sísmica profunda) e 1000 Hz (utilizados em sísmica rasa), detectam uma espessura mínima de 50 m e 1 m, respectivamente.

São muitos os fatores que afetam a teoria da resolução dos refletores sísmicos, desde a própria natureza do meio investigado e ao desempenho da fonte acústica. Nesse sentido a relação de penetração versus resolução deve ser cuidadosamente entendida para se realizar uma aquisição próxima à realidade geológica do dado.

Uma interpretação para os refletores aparecerem nas faixas de baixas frequências pode ter relação com a superfície de fundo apresentar sedimentos mais grossos, atenuando o sinal, reduzindo a penetração e detecção dos estratos mais profundos. Caso a composição da superfície de fundo fosse composta de sedimentos lamosos, por exemplo, a utilização de fontes acústicas de baixa energia seria suficiente para de obter a mensuração das espessuras de camadas.

A realização de processamento das faixas de frequências em uma seção deste tipo é dificultada, pois em uma mesma seção foram utilizados varias faixas de frequência, e a realização de uma filtragem torna-se extremamente confusa em meio a todos esses sinais (Fig. 35). Neste espectro de frequências pode-se observar a interferência de sinais, sem o predomínio e detecção de faixas principais de frequências.

Figura 32: Trecho da seção sísmica *L4\_A2\_001*, localizada no rio Pará com diferentes faixas de frequência de pulso, e logo abaixo a detecção das unidades identificadas.

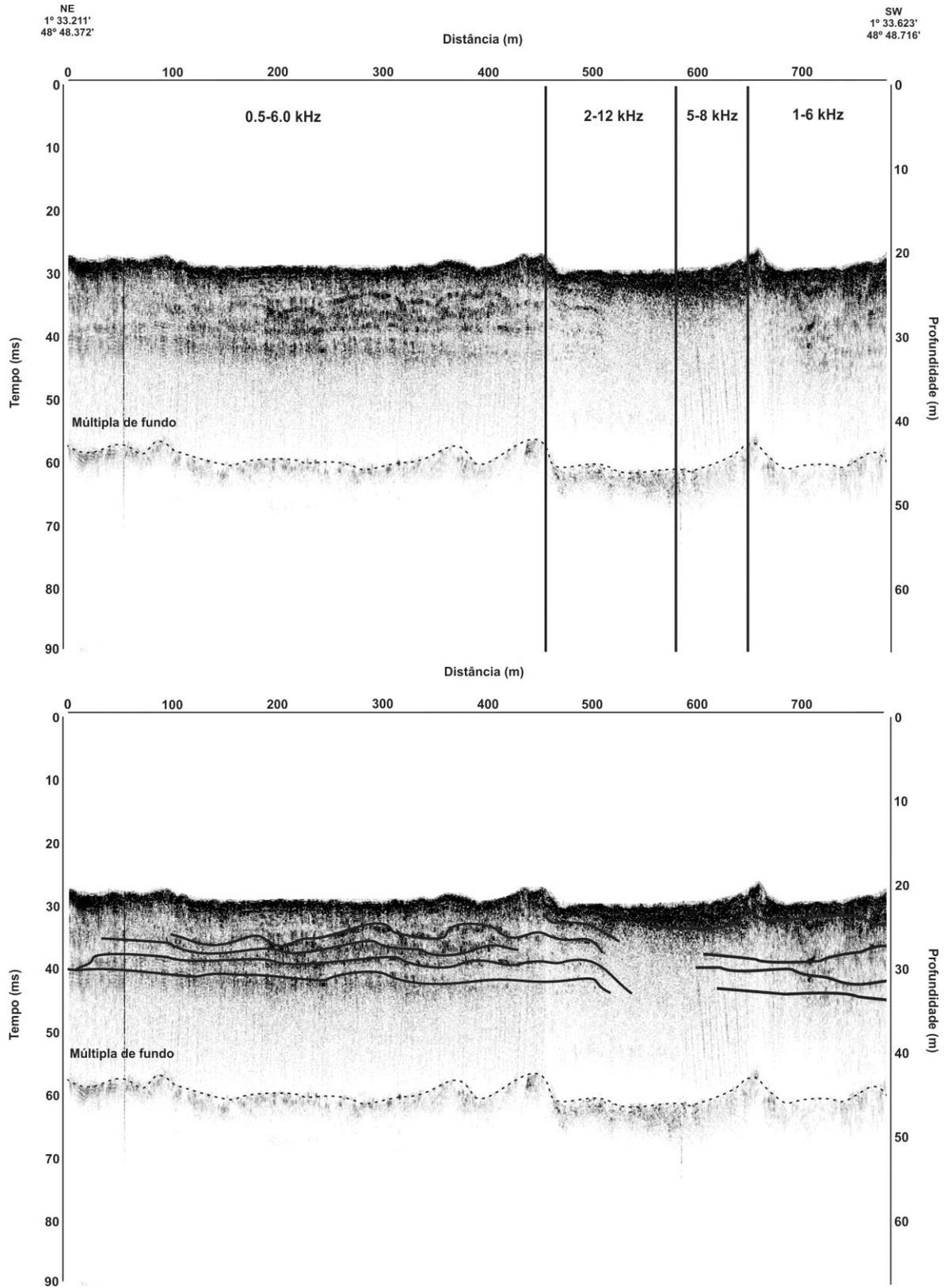
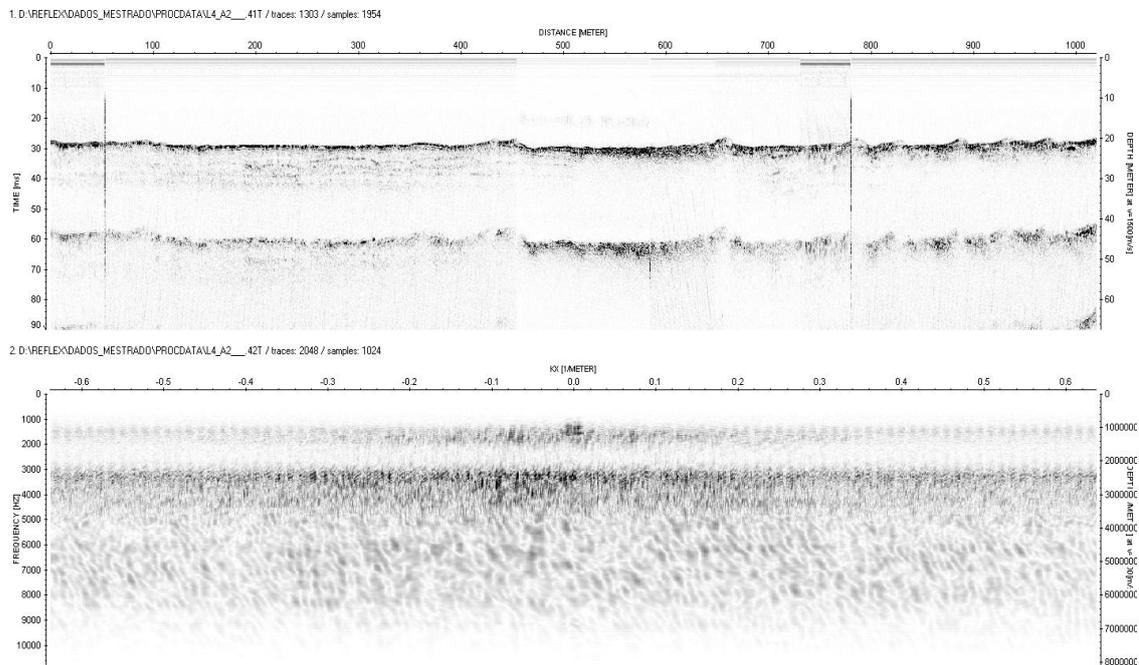


Figura 33: Espectro de distribuição no domínio FK (frequência/ n° de onda) mostrando as faixas de amplitudes nas frequências ente 1 e 8 kHz.



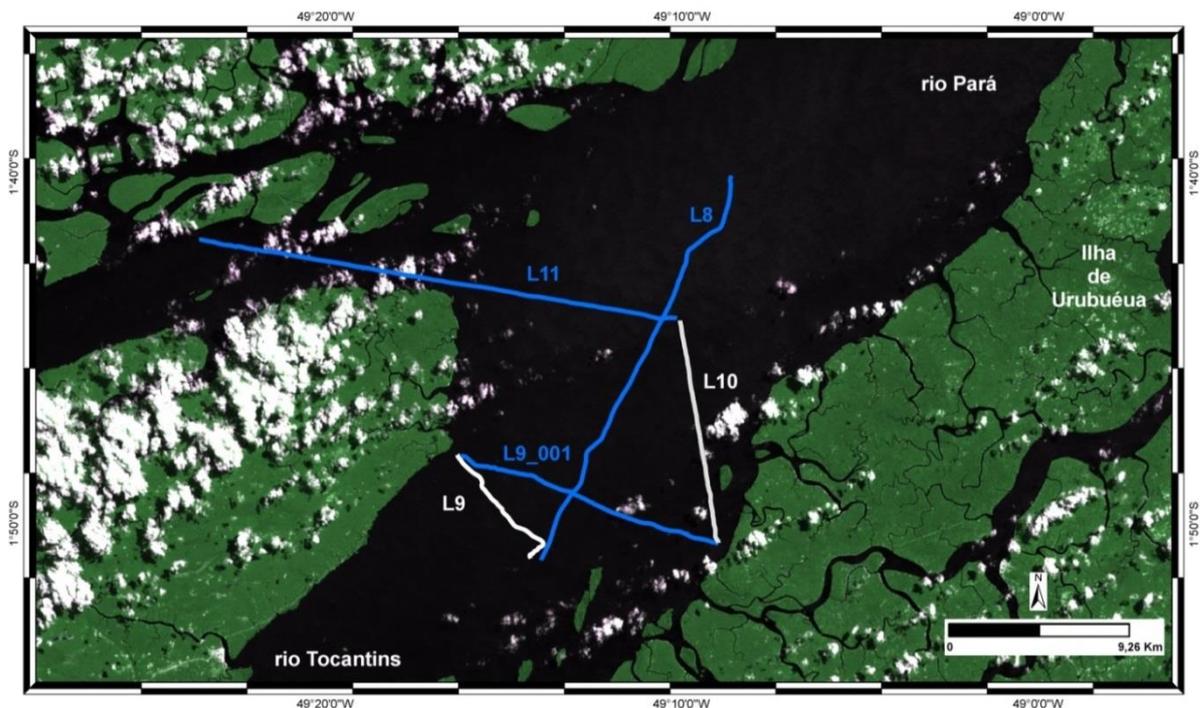
A escolha de uma faixa de frequência preferencial vai depender principalmente do interesse da pesquisa nessas áreas submersas, a partir do conhecimento prévio da área, o levantamento geofísico vai buscar meios para que se possa alcançar o objetivo, seja na visualização da espessura dos estratos sedimentares, presença de estruturas submersas, identificação dos contatos geológicos, evidências de paleocanais ou até mesmo inferir a localização do embasamento acústico.

### 5.3 Desembocadura do Rio Tocantins

A área da desembocadura do Tocantins é relativamente ampla, com intenso processo dinâmico de material sedimentar, ao longo das margens e regiões abrigadas (no entorno de pequenas ilhas) possui longos bancos de areia resultado de um processo de menor fluxo de correntes, os perfis transversais mostraram mais de um canal preferencial de escoamento de água além de dunas subaquáticas no sentido de fluxo de vazante da maré.

O estudo da desembocadura do rio Tocantins ocorreu a partir de 5 (cinco) perfis sísmicos (Fig. 36), com forte atenuação do sinal acústico na superfície de fundo, a penetração do sinal ocorreu a poucos metros na subsuperfície, o coeficiente de refletividade apresentou valores elevados, presença de dunas subaquáticas, canais preferencias de escoamento e bancos imersos de areias.

Figura 34: Imagem de satélite *Landsat 8* da área do rio Tocantins com a localização as linhas sísmicas.



Na desembocadura do rio Tocantins foram realizados 5 (cinco) perfis sísmicos, que apresentaram poucos refletores sísmicos no decorrer das linhas, apesar de se recorrer à mudança nos valores de frequência de pulso. As margens são relativamente rasas atingindo menos de 5 m de profundidade na maré baixa, o rio apresenta mais de um canal preferencial

de escoamento de água devido ao alto fluxo que resulta na formação de estruturas de fundo como megaripples ao longo do canal e bancos de areia bordejando as pequenas ilhas (Tab 4).

Uma das iniciativas dentro desse projeto de reconhecimento era observar as respostas da sísmica utilizando o Sub-Bottom nessas regiões. A ideia principal estaria relacionada aos encontros dos grandes sistemas fluviais relacionados com os padrões de drenagem. No entanto, os registros não obtiveram respostas satisfatórias para esse entendimento.

Tabela 4: Caracterização detalhada dos parâmetros e descrição visual dos perfis sísmicos da área da desembocadura do rio Tocantins.

<b>Perfis Sísmicos</b>				
<b>Perfil</b>	<b>Seções Sísmicas</b>	<b>Banda de Pulso</b>	<b>Coefficiente Reflexão RC</b>	<b>Descrição</b>
<b>L8</b>	<b>L8_A3</b>	<b>1-6 kHz 40ms 0,5-4,5 kHz 50ms 1-6 kHz 40ms</b>	<b>-35,5 -46,7 -50,3</b>	Forte atenuação do sinal sísmico na superfície e presença de estruturas geológicas com refletores sísmicos.
<b>L9</b>	<b>L9_Diag_A3.001</b>	<b>1-6 kHz 40ms</b>	<b>-50,1</b>	Transversal ao rio Tocantins, ambiente raso com forte atenuação do sinal, bancos de areia e refletores sísmicos.
<b>L9_001</b>	<b>Pta do Tatuoca</b>	<b>1-6 kHz 40ms</b>	<b>-50,1</b>	Transversal ao rio Tocantins, ambiente raso com forte atenuação do sinal, presença de canais, bancos de areia e refletores sísmicos.
<b>L10</b>	<b>L10_A3</b>	<b>2-12 kHz 20ms 1-6 kHz 40ms</b>	<b>-54,2 -50,2</b>	Forte atenuação do sinal sísmico na superfície, sem muitas mudanças na morfologia.
<b>L11</b>	<b>L11_A3</b>	<b>1-6 kHz 40ms 0,5-7,2 kHz 30ms</b>	<b>-50,2 -48,3</b>	Atenuação do sinal sísmico, presença de canais, dunas subaquosas e refletores sísmicos rasos.

O perfil sísmico *L8\_A3* foi realizado longitudinalmente, no sentido a montante, do rio Tocantins, O início da seção revelou uma zona com profundidade acentuada resultante da interferência da descarga oriunda da Baía das Bocas (Estreitos de Breves). Em toda seção são observadas dunas subaquosas proeminentes (*megaripples*) que mostram sentido predominante de vazante, além de longos bancos de areia intercalados por rochas aflorantes (Fig. 37).

Em um trecho da seção *L8\_A3*, foram visualizadas sequências de refletores subparalelos e realizadas etapas de processamento para a ilustração da eficiência na penetração do sinal e detecção das sismofácies

O perfil sísmico *L10\_A3* inicia na margem direita do rio Tocantins, atravessando longos bancos de areias com pouca visualização de refletores, um canal de escoamento possuindo mais de 20 metros de profundidade e outro maior, com 45 metros de profundidade. No trecho final do perfil, foram feitas algumas etapas de filtragem de frequências e detecção de estratos mais inferiores (Fig. 38).

O perfil sísmico *L9\_1* (Ponta do Tatuoca) foi realizado transversalmente ao rio Tocantins no intuito de se visualizar dados concordantes as demais seções, o caráter de atenuação do sinal de fundo continuou prejudicando a visualização de refletores em subsuperfície, mas revelando a continuidade das morfologias identificadas em outras seções, como a presença de dois canais de escoamento principais, bancos de areia intercalados por afloramentos rochosos e depósitos de materiais grosseiros nas margens do rio (Fig. 39).

No trecho inicial, o perfil sísmico *L9\_1* (ponta do Tatuoca) foram realizadas algumas etapas do processamento, resultando na visualização de poucos refletores próximos a subsuperfície e uma limitada penetração.

Outro fator de importância nas correlações com a morfologia das seções sísmicas no ambiente *ReflexW* diz respeito a visualização dos perfis sísmicos inteiros (de forma integral, não apenas trechos), por motivos de importação do programa, o perfil acaba sendo comprimido lateralmente, gerando uma diferença na disposição das morfologias de fundo, revelando feições inexistente (feições comprimidas lateralmente que acabam adquirindo um formato mais sinuoso).

Figura 35: Em (A): seção sísmica *L8\_A3* executada longitudinalmente a desembocadura do rio Tocantins, com morfologia comprimida pelo modo de visualização no ambiente ReflexW. Em (B): Trecho da seção sísmica processada. Em (C): Identificação dos sismoestratos presente acima da múltipla, que representam discontinuidades deposicionais/erosivas.

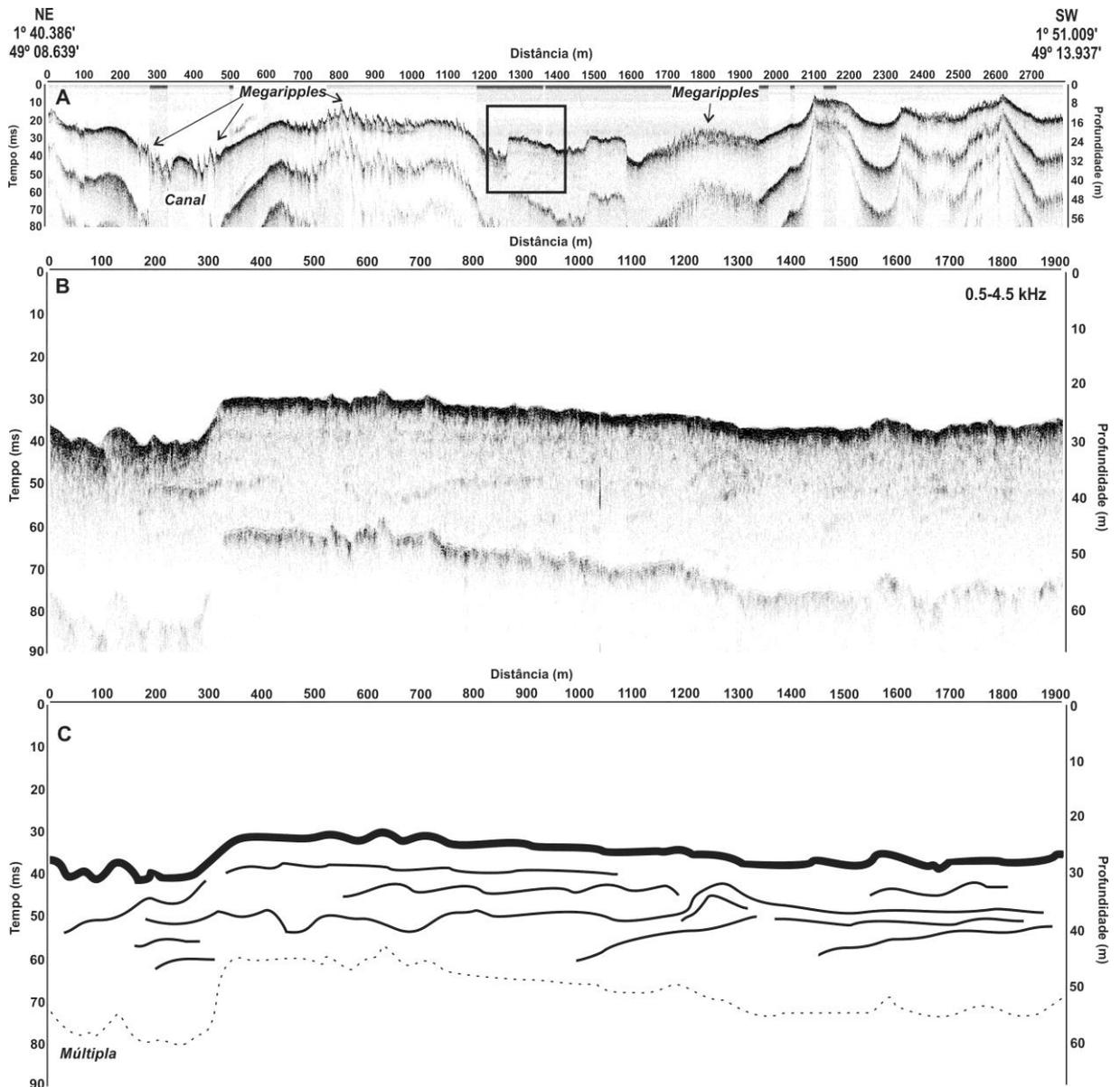


Figura 36: Em (A): seção sísmica *L10\_A3* executada em diagonal na desembocadura do rio Tocantins, com morfologia comprimida pelo modo de visualização no ambiente ReflexW. Em (B): Trecho da seção sísmica processada. Em (C): Identificação dos sismoestratos presente acima da múltipla, que representam áreas de preenchimento de sedimentos.

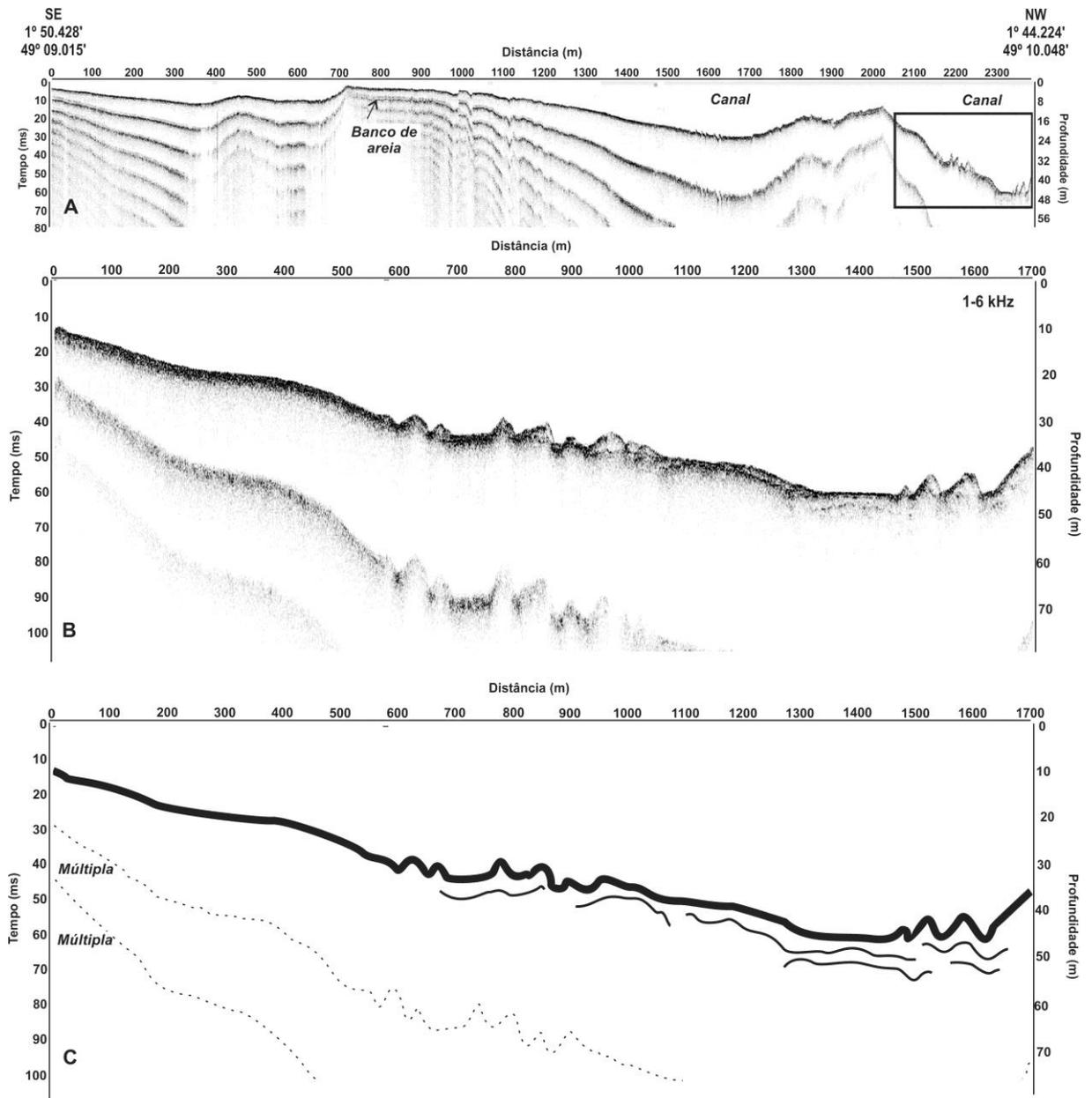
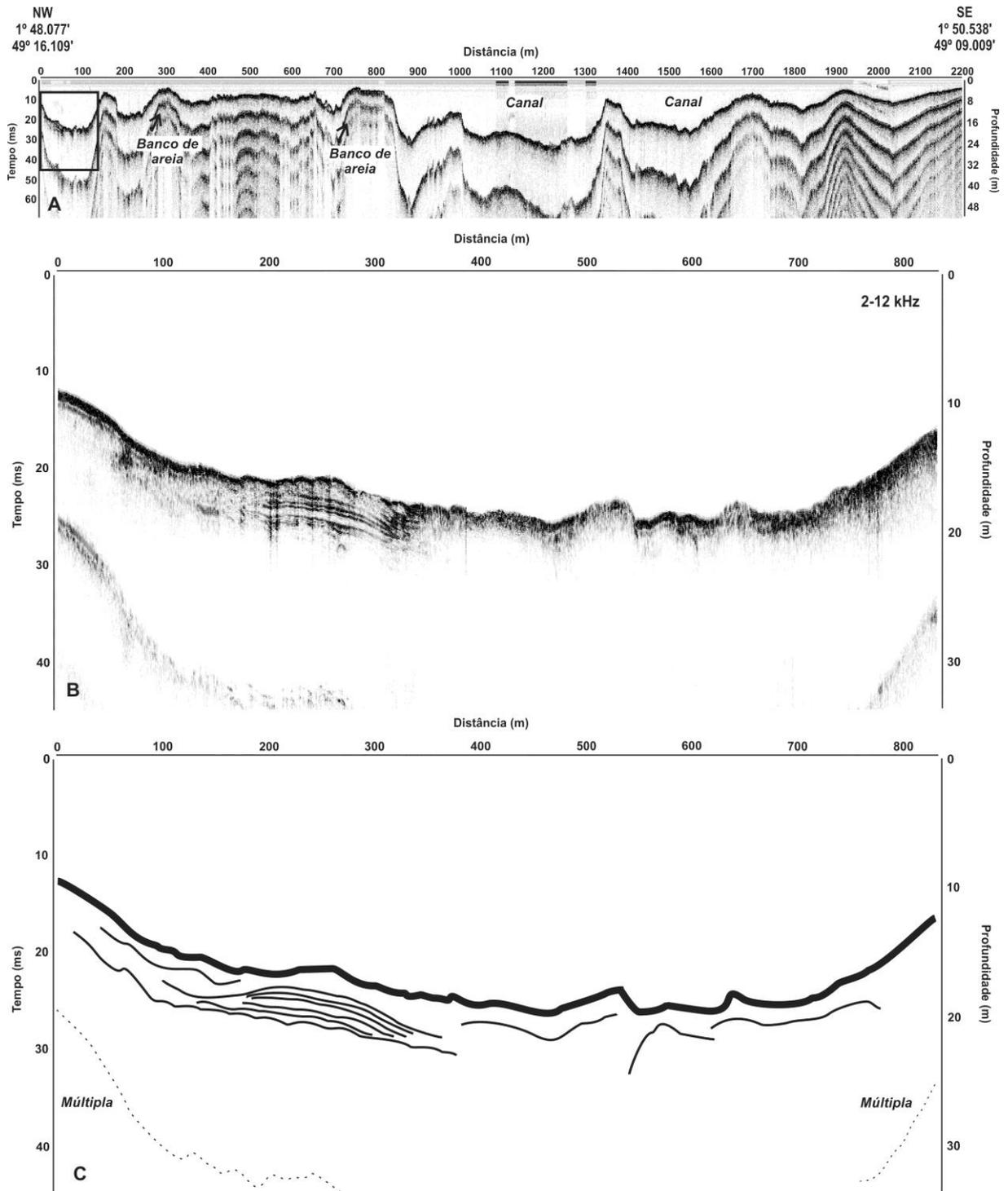


Figura 37: Em (A): seção sísmica *L9.1\_A3* (ponta do Tatuoca), executada transversalmente a desembocadura do rio Tocantins, com morfologia comprimida pelo modo de visualização no ambiente ReflexW. Em (B): Trecho da seção sísmica processada. Em (C): Identificação dos sismoestratos presente logo abaixo da superfície de fundo, que representam regiões com preenchimento de material sedimentar mais lamoso devido o menor fluxo de corrente no local.



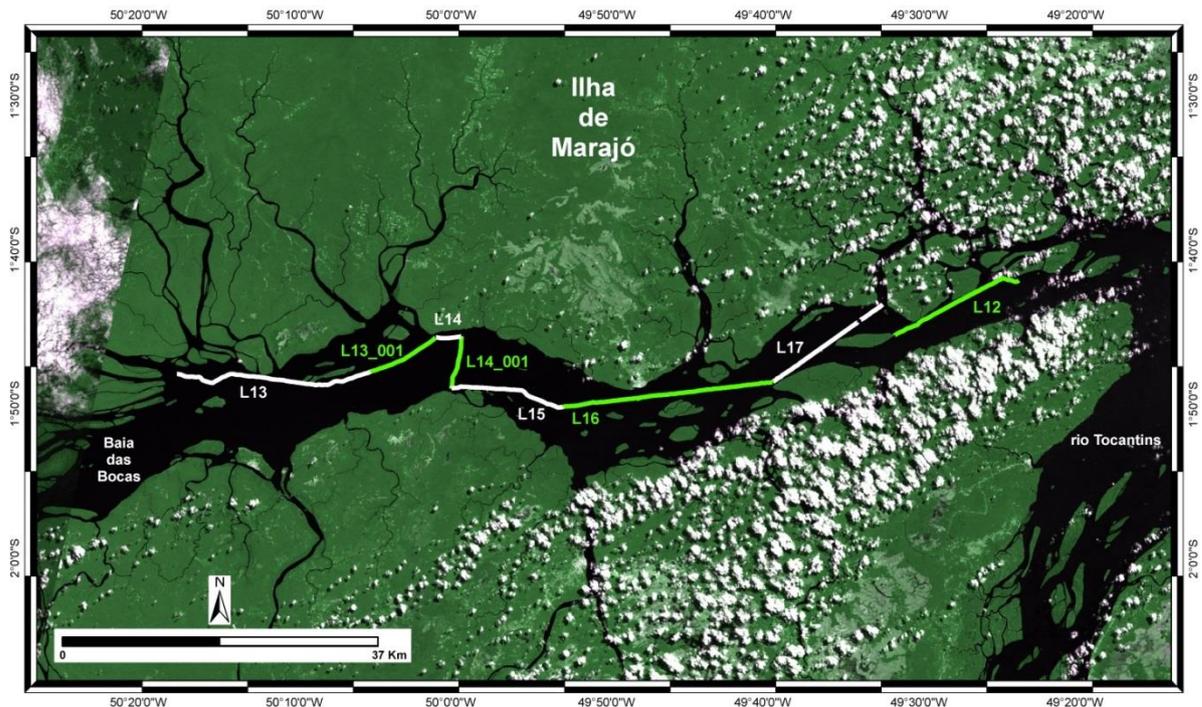
Levantamentos realizados por Raiol (2011) e Batista (2013) (alunos do laboratório de oceanografia geológica e geofísica marinha – LIOG) em parceria com a Marinha do Brasil, indicaram a predominância de material arenoso, bem consolidado e fragmentos de rochas provenientes de afloramento rochoso, sugerindo uma possível explicação na dificuldade na penetração do sinal acústico pelo Sub-Bottom.

Nesse sentido, Souza (2006) demonstra a dificuldade em adquirir registros sísmicos de qualidade em áreas com essas características de materiais mais grossos ou rochosos, e atribui bons resultados a uma série de condições, desde a escolha apropriada do equipamento a ser usado (escolhendo equipamentos com menores faixas de frequências para aquisições mais profundas ou equipamentos com maiores faixas de frequência nas aquisições rasas) e as condições ambientais, sejam elas associadas à geologia da área ou até mesmo ao arranjo do sistema acústico.

## 5.4 Área dos Estreitos

A área da costa Sul aos estreitos é uma região com intensos processos de deposição sedimentar. É caracterizada por um conjunto de ilhas ao longo dos canais principais com bancos extensos próximos as margens, em relação à disposição dos seus tributários possuem um possível padrão de drenagem preferencial governado pelos esforços estruturais anteriores nessa região (ROSSETTI, 2010; ROSSETTI; GÓES, 2007; MANTELLI; ROSSETTI, 2009).

Figura 38: Imagem de satélite *Landsat 8* da área da Costa Sul aos Estreitos com a localização as linhas sísmicas.



Para caracterização da área foram realizados 8 (oito) perfis sísmicos dispostos de forma longitudinal, transversal e diagonalmente a direção do canal (Fig. 40). Nos perfis foram visualizadas diferentes morfologias de fundo, o método acústico revelou uma atenuação do sinal na superfície, apresentando altos valores no coeficiente de refletividade nas diversas faixas de frequências, múltiplas nos perfis sísmicos e conjuntos de refletores aos redores das ilhas e bancos (Tab. 5).

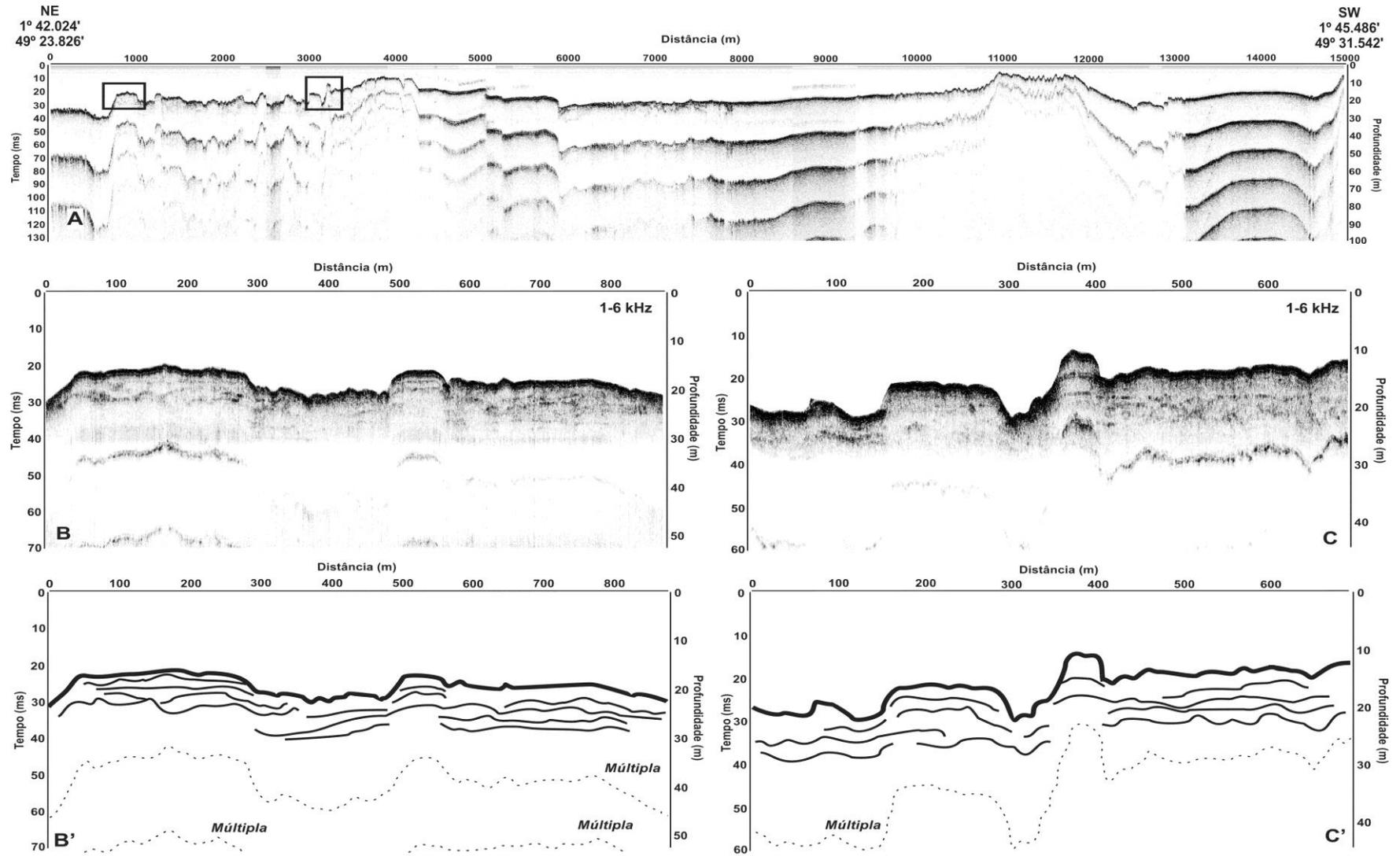
Tabela 5: Caracterização mais detalhada dos parâmetros e descrição visual dos perfis sísmicos da área da Costa Sul aos Estreitos.

<b>Perfis Sísmicos</b>				
<b>Perfil</b>	<b>Seções Sísmicas</b>	<b>Banda de Pulso</b>	<b>Coefficiente Reflexão RC</b>	<b>Descrição</b>
<b>L12</b>	<b>L12_A3</b>	<b>1-6 kHz 40ms</b>	<b>-50,2</b>	Forte atenuação do sinal sísmico na superfície e presença de bancos e depósitos de sedimentos proveniente do entorno das ilhas com refletores sísmicos rasos.
<b>L13</b>	<b>L3_A4 L3_A4.001</b>	<b>1-6 kHz 40ms 7-12 kHz 20ms 2-12 kHz 20ms</b>	<b>-50,1 -53,5 -54,4</b>	Ambiente raso com forte atenuação do sinal, bancos de areia ao longo do canal.
<b>L14</b>	<b>L14_A4</b>	<b>2-12 kHz 20ms 0,7-12 kHz 20ms</b>	<b>-50,4 -52,1</b>	Ambiente raso com forte atenuação do sinal acústico, presença de faixas de camadas estratificadas com refletores sísmicos.
<b>L14_001</b>	<b>Diagonal da Pta do Tapera</b>	<b>0,7-12 kHz 20ms</b>	<b>-52,2 -50,2</b>	Perfil transversal ao canal com presença de canais com atenuação do sinal e presença de refletores nas margens.
<b>L15</b>	<b>L15_A4</b>	<b>0,7-12 kHz 20ms 1-6 kHz 40ms</b>	<b>-52,2 -50,3</b>	Atenuação do sinal sísmico na superfície, presença de dunas subaquosas (megaripples de vazante) e bancos de areia com refletores sísmicos rasos.
<b>L16</b>	<b>L16_A4 L16_A4cont</b>	<b>0,7-12 kHz 20ms 1-6 kHz 40ms</b>	<b>-52,3 -50,2</b>	Presença de dunas subaquosas (megaripples de vazante), atenuação do sinal em substratos rochosos e refletores sísmicos rasos.
<b>L17</b>	<b>L17_A4 L17_A4cont</b>	<b>1-6 kHz 40ms 0,5-7,2 kHz 30ms</b>	<b>-50,4 -48,4</b>	Presença de dunas subaquosas (megaripples de vazante) ao longo de todo perfil e refletores sísmicos rasos.

O perfil sísmico L12\_A3 apresentou-se com baixa profundidade, morfologia de fundo diversificada e refletores sísmicos bem rasos. A hidrologia da área apresentou forte influência da baía das bocas (região de encontro dos estreitos), além de pequenos tributários nas margens, contribuindo com o aporte de sedimentos (Fig. 41,42).

Os refletores de subsuperfície se apresentam paralelos e acompanhando a morfologia de fundo com as limitações laterais em outras feições de fundo, como rochas, barras ou dunas. O fluxo de corrente é o principal agente erosivo na região e a natureza deposicional da área resulta na forma do leito e também nas camadas de subfundo, onde regiões mais rasas acabam gerando finas espessuras de camadas (em torno de 1 a 2m) e, regiões onde a profundidade é maior, a dinâmica erosional favorece o transporte do material através da migração dos sedimentos.

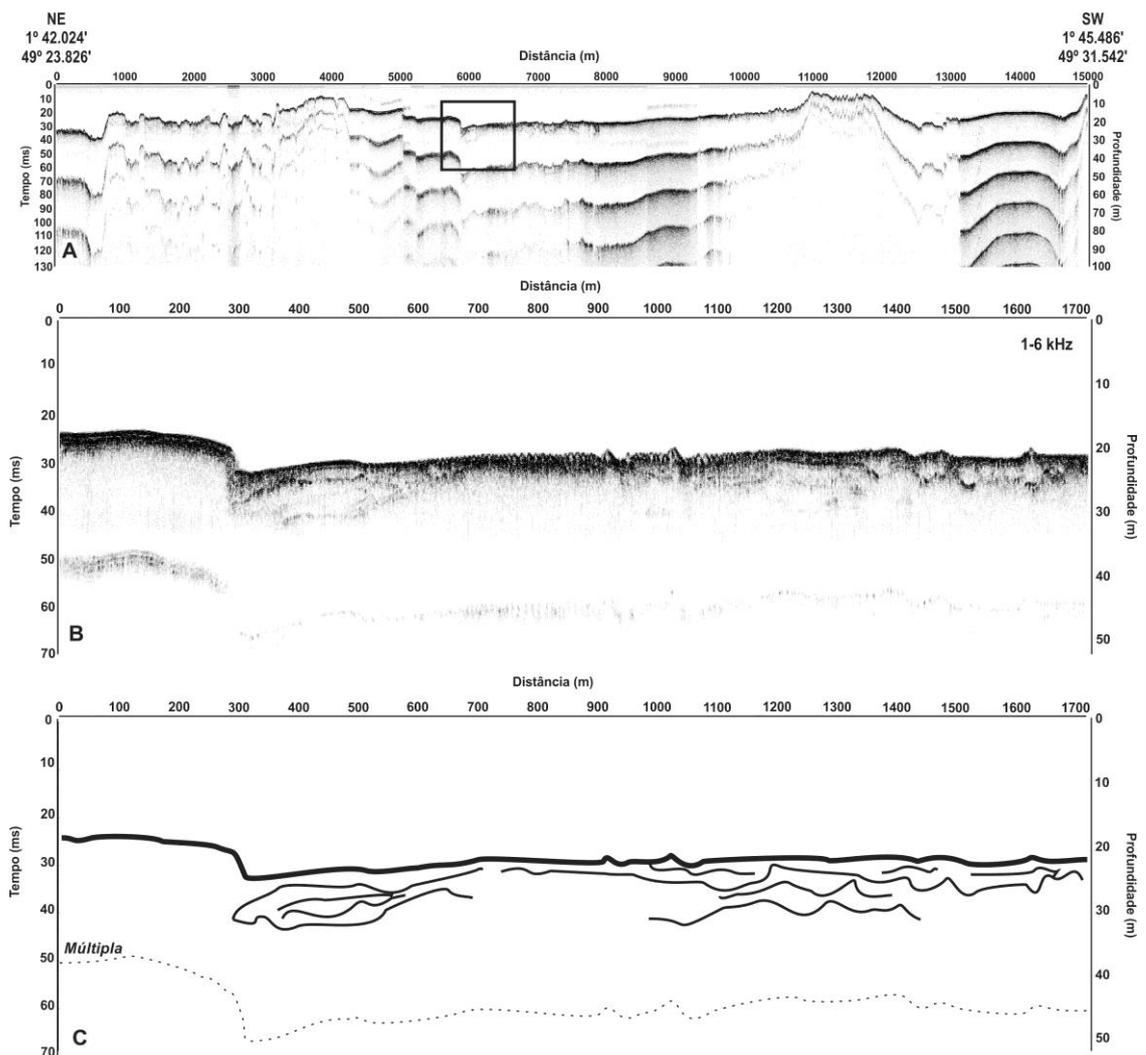
Figura 39: Seção sísmica *L12\_A3* executada longitudinalmente ao canal fluvial. Dois trechos (B) e (C) processados com a identificação dos sismoestratos subparalelos representando camadas de deposição de material lamoso (B') e (C')



As diferenças nas estruturas do fundo do canal, assim como o fluxo hidrológico na área, acabam favorecendo zonas de erosão ou de deposição de material sedimentar, estes seriam os fatores geológicos na região onde estratos sedimentares se formam acompanhando o atual regime de fluxo no canal fluvial.

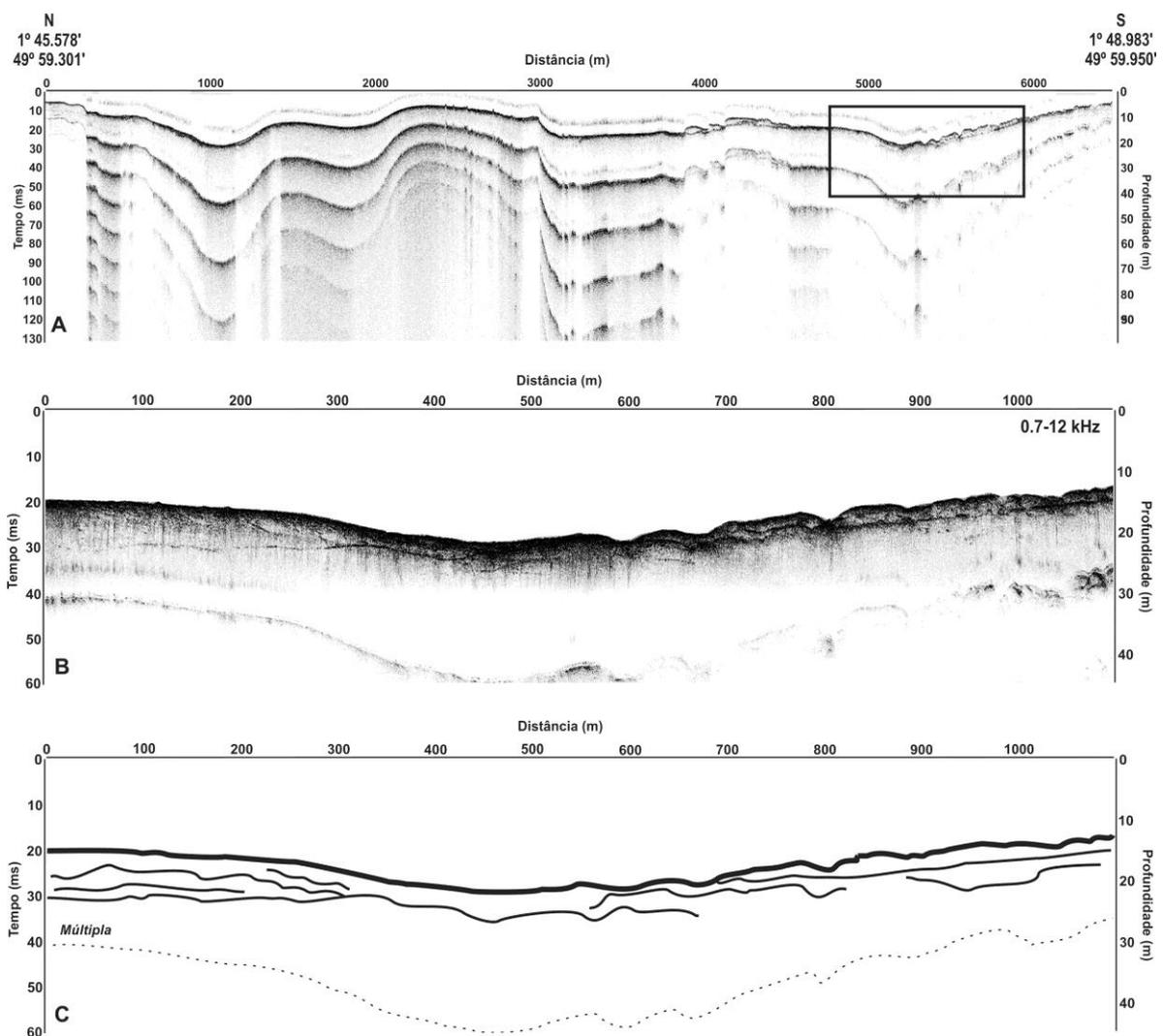
A limitação da penetração do equipamento prejudicou a determinação da profundidade do embasamento geológico, dificultando a visualização com exatidão da localização dos contatos geológicos, uma vez que, sem dados suplementares da geologia local, pode-se interpretar a profundidade do embasamento acústico como sendo o embasamento geológico local e cometer erros graves na interpretação sísmica.

Figura 40: Seção sísmica *L12\_A3* executada longitudinalmente ao canal fluvial (A). Em (B): trecho da seção processada. Em (C): Identificação dos sismoestratos preenchendo depressões com material sedimentar mais lamoso.



Na seção sísmica (Fig. 43), pode-se visualizar a disposição dos padrões de terminações dos refletores de forma subparalela sobrepondo a deposição em um horizonte sísmico bem delineado na seção, possivelmente um registro da migração de bancos arenosos em direção a um nível de base mais baixo, representando um canal secundário de escoamento.

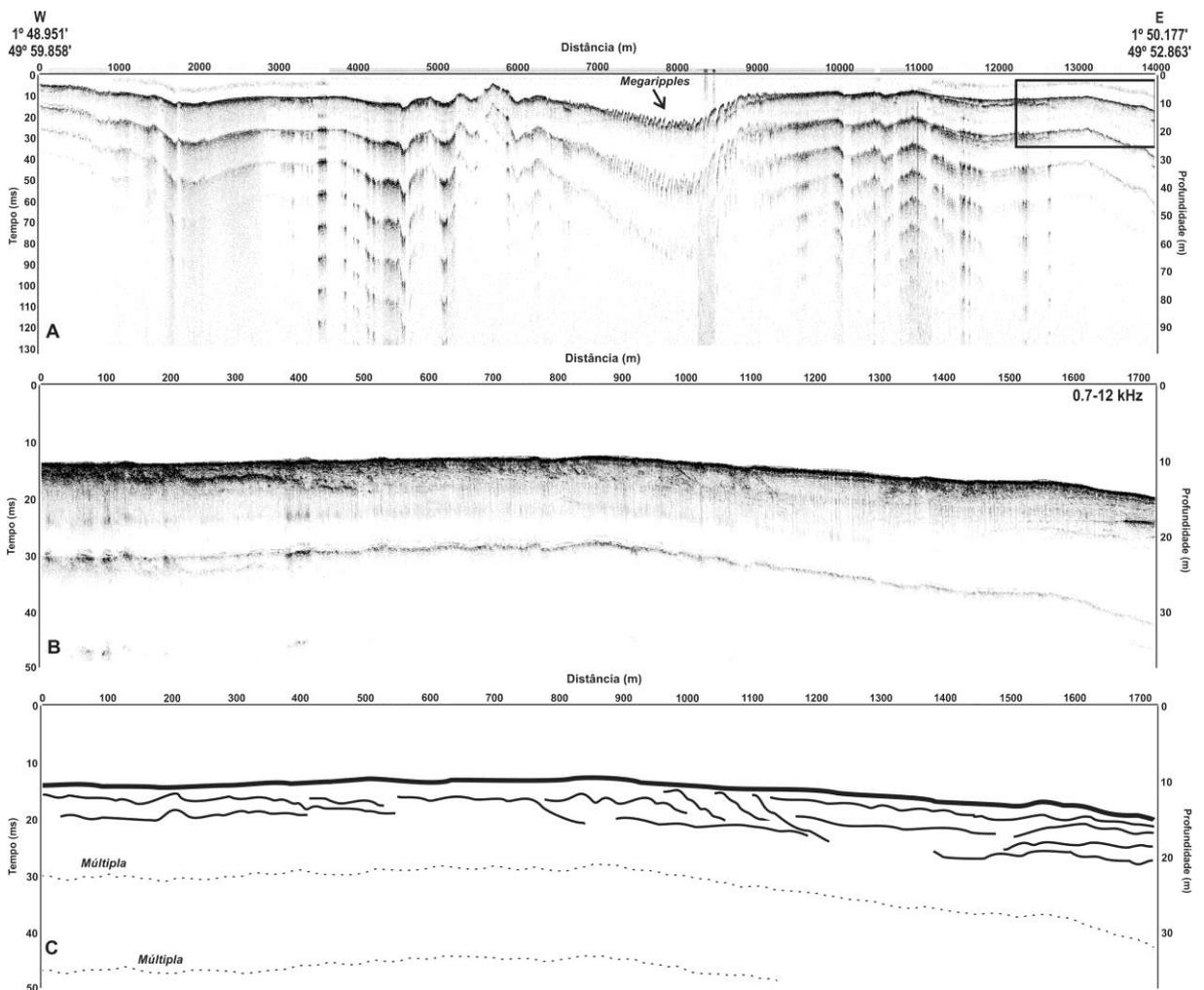
Figura 41: Em (A): seção sísmica *L14.1\_A3* (ponta do Tapera), executada transversalmente ao canal fluvial, com morfologia comprimida pelo modo de visualização no ambiente ReflexW. Em (B): Trecho da seção sísmica processada com a identificação de um banco transversal ao canal. Em (C): Identificação dos sismoestratos intercalados presente logo abaixo da superfície de fundo, que pode ser a estrutura de um banco de material sedimentar mais fino.



A observação de fundos submersos através de sistemas de altas frequências como ecobatímetros às vezes não revelam grandes características do transporte de materiais sólidos (sedimentos de fundo), dependendo do fluxo da corrente as morfologias acabam sofrendo erosão e sendo depositadas em outro ambiente com menos energia.

A seção sísmica *L15\_A4*, apresenta uma superfície de fundo regular com presença de refletores paralelos a subparalelos sendo depositados no sentido da jusante do canal fluvial, os sismoestratos apresentam uma espessura de 3 a 5 m demonstrando a influência do aporte hídrico e sedimentológico da região dos estreitos (Fig. 44).

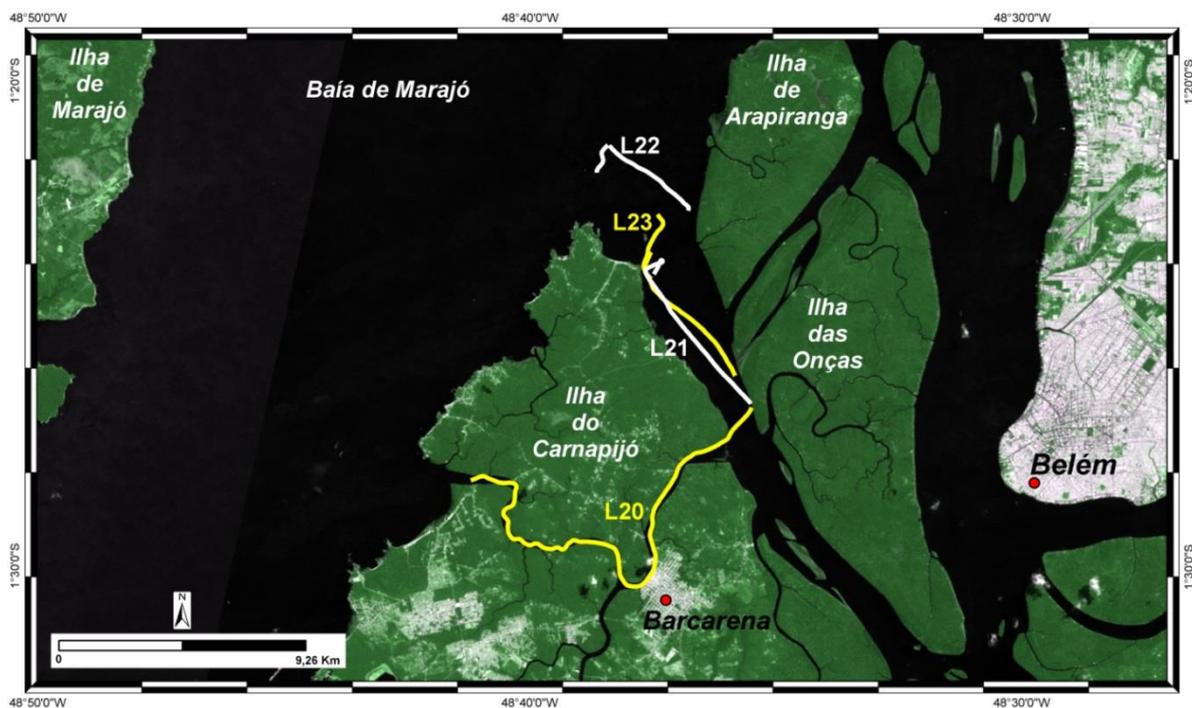
Figura 42: Em (A): seção sísmica *L15\_A4* executada longitudinalmente ao canal fluvial, com morfologia comprimida pelo modo de visualização no ambiente ReflexW. Em (B): Trecho da seção sísmica processada com a identificação de refletores subparalelos. Em (C): Identificação dos sismoestratos depositados paralelamente.



### 5.5 Área da Ilha do Carnapijó

A área ao entorno da ilha do Carnapijó é uma região com intenso tráfego de embarcação e via de acesso aos municípios do interior do estado do Pará. O Furo do Arrozal é um canal de escoamento governado pelo balanço do nível da maré. Possui bancos arenosos ao longo do canal e afloramentos rochosos. Próximo à cidade de Barcarena o perfil apresentou feições angulares (rochas) e um conjunto de refletores sísmicos (Fig. 45).

Figura 43: Imagem de satélite da área da ilha do Carnapijó com a localização as linhas sísmicas.



Nas áreas mais interiores, com menor profundidade e maior sinuosidade do curso fluvial, procurou-se observar algumas características das frequências de aquisição, assim foram realizados 4 (quatro) perfis sísmicos no entorno da ilha (furo do arroizal e no canal do Carnapijó). Os perfis apresentaram uma forte atenuação do sinal acústico na superfície, gerando muitas múltiplas nos registros. Foram utilizadas faixas baixas e altas de frequências na aquisição, resultando em um perfil acústico plano nos canais e refletores nas margens e próximas a afloramento rochoso (Tab. 6).

Tabela 6: Caracterização detalhada dos parâmetros e descrição visual dos perfis sísmicos da área da ilha do Carnapijó.

<b>Perfis Sísmicos</b>				
<b>Perfil</b>	<b>Seções Sísmicas</b>	<b>Banda de Pulso</b>	<b>Coefficiente Reflexão RC</b>	<b>Descrição</b>
<b>L20</b>	<b>L20_margeando</b>	<b>2-12 kHz 20ms 0,5-8 kHz 5ms 0,5-7,2 kHz 30ms 1-6 kHz 40ms</b>	<b>-54,3 -48,3 -48,2 -50,4</b>	Forte atenuação do sinal sísmico na superfície, perfil raso com muitas múltiplas, estruturas geológicas com refletores sísmicos.
<b>L21</b>	<b>L21_furo do carnapijó</b>	<b>1-6 kHz 40ms</b>	<b>-50,3</b>	Perfil raso com forte atenuação do sinal e muitas múltiplas.
<b>L22</b>	<b>L23_Canal Carnapijó L23_Pedra Carnapijó</b>	<b>0,5-4,5 kHz 50ms 1-6 kHz 40ms</b>	<b>*** -50,3</b>	Perfil transversal ao canal principal do Carnapijó com presença de refletores nas margens e forte atenuação do sinal.
<b>L23</b>	<b>L22_canal do carnapijó retorno L_25 Canal do carnapijó</b>	<b>0,5-4,5 kHz 50ms 2-12 kHz 20ms</b>	<b>***</b>	Forte atenuação do sinal, presença de superfície plana sem morfologias com muitas múltiplas.

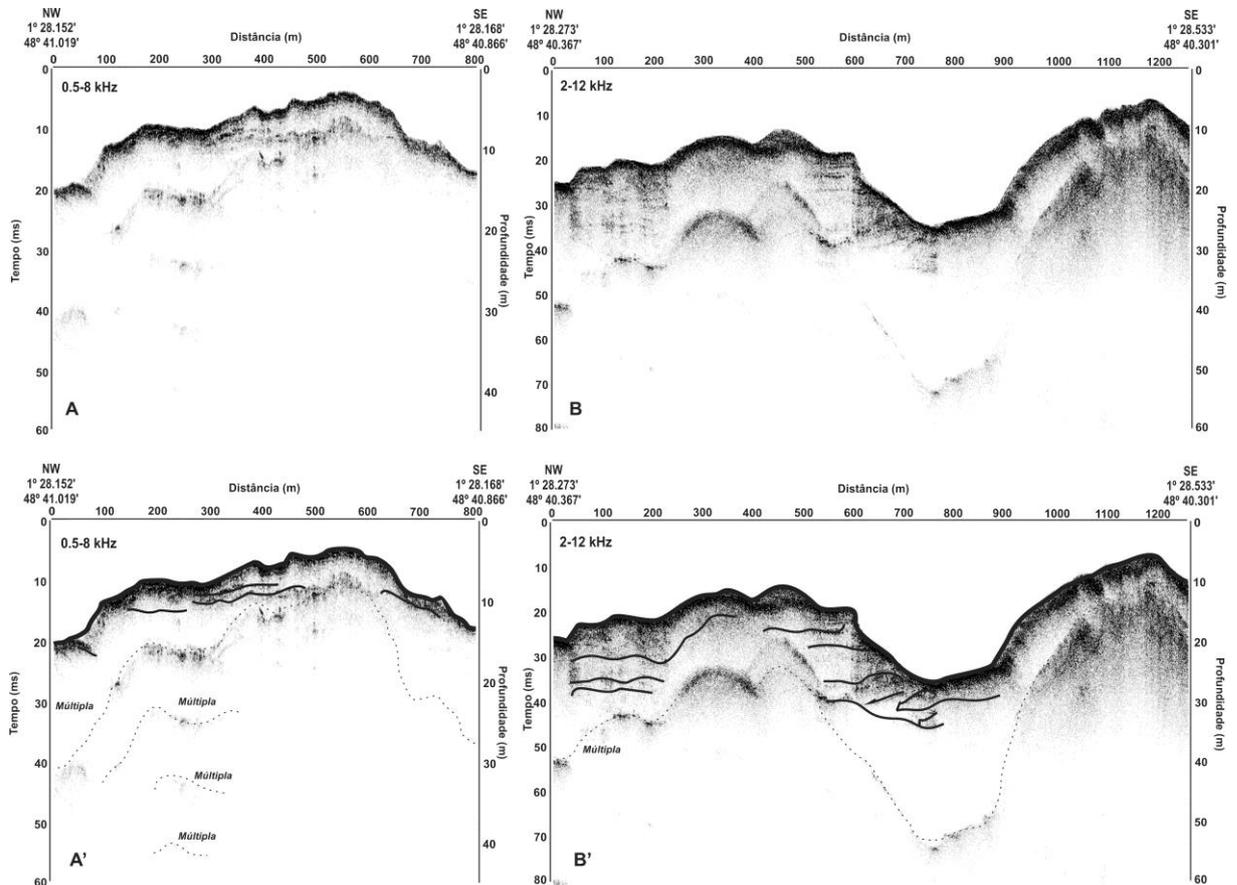
\*\*\* Sem resposta do coeficiente de refletividade

As regiões mais abrigadas são alvos de estudos mais detalhados em relação aos impactos decorrentes das atividades antrópicas, da mesma forma que as demais regiões apresentadas nesse trabalho, o conhecimento a cerca do subfundo deve ser tratado como algo necessário, porém o levantamento nessas áreas mais especifica são mais comumente realizadas devido a proximidade com cidades, portos dentre outras construções.

O mapeamento da espessura dos refletores juntamente com a determinação da profundidade do embasamento geológico são alguns dos objetivos nesse tipo de levantamento. Em áreas costeiras, a investigação da subsuperfície pode auxiliar na construção de diques e barragens de contenção na tentativa de conter a erosão das margens.

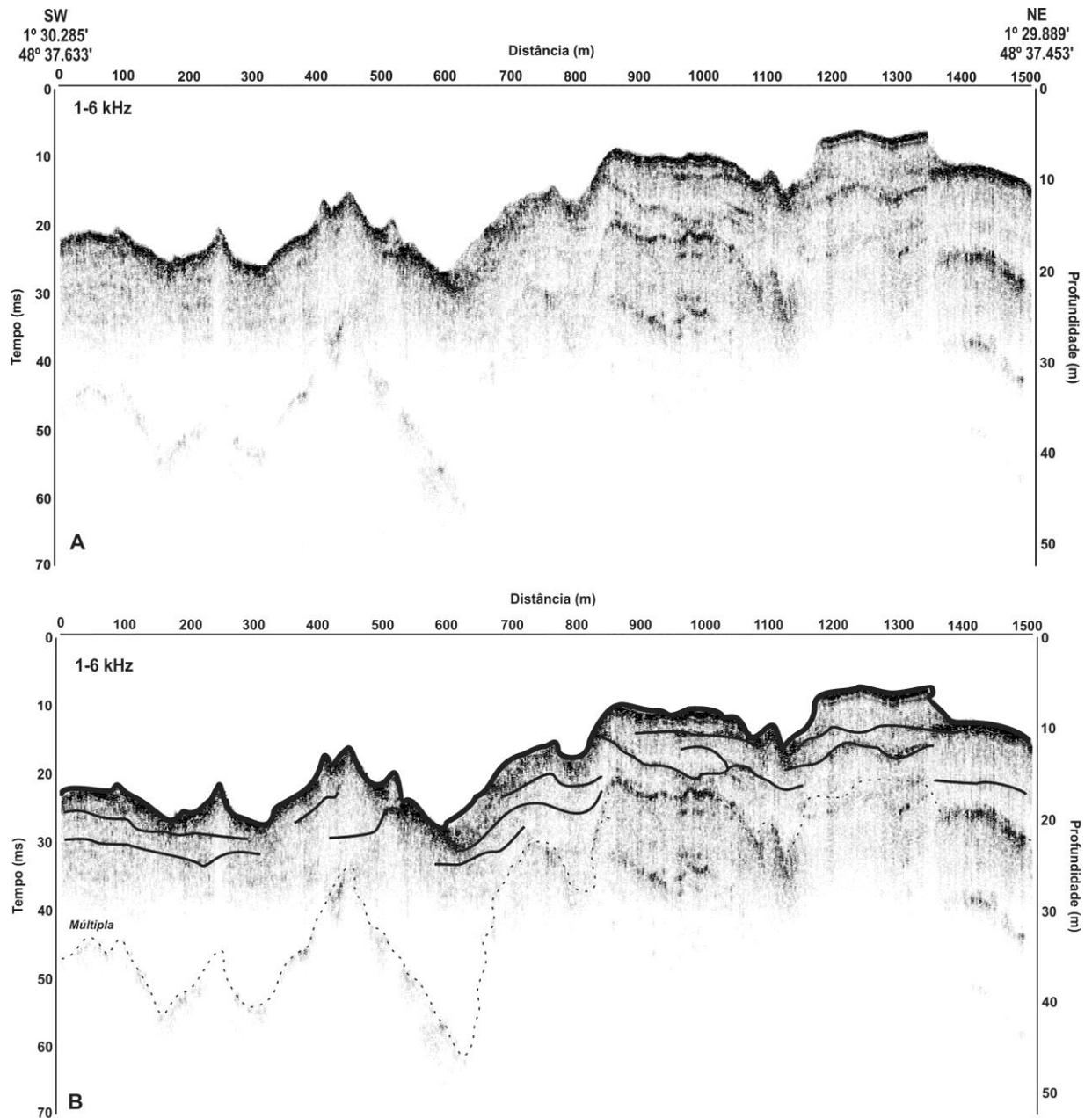
A linha sísmica L20 percorreu o furo do Arrozal realizando a aquisição de forma a percorrer as regiões em “zig-zag”, obtendo assim linhas mais retas possíveis. A figura 46 (a) representa a visualização de uma seção longitudinal à direção do canal, podendo visualizar as estruturas de um afloramento rochoso submerso com a visualização de refletores paralelos decorrentes de processos deposicionais recentes. A figura 46 (b) mostra uma seção sísmica realizada na diagonal do Canal do Arrozal, de forma a visualizar os refletores paralelos e subparalelos depositando-se em direção ao canal principal.

Figura 44: Em (A): seção sísmica *L20* executada longitudinalmente ao canal fluvial, com a identificação de refletores paralelos. Em (B): Trecho da seção sísmica processada na diagonal do canal com a identificação de refletores paralelos e subparalelos.



A Figura 47 representa uma seção sísmica realizada diagonalmente ao canal as proximidades de da cidade de Barcarena, onde pode-se identificar mais de um canal preferencial de escoamento além de bancos as proximidades da margem nordeste, indicando processos erosivos e deposicionais no local, a profundidade do embasamento acústico e rasa não permitindo a localização do embasamento geológico no local. No entanto para a determinação de camadas mais superficiais de até 8 m de espessura o equipamento apresentou respostas satisfatórias.

Figura 45: Em (A): seção sísmica L20 executada na diagonal do canal fluvial, com a identificação de refletores subparalelos.

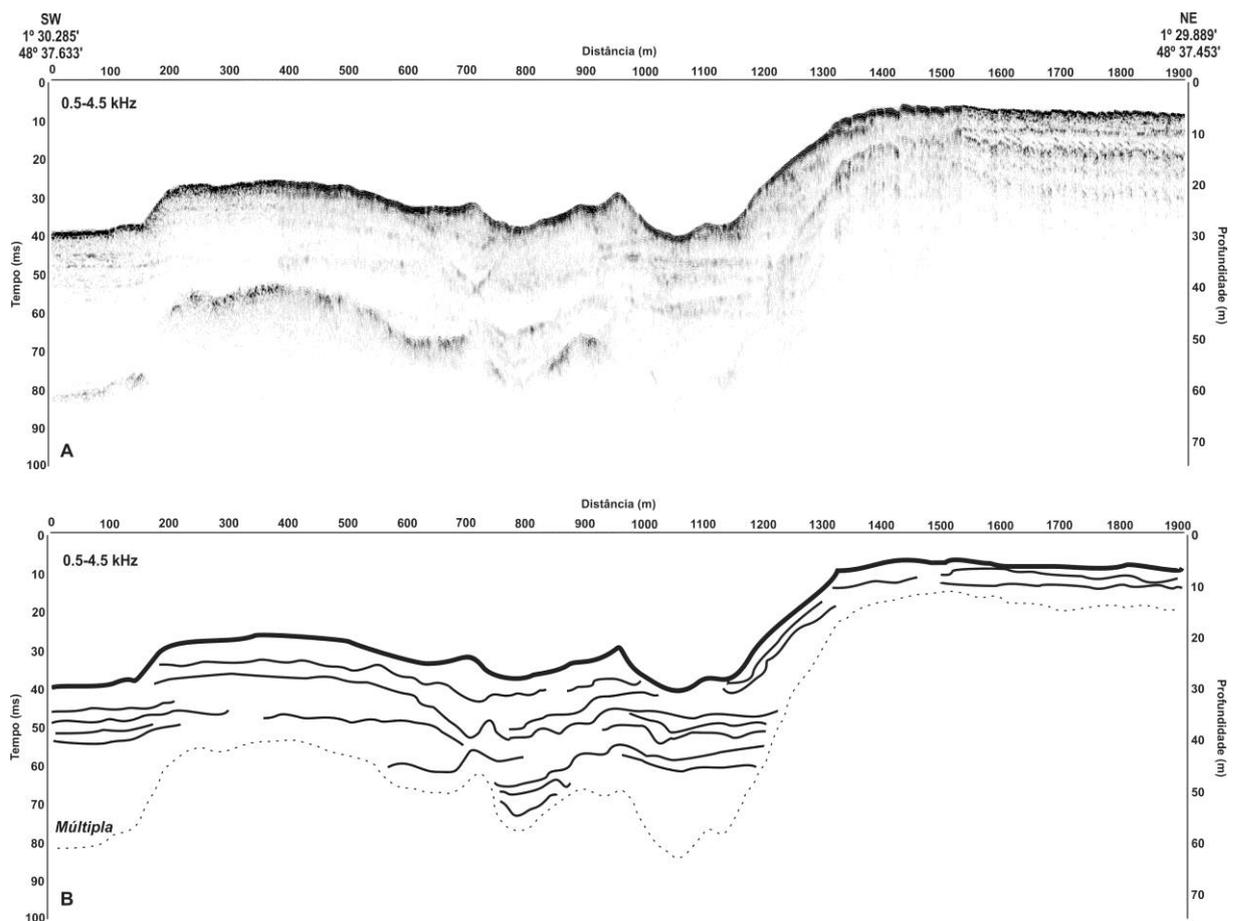


O Canal do Arrozal apresentou-se com baixas profundidades nas margens e profundidades maiores dentro dos canais principais, sua morfologia de fundo manteve-se regular na maioria de suas linhas com exceção dos locais com afloramentos rochosos e a presença de bancos marginais que podem representar terraços fluviais em processos de erosão.

Os refletores sísmicos puderam ser visualizados nos locais com deposição preferencialmente de materiais mais finos (lamosos) não sendo detectados no fundo dos canais devido à atenuação do sinal sísmico.

A seção sísmica da Figura 48 representa uma seção sísmica realizada transversalmente a desembocadura do Furo do Carnapijó, as proximidades do afloramento rochoso do Carnapijó. Este local possui uma hidrodinâmica moderada com regiões muito rasas, e apresentando fundo rochoso as proximidades do afloramento rochoso que acaba sendo um receptor de sedimentos no local.

Figura 46: Em (A): seção sísmica *L23\_furo do Carnapijó* executada transversalmente a desembocadura do furo, com morfologia representativa de um terraço fluvial com a identificação dos sismoestratos paralelos e subparalelos.



Na margem nordeste (Fig. 48) é possível identificar um terraço fluvial bem definido com sequências de refletores paralelos. Na região do canal é possível identificar estratos bem abaixo da superfície de erosão, onde pode-se identificar sismoestratificações correlacionadas a um paleocanal que sofreu deposição de sedimentos provavelmente de origem terrígena.

A identificação destes tipos de feições mais antigas pode ser feita com o auxílio do Sub-Bottom, pois o mesmo apresenta resultados satisfatórios nessas regiões com deposição de materiais mais finos. Revelando sequências estratigráficas bem definidas

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou a realização do levantamento de reconhecimento sísmico na região estuarina da Amazônia oriental, nordeste do estado do Pará. O estudo de subsuperfície de fundo foi promovido como forma de revelar formas e estruturas imersas dentro do canal, fornecendo subsídios para estudos futuros relacionados à área.

Regionalmente os ambientes submersos da região da desembocadura são caracterizados por forte variação do regime de fluxo fluvial com a maré. Desenvolve estruturas morfológicas preferencialmente unidirecionais onde as camadas mais recentes sofrem intensos processos erosivos.

Foram observados grandes corpos de dunas (*Megaripples*) na região com direção à jusante do canal, presença de longos bancos de areia ao longo das margens de rios, ilhas e canais nas regiões onde há um regime de fluxo inferior. Foi identificado um paleocanal com deposição de estratos sedimentares finos, possivelmente de origem terrígena.

No Brasil são poucos os centros tecnológicos voltados ao conhecimento e desenvolvimentos de tecnologia aplicada a áreas de superfície e subsuperfície de fundo das áreas submersas rasas.

Em nossa região, trabalhos relacionados com a identificação e caracterização de subsuperfície em ambientes submersos são escassos. A demanda de um acervo especializado no assunto ainda requer mais esforço e interesse por parte dos setores governamentais, visto que nossa região possui um imenso potencial hidroviário a ser expandido e estudado.

Um dos principais resultados apresentados pela sísmica em áreas rasas é a boa caracterização de depósitos sedimentares com relação a mensuração da espessura das camadas sedimentares para finalidades de estudo geológicos/estratigráfico ou mesmo aplicação no desenvolvimento de obras de infraestrutura, como portos, pontes, dutos submarinos, dentre outras atividades.

A região de forma geral apresentou uma relativa dificuldade de penetração e visualização dos refletores sísmicos em ambientes com alta dinâmica sedimentar, considerando a presença de sedimentos grossos, gerando forte bloqueio do sinal de aquisição pelo Sub-Bottom Profile. No entanto, a ferramenta obteve ótimas respostas e boa visualização

dos sismoestratos em ambientes com predominância de material lamoso, decorrentes dos baixos fluxos de corrente localmente.

A medição da profundidade do embasamento rochoso foi prejudicada devido à limitação do método, sendo necessária a utilização de equipamentos com maior potência e energia que trabalhem com sinais acústicos de menor frequência, resultando em maior poder de penetração do sinal através dos estratos sedimentares.

A utilização do equipamento se mostrou eficiente nos estudos de investigação e caracterização da coluna sedimentar até poucos metros abaixo da superfície (cerca de 30 m). Onde o objetivo não envolve maiores profundidades, o método oferece resultados bastante interessantes, como por exemplo, o estudo de áreas abrigadas, onde prevalece a deposição de materiais de granulometria mais fina e, mesmo em certos casos, no estudo de depósitos muito finos como em bacias de forte decantação de sedimentos.

Um dos desafios nesse trabalho é despertar a curiosidade de novos grupos de pesquisa para essas áreas (cursos fluviais, lagos, estuários e zonas costeiras), uma vez que os canais fluviais são os principais contribuintes de material sedimentar para zonas costeiras e oceano, e o aprofundamento a cerca dos conhecimentos das regiões mais rasas podem aumentar o entendimento do aporte sedimentar em regiões mais distais aos rios.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR G.A.; BAHIA R.R.; REZENDE W.M. PROSPECÇÕES GEOLÓGICAS E GEOFÍSICAS EXECUTADAS PELA PETROBRAS NA FOZ DO AMAZONAS. BELÉM: PETROBRAS, DEPARTAMENTO DE EXPLORAÇÃO DO NORTE. *RELATÓRIO INTERNO*.1966 584A, 15p.
- AZEVEDO R.P.. TECTONIC EVOLUTION OF BRAZILIAN EQUATORIAL CONTINENTAL MARGIN BASINS. *TESE DE DOUTORAMENTO*, UNIVERSITY OF LONDON. 1991. 455f.
- BADLEY, M.E. PRACTICAL SEISMIC INTERPRETATION. *REIDEL PUBLISHING COMPANY. DORDRECHT, HOLANDA*. 1985. 257P.
- BATISTA, A. J. F. CONSTRUÇÃO DE MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMETRICAS E BATIMETRIA NO CANAL DO QUIRIRI, BAÍA DO MARAJÓ E RIO PARÁ-PA. *TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, UFPA, BRASI 2013. 88f.
- BEMERGUY R.. MORFOTECTÔNICA E EVOLUÇÃO PALEOGEOGRÁFICA DA REGIÃO DA CALHA DO RIO AMAZONAS. *TESE DE DOUTORAMENTO*, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, 1997. 200P.
- BEMERGUY R.L.. ESTUDO SEDIMENTOLÓGICO DOS PALEOCANAIS DA REGIÃO DO RIO PARACAUARI, SOURE, ILHA DO MARAJÓ, ESTADO DO PARÁ. *DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, 1981. 95P.
- BEMERGUY RL AND COSTA JBS.. CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA DE DRENAGEM DA AMAZÔNIA E SUA RELAÇÃO COM O ARCABOUÇO TECTONO-ESTRUTURAL. BELÉM: *BOLETIM DO MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI*. SÉRIE CIÊNCIAS DA TERRA. 1991. (3): 75-97
- BEMERGUY R.L., COSTA J.B.S., HASUI Y., BORGES M.S., SOARES JR.A.V.. STRUCTURAL GEOMORPHOLOGY OF THE BRAZILIAN AMAZON REGION. IN: KLEIN E.L., VASQUEZ M.L., ROSACOSTA L.T. (EDS.) *CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*. SBG, NÚCLEO NORTE. BELÉM, 2002. P. 245-257.
- CHRISTOFOLETTI, ANTÔNIO. GEOMORFOLOGIA FLUVIAL. SÃO PAULO: *EDGARD BLUCHER*, 1981. 313 P.
- CLAERBOUT, J. F.. SPECTRAL BALANCING, STANFORD EXPL. *PROJ. REP.* 1975. NO, 7, P. 172-182.
- COSTA J.B.S. & HASUI Y. 1997. EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA AMAZÔNIA. IN: COSTA M.L. & ANGÉLICA R.S. (EDS.) *CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*. SBG, NÚCLEO NORTE, 1997. P.15-19
- CORRÊA, I. C. S.. APLICAÇÃO DO DIAGRAMA DE PEJRUP NA INTERPRETAÇÃO DA SEDIMENTAÇÃO E DA DINÂMICA DO ESTUÁRIO DA BAÍA DE MARAJÓ-PA. *PESQUISAS EM GEOCIÊNCIAS*, 2005, V. 32, N. 2, P. 109 – 118.

CUNHA, S. B.. GEOMORFOLOGIA FLUVIAL. IN: GERRA, A.J.T. & CUNHA, S.B. (EDS). GEOMORFOLOGIA – UMA ATUALIZAÇÃO DE BASES E CONCEITOS. *BERTRAND BRASIL*. RIO DE JANEIRO, 1994. 472P.

CUNHA, S. B. DA. GEOMORFOLOGIA FLUVIAL. IN: GEOMORFOLOGIA: UMA ATUALIZAÇÃO DE BASES E CONCEITOS. ANTONIO TEIXEIRA GUERRA E SANDRA BAPTISTA DA CUNHA (ORG.). RIO DE JANEIRO: *BERTRAND BRASIL*, 2007.

GADALLAH, M. R. “RESERVOIR SEISMOLOGY – GEOPHYSICS IN NONTECHNICAL LANGUAGE”, *PENNWELL BOOKS*, TULSA. 1994.

GALVÃO, M.V.G.. EVOLUÇÃO TERMODINÂMICA DA BACIA DO MARAJÓ. *DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*, UNIVERSIDADE OURO PRETO, 1991. 193p.

GERHARDT, A.. ASPECTOS DA VISUALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DE DADOS SÍSMICOS. *DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, RIO DE JANEIRO - RJ, 1998.

GOMES, M. P.. AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS DE SÍSMICA DE ALTA RESOLUÇÃO NA PLATAFORMA CONTINENTAL NORTE DO RIO GRANDE DO NORTE: VALE INCISO DO RIO AÇU. *DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE – UFRN. 2009.

HEINRICH, H.. A COMPARISON OF CONVENTIONAL SHIP-INSTALLED 3.5 KHZ SUB BOTTOM PROFILER (SBP) AND THE NEW KAE PARASOUND ILLUSTRATED BY A MAPPING OF A DEEP-SEA MEANDER, *MITT. DT. HYDROGR.* 1986. Z. 39 (6), 255–262.

HOULDING, S. W.. “3-D GEOSCIENCE MODELING COMPUTER TECHNIQUES FOR GEOLOGICAL CHARACTERIZATION”, *SPRINGER-VERLAG*, BERLIN. 1994.

HUGENHOLTZ, C. H.; MOORMAN, B. J.; WOLFE, S. A., GROUND PENETRATING RADAR (GPR) IMAGING OF THE INTERNAL STRUCTURE OF AN ACTIVE PARABOLIC SAND DUNE. IN: STRATIGRAPHIC ANALYSES USING GPR. (EDS) GREGORY S. BAKER, HARRY M. JOL, *GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA, SPECIAL PAPER 432*, 2007. PP. 35-45.

ILLEGAS, J.M.C. GEOLOGIA ESTRUTURAL DA BACIA DO MARAJÓ. *DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, 119P. 1994.

KINEKE, G. C.; STERNBERG, R. W. DISTRIBUTION OF FLUID MUD ON THE AMAZON CONTINENTAL SHELF. *MARINE GEOLOGY, SPECIAL ISSUE: GEOLOGICAL SIGNIFICANCE OF SEDIMENT TRANSPORT AND ACCUMULATION ON THE AMAZON CONTINENTAL SHELF*, V. 125, N. 3/4, P. 193-233. JUL. 1995.

KIRSCH, R. (ED.). GROUNDWATER RESOURCES IN BURIED VALLEYS – A CHALLENGE FOR GEOSCIENCES. BURVAL WORKING GROUP. HANNOVER - GERMANY. PUBLISHED BY: *LEIBNIZ INSTITUTE FOR APPLIED GEOSCIENCES (GGA-INSTITUT)*. 2006.

LANA, M.; MILANI, E.J. NOTAS SOBRE A EVOLUÇÃO ESTRUTURAL DA BACIA DE MARAJÓ. BELÉM: PETROBRAS/ DEPARTAMENTO DE EXPLORAÇÃO DO NORTE/DIVISÃO DE INTERPRETAÇÃO. RELATÓRIO INTERNO, 1987. 18 P.

LUDWIG, G. GEOLOGY OF THE MARAJÓ BASIN. RIO DE JANEIRO: PETROBRAS/DEPARTAMENTO DE EXPLORAÇÃO/ DIVISÃO DE EXPLORAÇÃO. RELATÓRIO INTERNO, 1964. 20 P.

MANTELLI, L. R.; ROSSETTI, D. F. SIGNIFICADO TECTÔNICO DE LINEAMENTOS DE DRENAGEM NO SUDOESTE DA ILHA DO MARAJÓ. *REVISTA BRASILEIRA DE GEOCIÊNCIAS*, 2009.V. 39, P. 1-13.

MEADE, R.H., DUNNE, T., RICHEY, J.E., SANTOS, U.M., SALATI, E. STORAGE AND REMOBILIZATION OF SUSPENDED SEDIMENT IN THE LOWER AMAZON RIVER OF BRAZIL. 1985.*SCIENCE* 228, 488–490.

MEADE, R.H. SUSPENDED SEDIMENTS OF THE MODERN AMAZON AND ORINOCO RIVERS. 1994. *QUAT. INT.* 21, 29–39.

NITTROUER, C.A., DEMASTER, D.J.,. OCEANOGRAPHY OF THE AMAZON CONTINENTAL SHELF. 1996. *CONT. SHELF RES.* 16, 5-6.

NITTROUER, C.A., KUEHL, S.A. (EDS.). GEOLOGICAL SIGNIFICANCE OF SEDIMENT TRANSPORT AND ACCUMULATION ON THE AMAZON CONTINENTAL SHELF. 1995. *MAR. GEOL.* 125, 175–399.

NITTROUER, C.A., KUEHL, S.A., STERNBERG, R.W., FIGUEIREDO, JR., A.G., FARIA, JR., L.E.C. AN INTRODUCTION TO THE GEOLOGICAL SIGNIFICANCE OF SEDIMENT TRANSPORT AND ACCUMULATION ON THE AMAZON CONTINENTAL SHELF. IN: NITTROUER, C.A., KUEHL, S.A. (EDS.). GEOLOGICAL SIGNIFICANCE OF SEDIMENT TRANSPORT AND ACCUMULATION ON THE AMAZON CONTINENTAL SHELF. 1995. *MAR. GEOL.* 125, 177–192.

OLTMAN, R.E., STEMBERG, H.O’R., AMES, F.C., AND DAVIS, L. C., JR. AMAZON RIVER INVESTIGATIONS, RECONNAISSANCE MEASSUREMENTS OF JULY 1963: U.S. GEOL. 1964. *SURVEY CIRC.* 486, 15P

OLIVEIRA, L. R. R. GEOMORFOLOGIA FLUVIAL E NAVEGABILIDADE DO BAIXO CURSO DO RIO TOCANTINS. *DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2010. BRASÍLIA, DF, 107P.

PRIOR, D.B.; YANG, Z.S.; BORNHOLD, B.D.; GELLER, G.H.; LIN, Z.H.; WISEMAN, W.J.; JR., WRIGHT, L.D.; LIN, T.C. THE SUAQUEOUS DELTA OF THE MODERN HUANGHE (YELLOW RIVER). 1986. *GEO-MAR. LETT.* 6, 67–65.

QUARESMA, V. S.; DIAS, G. T. M.; BAPTISTA NETO, J. A. CARACTERIZAÇÃO DAOCORRÊNCIA DE PADRÕES DE SONAR DE VARREDURA LATERAL E SÍSMICA DE ALTA FREQUÊNCIA (3,5 E 7,0 KHZ) NA PORÇÃO SUL DA BAÍA DE GUANABARA -RJ. RECEIVED OCTOBER 12, 1999 / ACCEPTED APRIL 21, 2001. *REV. BRAS. GEOF.* 2001, VOL.18, N.2, PP. 201-214.

RADAM. GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA, PEDOLOGIA, VEGETAÇÃO E USO POTENCIAL DA TERRA. FOLHA SA.22-BELÉM. *SÉRIE LEVANTAMENTO DE RECURSOS NATURAIS DO PROJETO RADAMBRASIL*. RIO DE JANEIRO, DNPM, MAPA TEMÁTICO, 1974. ESCALA 1:1.000.000.

RAIOL, E. S. CONTRIBUIÇÕES PARA ELABORAÇÃO DE CARTAS SEDIMENTOLÓGICAS DA FOZ DO RIO AMAZONAS COM ENFOQUE NA BAÍA DO GUAJARÁ (CANAIS DA SOTAVE E COTIJUBA), BELÉM-PA. *TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, UFPA, BRASIL. 2011.

ROBINSON, E. A.; TREITEL, S. "GEOPHYSICAL SIGNAL ANALYSIS", *PRENTICE-HALL, ENGLEWOOD CLIFFS*. 1980.

ROSSETTI D.F.; VALERIANO M.M.; THALLÊS M. AN ABANDONED ESTUARY WITHIN MARAJÓ ISLAND: IMPLICATIONS FOR LATE QUATERNARY PALEO GEOGRAPHY OF NORTHERN BRAZIL. 2007. *EST. AND COASTS*, 30:813-826.

ROSSETTI D.F., GÓES A.M., VALERIANO M.M., MIRANDA A.C.C.. QUATERNARY TECTONICS IN A PASSIVE MARGIN: MARAJÓ ISLAND, NORTHERN BRAZIL. 2008. *J QUAT SC*, 23:121-135.

ROSSETTI D.F., VALERIANO M.M., GÓES A.M., THALES M. PALEODRAINAGE IN MARAJÓ ISLAND (NORTHERN BRAZIL) AND ITS RELATION TO HOLOCENE RELATIVE SEA-LEVEL. *THE HOLOCENE*, 2008B. 18:923-934.

ROSSETTI, D. F. TECTONIC CONTROL ON THE STRATIGRAPHY FRAMEWORK OF LATE PLEISTOCENE AND HOLOCENE DEPOSITS IN MARAJÓ ISLAND, STATE OF PARÁ, EASTERN AMAZONIA. *ANAIS DA ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS*, 2010. V. 82, P. 439-450.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A.M. LATE QUATERNARY DRAINAGE DYNAMICS IN NORTHERN BRAZIL. BASED ON THE STUDY OF A LARGE PALEOCHANNEL FROM SOUTHWESTERN MARAJÓ ISLAND. *ANAIS DA ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS*, 2008. V. 80, P. 1-15.

ROSSETTI, D.F; GÓES. A.M. 2001. IMAGING UPPER TERTIARY TO QUATERNARY DEPOSITS FROM NORTHERN BRAZIL APPLYING GROUND PENETRATING RADAR. *REV. BRAS. GEOSCIÊNC.*, 31 (2001), PP. 195–202.

SAMBROOK SMITH, G. H.; ASHWORTH, P. J.; BEST, J. L.; WOODWARD, J.; SIMPSON, C. J. THE SEDIMENTOLOGY AND ALLUVIAL ARCHITECTURE OF THE SANDY BRAIDED SOUTH SASKATCHEWAN RIVER, CANADA. *SEDIMENTOLOGY*, 2006. VOL. 53, N. 2, PP. 413-434, 2006

SILVEIRA, O. F. M. ESTUDO BATIMÉTRICO/SONOGRÁFICO DO ESTUÁRIO GUAJARÁ, BELEM-PA. *DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS. 1989.

SHUMM, S. A. PATTERNS OF ALLUVIAL RIVERS. *ANNU. REV. EARTH PLANET. SCI.* 1985. 13: 5-27.

SOUZA, L. A. P. REVISÃO CRÍTICA DA APLICABILIDADE DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS NA INVESTIGAÇÃO DE ÁREAS SUBMERSAS RASAS. *TESE DE DOUTORADO*, CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA QUÍMICA E GEOLÓGICA, 2006. INSTITUTO OCEANOGRÁFICO/USP, 311PP.

SOUZA, R. R DE. MODELAGEM NUMÉRICA DA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES DE MARÉ NA BAÍA DE MARAJÓ E RIO PARÁ (PA). *DISSERTAÇÃO DE MESTRADO*. 2006. SÃO PAULO: USP. 159P.

STEEPLES, D.W. : SHALLOW SEISMIC METHODS. – IN: RUBIN Y, HUBBARD SS (EDS.), *HYDROGEOPHYSICS: 215–251*, SPRINGER; DORDRECHT, THE NETHERLANDS. 2005.

SZATMARI, P.; FRAÇOLIN J.B.L.; ZANOTTO O.; WOLFF S. EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA. *REV BRAS GEOC*, 1987. 17:180-188.

TANER, M. T. ATTRIBUTES REVISITED. *ROCK SOLID IMAGES*. 2000.

TELFORD, W. M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. APPLIED GEOPHYSICS. NEW YORK: *CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS*, 1990. 770p.

VITAL, H. SEDIMENTOLOGY OF THE LOWERMOST AMAZON (RIO XINGU–MACAPA) AND THE ESTREITOS DE BREVES', BRAZIL. *PH.D. THESIS*. KIEL UNIVERSITY, GERMANY, 1996. 189p.

VITAL, H., SILVEIRA, O.F.M., FARIA, JR., L.E.C. SEDIMENTARY ASPECTS OF THE AMAZON ESTUARY. *SIMPOSIO AMASSEDS*. UFF. NITEROI, ABSTRACTS, 1993. 54p.

YILMAZ, O. SEISMIC DATA PROCESSING. *SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS*. 1987. TULSA, OKLAHOMA, 526 P.

YILMAZ, O. SEISMIC DATA ANALYSIS: PROCESSING, INVERSION, AND INTERPRETATION OF SEISMIC DATA. TULSA, *SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS*, 2001.