



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

ALBERTO JACQUES RIBEIRO CORRÊA

APLICAÇÃO DE SÍSMICA DE ALTA RESOLUÇÃO EM AMBIENTE
ESTUARINO AMAZÔNICO, NA INVESTIGAÇÃO DE ESTRUTURAS
NEOTECTÔNICAS.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rollnic

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro

BELÉM-PA

2015

ALBERTO JACQUES RIBEIRO CORRÊA

APLICAÇÃO DE SÍSMICA DE ALTA RESOLUÇÃO EM AMBIENTE
ESTUARINO AMAZÔNICO, NA INVESTIGAÇÃO DE ESTRUTURAS
NEOTECTÔNICAS

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial á obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

Área de concentração: Geofísica Marinha

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Rollnic

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima
Pinheiro

Belém

2015

Ficha Catalográfica

ALBERTO JACQUES RIBEIRO CORRÊA

**APLICAÇÃO DE SÍSMICA DE ALTA RESOLUÇÃO EM
AMBIENTE ESTUARINO AMAZÔNICO, NA
INVESTIGAÇÃO DE ESTRUTURAS NEOTECTÔNICAS**

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

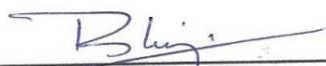
Data de aprovação: 27/02/2015
Banca examinadora:



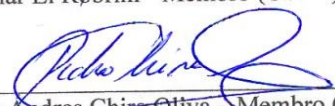
Prof. Dr. Marcelo Rollnic - Orientador (UFPA)



Prof. Dr. Roberto Vizeu Lima Pinheiro - Co-orientador (UFPA)



Prof. Dr. Maamar El Røbrini - Membro (UFPA)



Prof. Dr. Pedro Andres Chira Oliva - Membro (UFPA/Bragança)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por poder estar completando mais esta etapa.

Sou grato também a meus pais Maria Elizabete Ribeiro Nascimento e Carlos Alberto Corrêa por tudo que me ensinaram a ser. E a meus irmãos Jacquely Joaquina Ribeiro Marques, Aerton Jacques Ribeiro Corrêa e Carlos Alberto Marçal Corrêa.

A minha tia, Debora Simone, por me acolher em momentos cruciais da minha vida (a considero uma segunda Mãe).

Aos professores de toda a minha trajetória educacional que pelo visto deu bom fruto. E um especial agradecimento a Odete Silveira, Roberto Vizeu Lima Pinheiro e Marcelo Rollnic, aos quais devo em especial agradecimento nesta reta final da Elaboração da dissertação.

CPGF (Centro de Pós-Graduação em Geofísica), a CAPS a Universidade Federal do Pará, e a todos que de alguma forma me ajudaram a chegar até este ponto.

RESUMO

Métodos sísmicos de alta resolução têm sido utilizados intensamente no mapeamento do Quaternário, investigação dos processos sedimentares, entre outros. A área de estudo está localizada na região norte do estado do Pará, entre os paralelos 1º S e 2º S e os meridianos 50.5º e 48.25º, sendo realizada a pesquisa nas áreas submersas que limitam a Ilha do Marajó em sua parte leste e sudeste, compreendendo a Baía do Marajó, foz do Rio Tocantins e o Rio Pará. A sísmica de alta resolução empregada nesta região tem como principal objetivo a investigação tectônica por meio de dados coletados pelo perfilador acústico SB-512i da Edgetech e a partir desses dados identificar formas estruturais, fraturas, subsidências ou elevações regidas por tectonismo. A partir da análise dos dados sísmicos obtidos na área de estudo, foram identificados nove feições interpretados como ocorrências tectônicas. Devido as especificidades do equipamento e características geológicas da região, áreas de prováveis falhas tectônicas não foram detectadas em grandes profundidades pelo equipamento utilizado, no entanto, foram encontradas nas áreas onde esforços tectônicos ocorreram com intensidades suficientes para ocasionar falhas visíveis nas pseudo-seções mapeadas.

Palavras-chave: Sísmica de alta resolução. Neo-tectônica. Estuário.

ABSTRACT

Seismic methods of high resolutions have been intensely used on the mapping of the Quaternary, investigation of sedimentary processes, and others. The study area is located in the north region of the state of Pará, between the parallels 1° S and 2° S and the meridians 50.5° and 48.25°, the research being carried out in the submerged areas bordering the Marajó Island in its east and the southeast part, comprising the Bay of Marajó, the mouth of the Tocantins River and Pará River. The high resolution seismic employed in this region aims to tectonic investigation by using the data collected by the acoustic profiler SB-512I from Edgetech, and from these data to identify structural shapes, fractures, subsidence or elevations ruled by tectonism. From the analysis of the seismic data obtained in the study area, nine features were identified interpreted as tectonic occurrences. Due the specificities of equipment and geological characteristics of the region, possible areas of tectonic faults were not detected at great depths by the equipment used, however, they were found in areas where tectonic forces occurred with sufficient intensity to cause visible faults in the mapped pseudo-sections.

Keywords: High resolutio. Neo-Tectonic. Estuario.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- Localização da área de estudo identificada por coordenadas geográficas em UTM (Universal transversa de Mercator). As áreas demarcadas em vermelho, da esquerda para a direita, são respectivamente rio Pará, foz do rio Tocantins e baía do Marajó.30
- Figura 2- Métodos de Sísmica Rasa- Ecobatímetro, Multifeixe, Sonar de Varredura Lateral e Perfilador de Subfundo.....17
- Figura 3: Princípio de Huygens, onde cada ponto localizado na frente de onda se comporta como uma nova fonte pontual de emissão de novas ondas esféricas. Se a fonte for plana teremos frentes de onda se propagando de forma plana, e caso a fonte seja pontual as frentes de onda formarão uma esfera.....19
- Figura 4- Comportamentos vibratórios das ondas de corpo ou de volume, onde as ondas P, que tem um comportamento vibratório compressional, vibram no mesmo sentido do seu deslocamento. Enquanto que as ondas S, que tem um comportamento vibratório cisalhante, tem um comportamento vibratório perpendicular ao seu deslocamento. *Fonte- Michigan Technological University*.....20
- Figura 5- Ondas Love e Rayleigh são exemplo de ondas de superfície.....22
- Figura 6- Demonstração da Lei de Snell para uma onda P incidente numa interface anisotrópica, de onde surgem dois novos raios S' e P'. *Fonte- Gomes,2009.*25
- Figura 7- Seção sísmica da baía do Marajó próximo a cidade de Ponta de Pedras, com o perfilador que é objeto de estudo deste trabalho. *Fonte- Imagem do acervo do autor*.....26
- Figura 8- Imagem que mostra a divergência esférica e a dispersão de energia com a distância.27
- Figura 9- Representação do traço sísmico, com picos à direita sejam preenchidos com uma cor determinada pelo usuário. *Fonte- Porsani et al 2010.*28
- Figura 10- Início de formação da Bacia da Foz do Amazonas, primeira manifestação de fragmentação na região, FA – Bacia da Foz do Amazonas; ag – Arco

- de Gurupa. Fonte- ZALÁN, P.V. e MATSUDA, N.S. Bacia do Marajó. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15.....32
- Figura 11- Regime distensivo de baixa intensidade que resultou na formação da Bacia de Marajó, com falhas normais sintéticas, de direções NW-SE e NNW-SSE, inclinadas para NE, M – Bacia de Marajó; ag – Arco de Gurupá. Fonte- ZALÁN, P.V. e MATSUDA, N.S. Bacia do Marajó. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15.....34
- Figura 12- Mapa paleogeográfico do Eocretáceo (início do Albiano). FA – Bacia da Foz do Amazonas; M – Bacia de Marajó; B – Bacia de Barreirinhas; BV – Bacia de Bragança – Viseu; SL – Bacia de São Luís; IN – Bacia de Ilha Nova; PM – Bacia do Pará – Maranhão; ag – Arco de Gurupá; afus – Arco Ferrer – Urbano Santos; at – Arco do Tocantins. Fonte- ZALÁN, P.V. e MATSUDA, N.S. Bacia do Marajó. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15.....36
- Figura 13- Mapa paleogeográfico do Eocretáceo (início do Albiano). FA – Bacia da Foz do Amazonas; M – Bacia de Marajó; B – Bacia de Barreirinhas; BV – Bacia de Bragança – Viseu; SL – Bacia de São Luís; IN – Bacia de Ilha Nova; PM – Bacia do Pará – Maranhão; ag – Arco de Gurupá; afus – Arco Ferrer – Urbano Santos; at – Arco do Tocantins. Fonte- ZALÁN, P.V. e MATSUDA, N.S. Bacia do Marajó. Boletim de Geociências da Petrobras, v15.....38
- Figura 14- Mapa paleogeográfico do Neocretáceo. FA – Bacia da Foz do Amazonas; M – Bacia de Marajó; B – Bacia de Barreirinhas; BV – Bacia de Bragança – Viseu; SL – Bacia de São Luís; IN – Bacia de Ilha Nova; PM – Bacia do Pará – Maranhão; ag – Arco de Gurupá; afus – Arco Ferrer – Urbano Santos; at – Arco do Tocantins.....40
- Figura 15- Mapa paleogeográfico do Holoceno. FA – Bacia da Foz do Amazonas; M – Bacia de Marajó; B – Bacia de Barreirinhas; BV – Bacia de Bragança – Viseu; SL – Bacia de São Luís; IN – Bacia de Ilha Nova; PM – Bacia do Pará – Maranhão; ag – Arco de Gurupá; afus – Arco Ferrer – Urbano

Santos; et al – Arco do Tocantins.	Fonte- ZALÁN, P.V. e MATSUDA, N.S. Bacia do Marajó. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15.....	42
Figura 16-	Sistema de perfilagem Sub-Botton 3200-XS. A esquerda, unidade de plataforma e a direita “peixe” (SB-512i).....	44
Figura 17-	Discover 3.52, software através do qual se pode visualizar o dado e fazer mudanças nos parâmetros utilizados no ato da aquisição.	46
Figura 18-	Planejamento da aquisição sísmica na área de estudo projetada no ArcGIS (ArcMap10), Imagem do autor em conjunto com integrantes do LIOG (Laboratório Institucional de Oceanografia Geológica), da UFPA...	48
Figura 19-	Imagem do autor em conjunto com integrantes do LIOG (Laboratório Institucional de Oceanografia Geológica), da UFPA.	50
Figura 20-	(A) cabos de estabilização do braço de carga; (B) cabo de controle de profundidade do perfilador; (C) cabo de segurança; (D) cabo de dados e alimentação elétrica (E) braço do carga articulado. Fonte- Imagem do acervo do autor.....	50
Figura 21-	Imagem que localiza a área de estudo com todas as linhas sísmicas alternadas em cores vermelhas e amarelas, mostrando os limites de cada linha sísmica. Fonte- Imagem editada do site de sensoriamento remoto, LandCover. (http://nationalmap.gov/landcover.html); acessado em 18 de novembro de 2014.....	52
Figura 22-	Fluxo de processamento para dados de sísmica rasa baseado em GOMES (2009).....	54
Figura 23-	Mapa da área de estudo acrescida de pontos em vermelho que representam os feições tectônicas que serão descritas mais a frente e sobreposta por falhas normais e transcorrentes gerados por Costa et al (1996).	58
Figura 24-	Mapa da área de estudo acrescida de pontos em vermelho que representam as feições tectônicas que serão descritas mais a frente e sobreposta por falhas normais e transcorrentes gerados por Villegas (1994).	60
Figura 25-	Trecho da linha L1, representando a feição I (Figura 24), evidenciando uma falha normal.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 26-	Trecho da linha L11, representando a feição D (Figura 24), evidenciando uma falha normal.....	64

Figura 27- Trecho da linha L11, representando a feição C (Figura 24), evidenciando uma sequencia de feições geológicas.....	66
Figura 28- Trecho da linha L10, representando a feição E (Figura 24), evidenciando uma falha normal.....	68
Figura 29- Trecho da linha L10, representando a feição F (Figura 24), evidenciando uma falha normal.....	69
Figura 30- Trecho da linha L10, representando a feição G (Figura 24), evidenciando uma falha normal.....	70
Figura 31- Trecho da linha L9, representando a feição H (Figura 24), evidenciando uma falha normal.....	71
Figura 32- Trecho da linha L22, representando a feição B (Figura 26), sequencia de feições divergentes, com Horst.	73
Figura 33- Trecho da linha L22, representando a feição A (Figura 24), sequencia de estruturas deformadas por tectonismo.	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Geral.....	16
1.1.2 Específicos	16
2 CONCEITOS BÁSICOS	17
3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E ACESSOS	27
4 EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA REGIÃO	318
5 METODOLOGIA	430
5.1 Equipamentos.....	430
5.2 Funcionamento.....	441
5.3 <i>Softwares</i>	452
5.4 Planejamento pré-campo.....	47
5.5 Aquisição de dados sísmicos	46
5.6 Processamento dos dados.....	530
5.7 Ambiente reflexwin 6.0.....	541
5.8 Leitura dos dados	541
5.9 Geometria do dado.....	552
5.10 Análise espectral.....	552
5.11 Ganhos e filtros	552
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	563
7 DESCRIÇÃO DOS PERFIS SÍSMICOS	618
8 CONCLUSÃO	763
REFERÊNCIAS	785

1 INTRODUÇÃO

Métodos sísmicos de alta resolução têm sido utilizados intensamente nestas últimas três décadas no mapeamento do Quaternário, investigação dos processos sedimentares, engenharia costeira, exploração mineral e nos estudos de *habitats* subaquáticos entre outros temas.

Mantelli e Rossetti (2009) buscaram o significado tectônico de lineamentos de drenagem no sudoeste da Ilha do Marajó através da integração de dados cartográficos com sensoriamento remoto;

Bemerguy (1997) estudou a morfotectônica e evolução paleogeográfica da região da calha do rio Amazonas baseado em imagens de satélite;

Rossetti, Valeriano e Thallês (2007) estudaram um estuário abandonado na Ilha do Marajó baseada em imagens de satélite e radar.

A coleta de dados geofísicos nessa área tem sido limitada a sondagem elétrica vertical (SEV); Trancredi, (1972); Bezerra, (1979); Cavalcanti, (1979); Kobayashi, (1979); Gonzáles, (1984); IDESP, (1974, 1986); Porsani, (1981); Carrasquilla et al. (1991); e Guimarães (1983) e Verma e Bischoff (1989) que aplicaram sísmica de refração e método eletromagnético.

Os resultados dos autores citados acima revelaram que em muitos locais da Ilha do Marajó a sedimentação quaternária é muito expressiva, com pacotes de até 100 metros de espessura, o que pode sugerir uma taxa de subsidência proporcional a estas medidas, possivelmente regida por falhas tectônicas.

Por meio dos trabalhos já citados é notório o papel da tectônica na história geológica responsável por muitas características existentes na região do arquipélago do Marajó.

Somado a esse potencial de descobertas, a sísmica rasa nos últimos 20 anos cresce rapidamente em suas aplicabilidades, principalmente pela sua alta resolução e razoável poder de penetração, que segundo o *site* da empresa fabricante do perfilador utilizado na aquisição dos dados a serem analisados (disponível em <http://www.edgetech.com/>) pode chegar a 200 metros no leito

subaquático, dependendo das condições do meio (espessura da lamina d'água, inclinações da superfície do leito e composição do substrato).

Como a área de estudo tem sido reconhecida pela influencia neotectônicos e o equipamento utilizado tem muitas vantagens nos quesitos, resolução, velocidade de coleta de dados, navegabilidade, baixo custo de manutenção. Temos boas possibilidades de identificar feições neotectônicas ainda não visualizadas, via hidro-sísmica, na região de estudo.

A busca por métodos sísmicos de alta resolução para a investigação de áreas submersas rasas diferem da sísmica de reflexão tradicional voltada à exploração de petróleo. Apesar de ambas as técnicas empregarem os mesmos princípios fundamentais da reflexão sísmica, são diferentes os sistemas de aquisição de dados, as fontes acústicas (comumente de baixa energia), as freqüências emitidos, os receptores, os sistemas de processamento e até mesmo as formas de apresentação dos dados.

A sísmica de reflexão de alta resolução lida com meios ou interfaces geológicas que comumente apresentam baixos contrastes de impedância acústica, fortes atenuadores de sinais de alta freqüência além de possuírem baixa relação sinal/ruído. Comumente a investigação destes meios exige a utilização de fontes acústicas que emitem sinais com espectros de freqüência mais altos, o que torna a rugosidade das superfícies, ou das interfaces, propriedades físicas relevantes (Sousa, 2006).

Uma imagem por si só não é, necessariamente, a solução da questão inicialmente proposta, mas, sim, mais um instrumento de análise do problema exposto. A investigação de ambientes submersos rasos (rios, reservatórios, áreas costeiras e plataforma continental interna) tem despertado real interesse no Brasil e no mundo nestes últimos anos (Souza, 2008). Especialmente, a região amazônica com suas riquezas naturais, tem sido alvo de interesse econômico e científico.

Estudos anteriores na região amazônica, com o objetivo de investigar as formas de fundo são escassos na literatura. NORDIN et al. (1979) e Mertes e Meade (1985) descrevem feições do leito de rios nessa região, porém, não descrevem de

forma detalhada a geometria das dunas, como altura e comprimento de onda (STRASSER, 2008).

Por outro lado, a maior parte dos trabalhos relativos à morfologia e dinâmica sedimentar de sistemas estuarinos e lagunares, realizados no Brasil, caracteriza-se pela adoção de métodos tradicionais de investigação geológica, ou seja, utiliza-se a análise de amostras de superfície de fundo, de sedimentos em suspensão ou testemunhos de sondagens rasas (PAOLO e MAHIQUES, 2008).

Neste trabalho pretende-se, por meio da sísmica de alta resolução, identificar e localizar feições neo-tectônicas, para que tais dados possam ser comparados com dados da literatura e poder propiciar novas conclusões em relação a região estudada que ainda é carente sobre informações geofísicas do quaternários em áreas submersas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

- Detalhar mais e melhor a neotectônica da baía do Marajó e rio Pará por meio da sísmica rasa.

1.1.2 Específicos

- Identificar, formas estruturais, fraturas, subsidências ou elevações regidas por tectonismo .

-Comparar as feições identificadas com as já definidas em trabalhos anteriores.

- Identificar a efetividade do método na área estudada e gerar parâmetros para de aquisição e logística para futuras explorações.

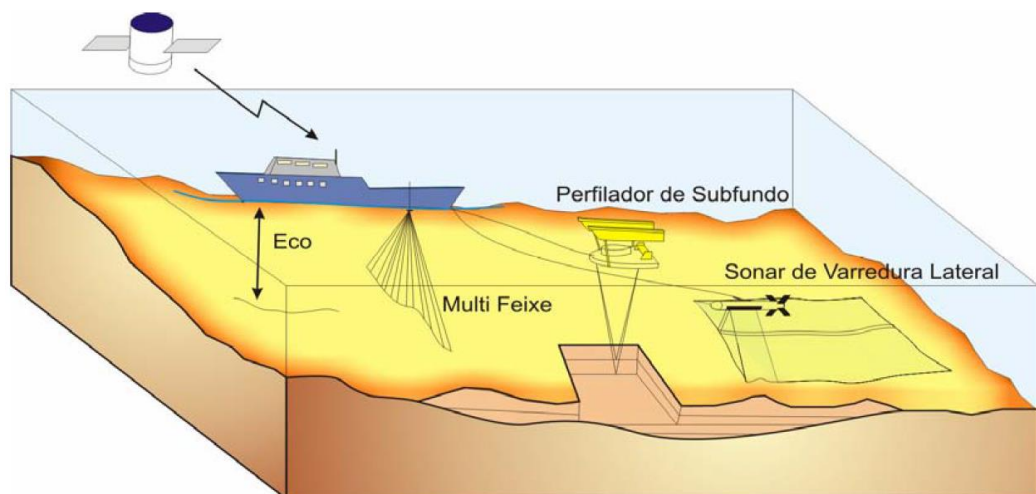
2 CONCEITOS BASICOS

A sísmica rasa ou de alta resolu o faz parte dos métodos geofísicos que investigam meios ou interfaces com baixos contrastes de impedância acústica. Tanto a sísmica convencional como a sísmica rasa (aplicados em plataforma continental interna, áreas costeiras, rios, lagos e reservatórios) empregam os mesmos princípios de reflexão sísmica, porém são diferentes os seus sistemas de aquisi o de dados, as fontes acústicas, os espectros de frequências emitidos, os receptores, os sistemas de processamento e até mesmo as formas de apresenta o dos dados.

Os recursos acima citados são um grande avanço no estudo de fei o geológicas do quaternário, investigando processos sedimentares, engenharia costeira, explora o mineral e nos estudos de habitats subaquáticos são exemplos mais específicos de seu uso. (Souza, 2006).

O ecobatímetro multifeixe, o sonar de varredura lateral e o perfilador sísmico contínuo são equipamentos de sísmica rasa, e se diferenciam basicamente pela frequência e potência de emissão dos sinais (Figura 2).

Figura 1: Métodos de Sísmica Rasa: Ecobatímetro, Multifeixe, Sonar de Varredura Lateral e Perfilador de Subfundo.



Fonte: Gomes 2009.

As informa o de sísmica rasa são dados com grande precisão e resolu o (escala centimétrica), obtido por fontes acústicas sem restri o ambientais e com pouquíssimos ou nenhum dano ao ambiente, utilizando-se embarca o de pequeno

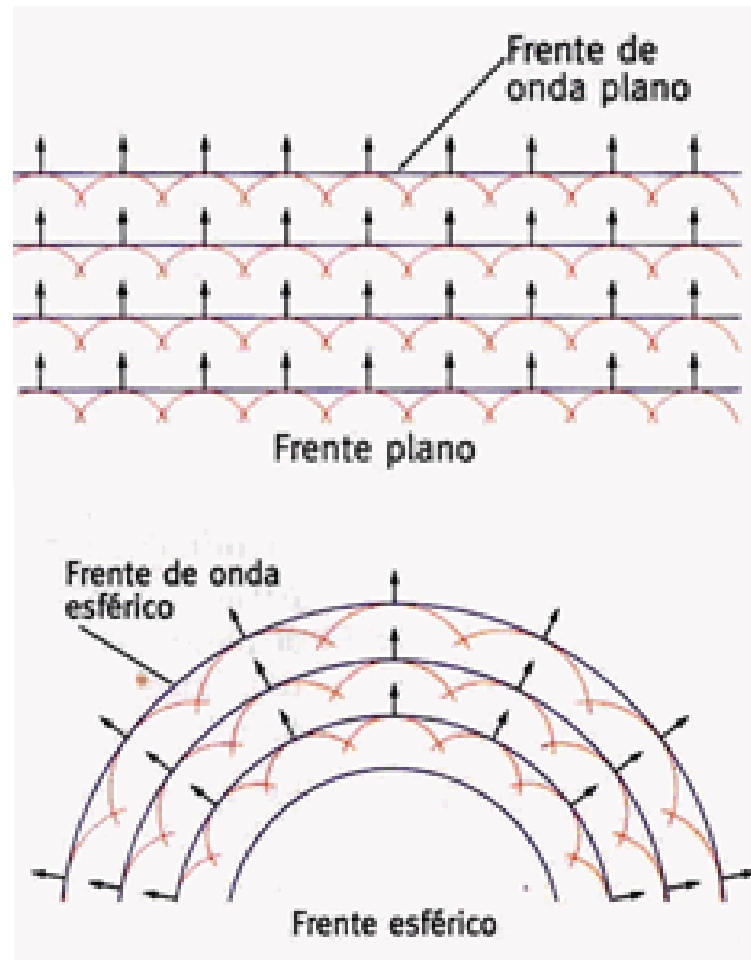
e médio porte. Quase sempre o dado pode ser visualizado e interpretado em tempo real sem a necessidade de complexos processamentos, possibilitando que decisões sejam tomadas durante a própria aquisição de dados. (Sousa 2006)

- Propagação das ondas acústicas.

A onda acústica ou sonora é uma forma de energia mecânica, que se propaga pelo movimento de partículas em um meio elástico, sem transportar matéria, apenas energia cinética e potencial. As ondas sísmicas também são chamadas de ondas elásticas ou mecânicas.

O vetor normal à frente de onda é a direção de propagação, a qual ocorre de forma esférica, ou seja, tridimensional, composta por frentes de onda (esferas de energia que a partir da fonte expandem-se ao longo do tempo), raios (linhas perpendiculares às frentes de ondas), e de regiões de compressão e rarefação (cujo grau é a pressão), na medida em que oscila em direção a suas posições extremas (Figura 3). As partículas comprimidas agem sucessivamente sobre as camadas adjacentes propagando esse efeito distanciando a frente de onda da fonte de perturbação. Segundo o Princípio de Huygens cada ponto localizado na frente de onda se comporta como uma nova fonte pontual de emissão de novas ondas esféricas, que ao se somarem formarão uma nova frente de onda e assim consecutivamente (Gadallah, 1994).

Figura 2: Princípio de Huygens, onde cada ponto localizado na frente de onda se comporta como uma nova fonte pontual de emissão de novas ondas esféricas. Se a fonte for plana teremos frentes de onda se propagando de forma plana, e caso a fonte seja pontual as frentes de onda formarão uma esfera.

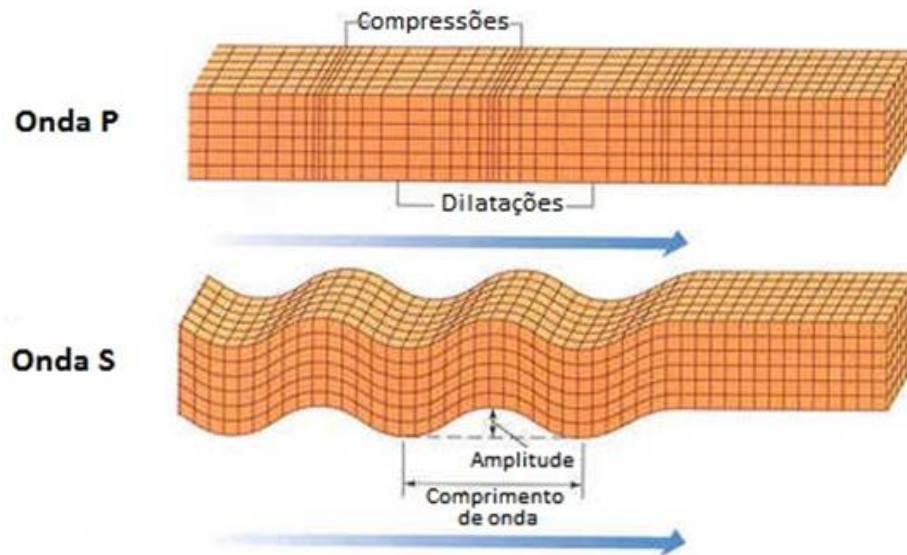


Fonte: Casanova B(2012).

- Tipos de ondas mais importantes

Na sismica de reflexão as ondas de corpo ou de volume (ondas P e S – Figura 4) são particularmente importantes. Elas se propagam através do interior dos meios com percursos radiais deformados devido às variações de densidade e composição dos materiais.

Figura 3: Comportamentos vibratórios das ondas de corpo ou de volume, onde as ondas P, que tem um comportamento vibratório compressional, vibram no mesmo sentido do seu deslocamento. Enquanto que as ondas S, que tem um comportamento vibratório cisalhante, tem um comportamento vibratório perpendicular ao seu deslocamento



Fonte: *Michigan Technological University*

A onda mais rápida, e portanto a primeira a ser detectada, é chamada de onda P, também conhecida como onda Primária, é uma onda de compressão, isto é, trata-se de uma onda que comprime e expande, de modo alternado, o material, que no nosso caso é o ambiente estudado, na mesma direção em que viaja. A onda P move-se através de rocha sólida ou fluida, como água ou lava.

A onda S é mais lenta, é registrada pelos sismógrafos após o registro da onda P, movimentando o solo para cima e para baixo, ou de um lado para o outro perpendicularmente à direção do movimento da onda. A onda S é também conhecida como onda secundária e se move somente através de sólidos.

Em registros sísmicos, as ondas P são de fundamental importância para se observar mudanças nas velocidades das ondas mecânicas nos meios, sendo aplicável os preceitos da Lei de *Snell*.

As ondas P impõem aos corpos sólidos elásticos alterações de volume sem alterar a forma. Não possuem tanto poder destrutivo quanto a onda S ou as ondas de superfície que lhes seguem. As ondas S causam polarização e alteram a morfologia sem alterar o volume com amplitude várias vezes maior que a das ondas P.

Existem, também, as ondas de superfície ou de interface que são ondas sísmicas que se propagam imediatamente abaixo da superfície do meio, ou seja, paralelamente à superfície do terreno, sem transmitir energia para o seu interior e a sua amplitude decresce exponencialmente com a profundidade, limitando-se a propagação energética a uma camada superficial equivalente a cerca de um comprimento de onda.

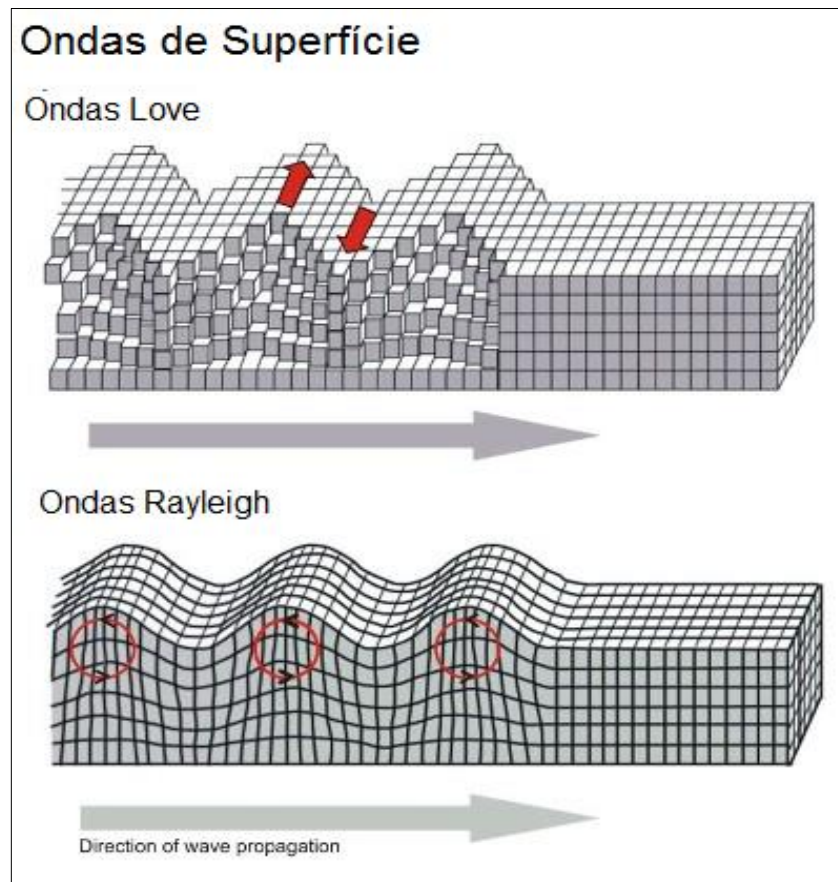
Propagam-se pela superfície a partir da fonte com velocidades mais baixas que as ondas de corpo, possuem baixa frequência, longa duração e grande amplitude.

Existem dois tipos de ondas de superfície: ondas *de Rayleigh* e ondas *Love*, Figura 5 (*Sheriff e Geldart, 1995*).

As ondas *de Rayleigh* (R), tal como as ondas S são transversais, porém mais lentas que as ondas de corpo. Resultam da interferência de ondas P e S provocando vibração no sentido contrário à propagação da onda, ou seja, um movimento de rolamento (descrevem uma órbita elíptica), e a sua amplitude diminui rapidamente com a profundidade.

As ondas *Love* (L) produzem cisalhamento horizontal e a sua energia é confinada nas camadas superiores do meio por ocorrer reflexão interna total. São ligeiramente mais rápidas que as ondas *de Rayleigh*. Essas ondas são o resultado da interferência de duas ondas S. Os ensaios sísmicos, que se baseiam na propagação das ondas superficiais, têm sido muito utilizados na caracterização geotécnica da dinâmica de solos (Figura 5).

Figura 4: Ondas Love e Rayleigh são exemplo de ondas de superfície.



Fonte: USP, Instituto de astronomia, geofísica e ciências atmosféricas (2014).

É importante ressaltar que o meio onde as ondas se propagam pode ser homogêneo, quando a velocidade de propagação é constante na mesma direção, ou heterogêneo, quando varia na mesma direção. Também podem ser isotrópicos, quando suas propriedades físicas são iguais em qualquer direção, ou anisotrópicos, quando suas propriedades físicas variam, podendo ser evidenciada pela variação da velocidade sísmica, na direção que são medidas (Sherrif e Geldart, 1995).

O subsolo terrestre como o meio de propagação das ondas sísmicas, a forma e o volume desse meio podem ser alterados pelo sinal acústico emitido. Segundo a teoria da elasticidade, há uma resistência a essa força externa que, ao extingui-la, promove o retorno do meio ao seu estado original.

Um meio perfeitamente elástico é aquele que retorna ao seu estado normal após sofrer uma deformação. A força aplicada pode ser definida como tensão (stress), que é a razão entre a força e a área onde está sendo aplicada a força. Caso

essa força seja perpendicular à área, dá-se o nome de tensão normal, ou de pressão.

Se a força for tangencial à área, nomeia-se de tensão de cisalhamento. Num gás ou líquido (meio fluido), somente ondas longitudinais podem ser transmitidas. Para ondas transversais o meio deve se comportar de maneira elástica, quando sofrer tensões de cisalhamento, surge assim uma força restauradora.

Quando o equilíbrio estático é rompido ocorre a propagação da tensão e da deformação sobre forma de ondas elásticas. Num meio elástico a velocidade de propagação da onda é influenciada pela porosidade, composição mineral, conteúdo de fluidos, densidade, pressão e temperatura, ou seja, a propagação da onda é função da elasticidade do meio. A velocidade das ondas sísmicas (P e S) pode ser calculada a partir das seguintes equações (Schön, 1996):

$$V_P = \sqrt{\frac{k + 4\mu/3}{\delta}} \quad \text{e} \quad V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Equação1: velocidade de propagação da onda P (VP)

Equação2: velocidade de propagação da onda S (VS)

Onde: V_p : Velocidade das Ondas P; V_s : Velocidade das Ondas S; K: Módulo de compressibilidade; μ : Rigidez do meio (para líquidos, $\mu = 0$) (propriedade elástica); δ e ρ : Densidades do meio atravessado (propriedade inercial).

A velocidade de uma onda mecânica, longitudinal ou transversal, depende das propriedades inerciais e elásticas do meio. A velocidade do som varia ao atravessar diferentes meios, por exemplo, em valores aproximados no ar é de 340 m/s e na água é de 1500 m/s e em metais de 5060 m/s. Logo, a principal informação que o método sísmico interpreta, para sondar estratos, é a variação dos tempos de retorno do sinal acústico (Gomes, 2009).

O sinal emitido por uma fonte acústica viaja através do meio, segundo o Princípio de Fermat no percurso de tempo mínimo, e ao atingir uma interface entre

dois meios de diferentes propriedades físicas, alguns fenômenos podem ocorrer: reflexão, refração, absorção, espalhamento, etc.

Os fenômenos de reflexão e refração são descritos pela lei de *Snell*, que relaciona as propriedades de dois meios e o ângulo de incidência. Uma onda P incidente quando encontra uma interface divide-se em duas componentes: uma onda refletida com velocidade V_1 no mesmo ângulo θ_1 da onda incidente e uma onda refratada, com velocidade modificada $V_1 \neq V_2$, e ângulo θ_2 que obedece a relação:

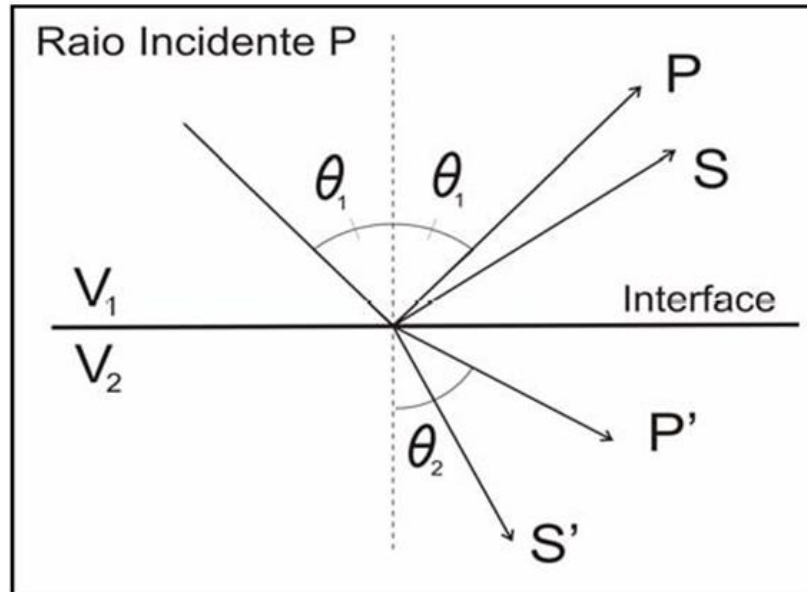
Equação3: Lei de *Snell*

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Sendo $V_2 < V_1$, então $\theta_2 < \theta_1$. Quando $V_2 > V_1$, θ_2 será 90° quando $\theta_1 = \text{sen}^{-1}(V_1 / V_2)$. Nessa condição, a onda refratada irá se propagar ao longo da interface. O ângulo incidente $\theta_1 = 90^\circ$ é chamado de ângulo crítico (θ_C).

A Lei de *Snell* é geralmente verdadeira somente para meios isotrópicos (como o vidro). Em meios anisotrópicos como alguns cristais, a birrefringência pode dividir o raio refratado e refletido em dois raios (uma transversal S e uma longitudinal P) e duas transmitidas (S' e P').

Figura 5: Demonstração da Lei de Snell para uma onda P incidente numa interface anisotrópica, de onde surgem dois novos raios S' e P'.



Fonte: Gomes, 2009.

As propriedades dos materiais analisados e o ângulo de chegada da onda determinam a quantidade de energia que será refletida pela superfície, refratada pelo material adjacente, transformada em calor ou convertida em outros tipos de ondas. O registro sísmico é gerado a partir do tempo de percurso das ondas sísmicas geradas artificialmente na superfície e refletidas nas interfaces físicas das camadas, compreendendo o tempo de percurso da onda entre a fonte e o receptor.

Com o perfilador X-Star, equipamento utilizado na aquisição de dados desse trabalho, a distância fonte-receptor é mínima, então se registra o tempo duplo da incidência normal. O fenômeno de maior interesse a se observar é a reflexão, a qual só ocorre quando existem contrastes representativos de impedância acústica nas interfaces entre os meios.

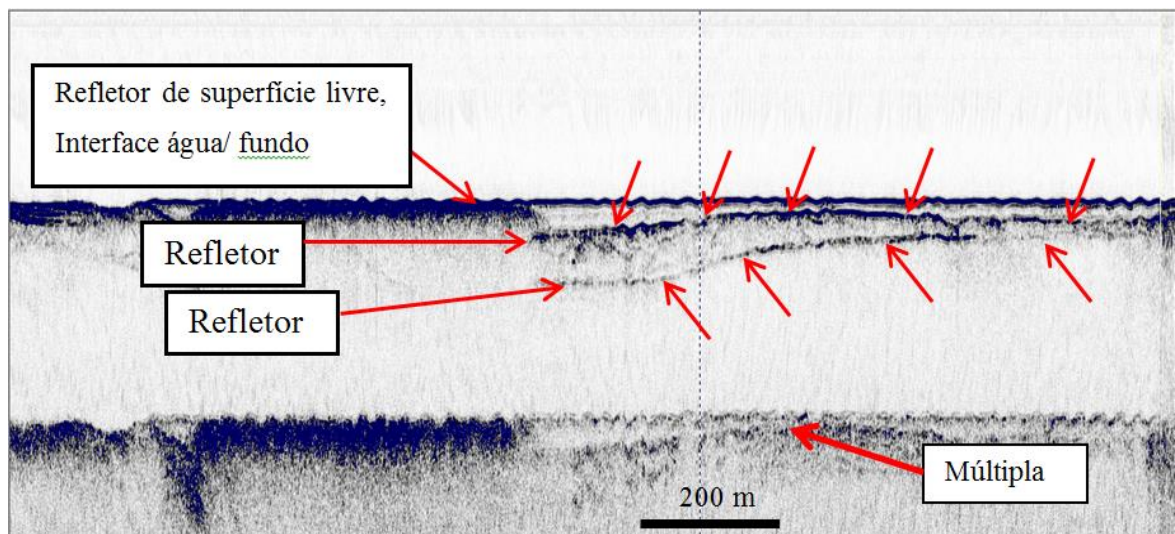
Quanto maior o contraste de impedância acústica maior a proporção de energia refletida e melhor demarcação do fenômeno de reflexão das ondas nas interfaces entre meios com variação de densidade e velocidade de propagação, caso não haja contraste de impedância toda a energia será transmitida.

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. E a energia da onda sísmica ao encontrar uma

interface tem sua energia dividida, sendo parte refletida e refratada; o pulso que é refletido é captado e formará a imagem da sessão.

Porém, a energia ao ser captada não desaparece, voltando para as camadas inferiores, encontrando novamente a interface que a refletiu anteriormente e estimulando uma nova leitura nos receptores gerando um sinal falso, e a esse novo sinal falso é dado o nome de múltipla, identificado na figura a seguir.

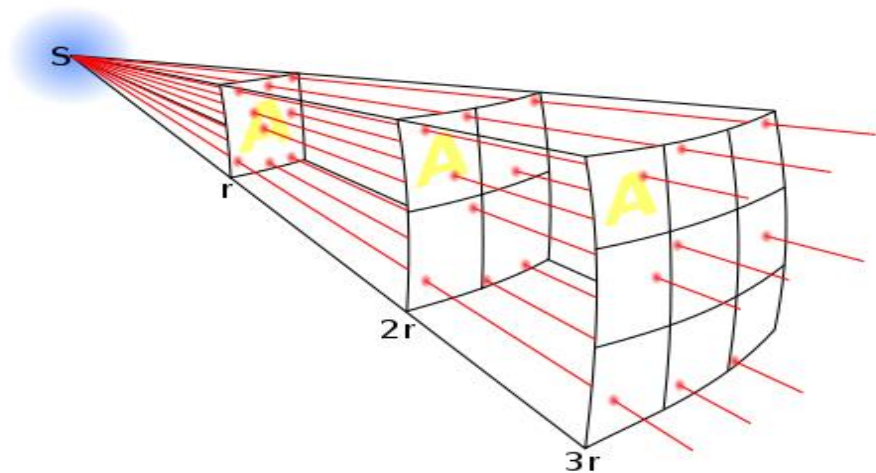
Figura 6: Seção sísmica da baía do Marajó próximo a cidade de Ponta de Pedras, com o perfilador que é objeto de estudo deste trabalho



Fonte: Imagem do acervo do autor.

A propagação da onda pode ser atenuada por dispersão e por 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 (Figura 8).

Figura 7: Imagem que mostra a divergência esférica e a dispersão de energia com a distância.



Fonte: homestudioblog (2014).

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.

Ao se considerar o subsolo com um meio elástico imperfeito, as perdas também são causadas pela absorção de potência nas partículas do meio. A energia absorvida é dissipada na forma de calor devido ao comportamento inelástico irreversível do meio.

Esse meio funciona como um filtro variável sobre a fonte sísmica, absorvendo seletivamente as frequências mais altas antes das frequências mais baixas. Quanto menor a frequência, menor a absorção, assim o equipamento terá maior penetração, ou seja, operando em baixa frequência se obtém maior alcance em profundidade.

A sísmica de alta resolução ou sísmica rasa consiste de métodos que utilizam altas frequências, com isso temos baixa penetração, porém com maior detalhe.

Também pode ocorrer a difração na chegada da onda numa interface ou obstáculo, como por exemplo, um leito rugoso ou vegetação. Quando uma onda

atinge uma feição com raio menor que seu comprimento, essa superfície irregular se comportará como um ponto, propagando a onda em várias direções.

Ao sofrer a difração, as ondas resultantes terão a mesma velocidade de propagação e a amplitude da onda difratada diminui rapidamente com a distância do ponto de difração.

O resultado da atenuação do pulso sísmico é observado no sismograma ou seção sísmica, que é o emparelhamento de traços sísmicos lado a lado. 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 (Figura 9).

Para melhor caracterização de padrões entre refletores, convencionou-se que os picos à direita sejam preenchidos com uma cor determinada pelo usuário, como pode ser visto na figura abaixo.

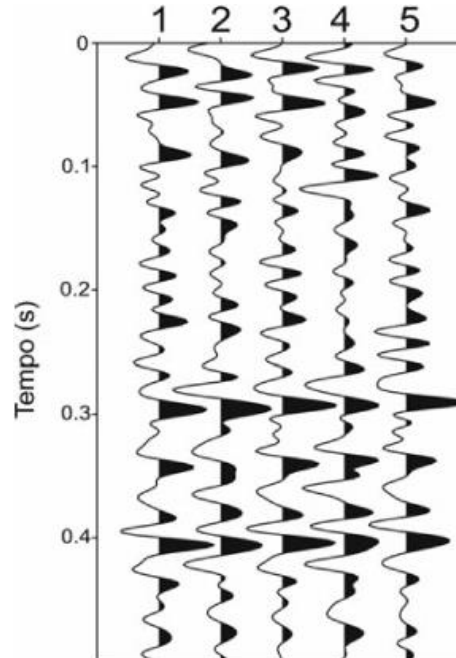


Figura 8: Representação do traço sísmico, Fonte: Porsani et all 2010.

Adicionados aos sinais nos traços sísmicos se encontram os ruídos (registro indesejável). Os ruídos podem ser coerentes ou aleatórios (critério de coerência), e relacionados ou não ao levantamento (Ylmaz, 1987). Especificamente para transdutores subaquáticos têm-se ruídos produzidos por fontes ambientais ou

instrumentais como a chuva, motor do barco, bolhas dos flutuadores do equipamento, etc. Também pode ocorrer a distorções no sinal devido a características do meio e da onda.

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):

Equação 4: razão sinal/ruído

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

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.

3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA E ACESSOS

A área localizada na região norte do estado do Pará, entre os paralelos 1° S e 2° S e os meridianos 50.5° e 48.25°, sendo realizada a pesquisa nas áreas submersas que limitam a Ilha do Marajó em sua parte leste e sudeste, compreendendo a Baía do Marajó, foz do Rio Tocantins e o Rio Pará.

Como a coleta dos dados são em regiões submersas, os acessos são de barco.

Figura 90: localização da área de estudo identificada por coordenadas geográficas em UTM (Universal transversa de Mercator). As áreas demarcadas em vermelho, da esquerda para a direita, são respectivamente rio Pará, foz do rio Tocantins e baía do Marajó.



Fonte: boletim de Geociências da Petrobras, v. 15

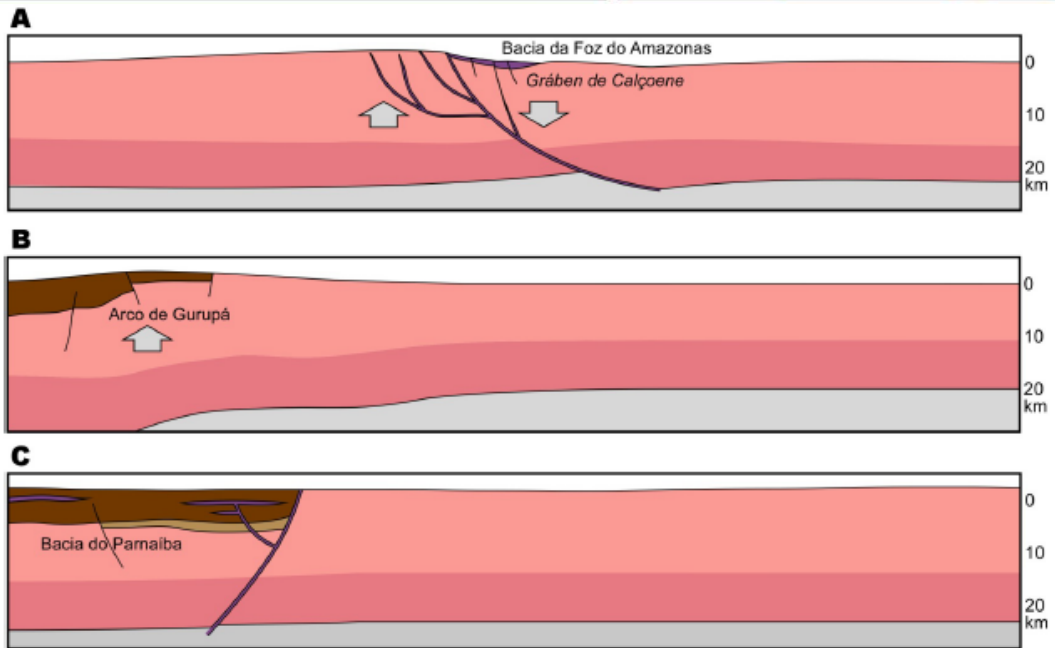
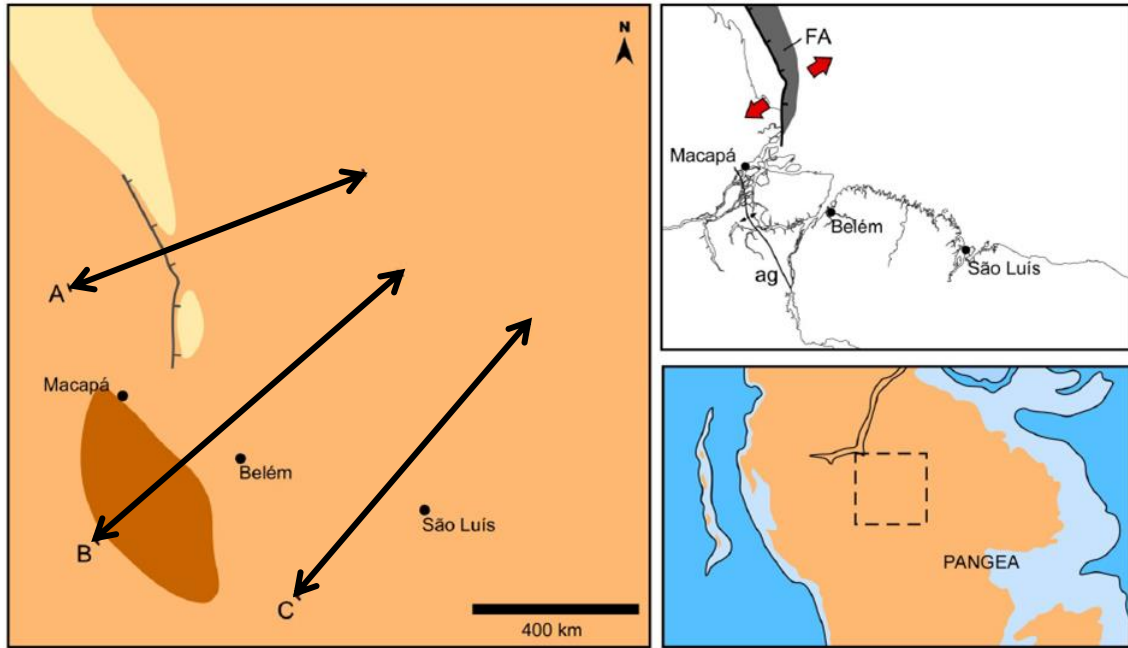
4 EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA REGIÃO

Na região central do Pangea, no início do Mesotriássico, um rifte de aproximadamente 5.000 km de extensão começou a se individualizar, progredindo lentamente durante 30 Ma, até o limite Triássico- Jurássico, quando um vasto evento vulcânico incidiu no entorno da zona de rifteamento. Em seguida, começou a separação dos grandes continentes Laurásia e Gondwana juntamente com a expansão do assoalho oceânico formando o Oceano Atlântico Central que se estendia desde o Golfo do México até o leste dos EUA (McHone, 2006).

O rifteamento avançou para oeste, na direção do Caribe e propiciou a separação entre a América do Norte e América do Sul e deixando a região como um braço abortado de uma junção tríplice.

A placa Sul-Americana em torno de 200 Ma, no auge do evento magmático, presenciou a primeira manifestação de fragmentação na região, responsável pelo início de formação da Bacia da Foz do Amazonas. Este evento está materializado pelo Gráben de Calçoene. Este gráben abriga rochas vulcânicas e vulcano-sedimentares (Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15).

As rochas vulcânicas foram datadas como do início do Neotriássico, porém a idade máxima para estas rochas é de 201 Ma, no limite entre o Triássico e o Jurássico (Brandão e Feijó, 1994a; CPRM 2002). O gráben é formado por falhas normais de direção NNW-SSE, com mergulho para ENE e corresponde a uma estrutura distensiva extensa e estreita que alcançou o norte do Estado do Amapá, Figura 10.



Legenda (mapas)

- Cidades
- ▭ Área estudada
- ↘ Falha normal
- ↘ Arco estrutural
- ↘ Rifte ativo
- ↔ Direção da distensão
- Orange box Paleo relevo
- Blue box Paleo batimetria

Legenda (seções)

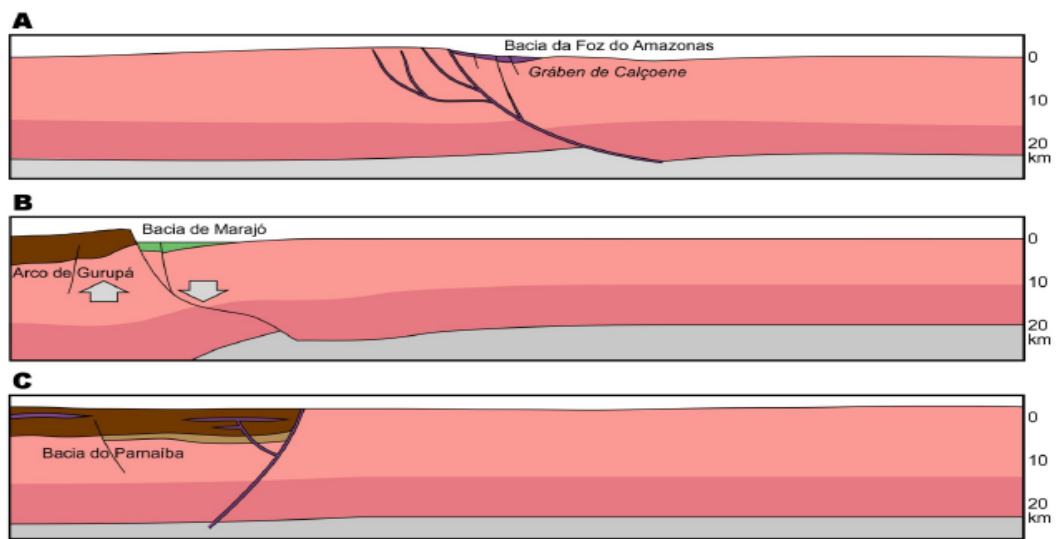
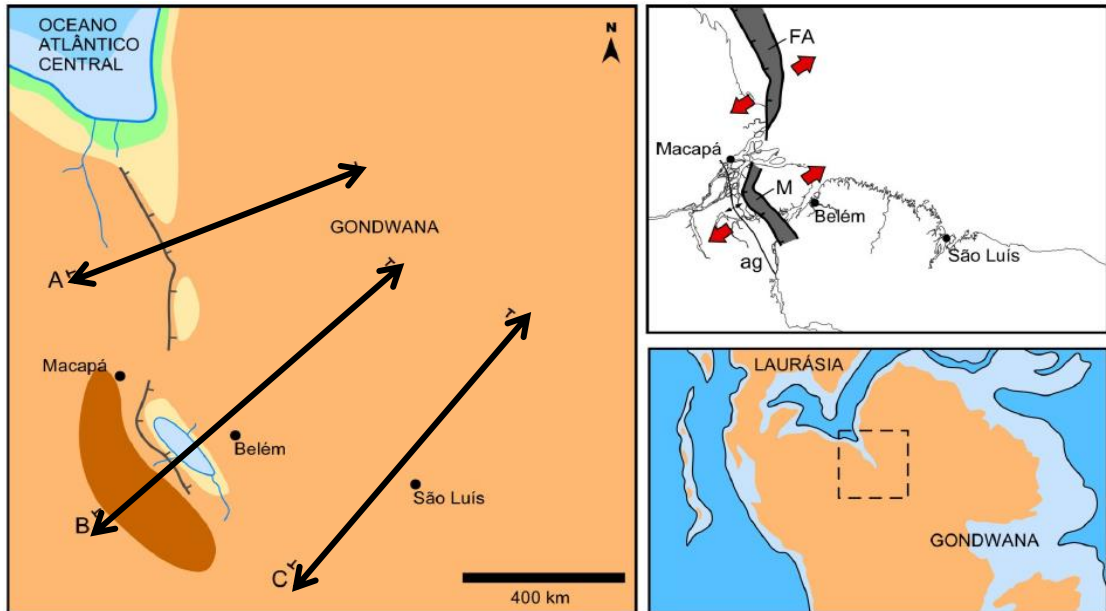
- Dark purple box Neotriássico
- Light purple box Diques/Sills
- Upward arrow Soerguimento
- Downward arrow Subsidência
- Green box Paleozóico
- Brown box Neoproterozóico (?)
- Light red box Crosta Superior
- Dark red box Crosta Inferior
- Grey box Astenosfera

Fonte: ZALÁN, P.V. e MATSUDA, N.S. Bacia do Marajó. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15.

O Cretáceo foi o período em que houve o maior número de modificações na paisagem da região, com a formação de várias bacias, e culminando com a separação da América do Sul e África.

Na região da Ilha de Marajó, no Eocretáceo, passou a dominar um regime distensivo de baixa intensidade (Costa et al., 2002), que resultou na formação da Bacia de Marajó, com falhas normais sintéticas, de direções NW-SE e NNW-SSE, inclinadas para NE, que controlaram a formação das sub-bacias de Cametá e Mexiana, e o desenvolvimento do Arco de Gurupá; este funcionou como a ombreira principal e provavelmente forneceu grande parte dos sedimentos que preencheram os depocentros da bacia (Figura 11).

Figura 11: Regime distensivo de baixa intensidade que resultou na formação da Bacia de Marajó, com falhas normais sintéticas, de direções NW-SE e NNW-SSE, inclinadas para NE, M – Bacia de Marajó; ag – Arco de Gurupá.



Legenda (mapas)

- Cidades
- ▭ Área estudada
- ↘ Falha normal
- ↘ Arco estrutural
- ↘ Rifte ativo
- ↔ Direção da distensão
- Borda marinha
- Lagos
- ↘ Drenagem
- Paleo relevo
- Paleo batimetria

Legenda (seções)

- Eocretáceo
- ▨ Diques/Sills
- ↑ Soerguimento
- ↓ Subsidência
- Neotriássico
- Paleozóico
- Neoproterozóico (?)
- Crosta Superior
- Crosta Inferior
- Astenosfera

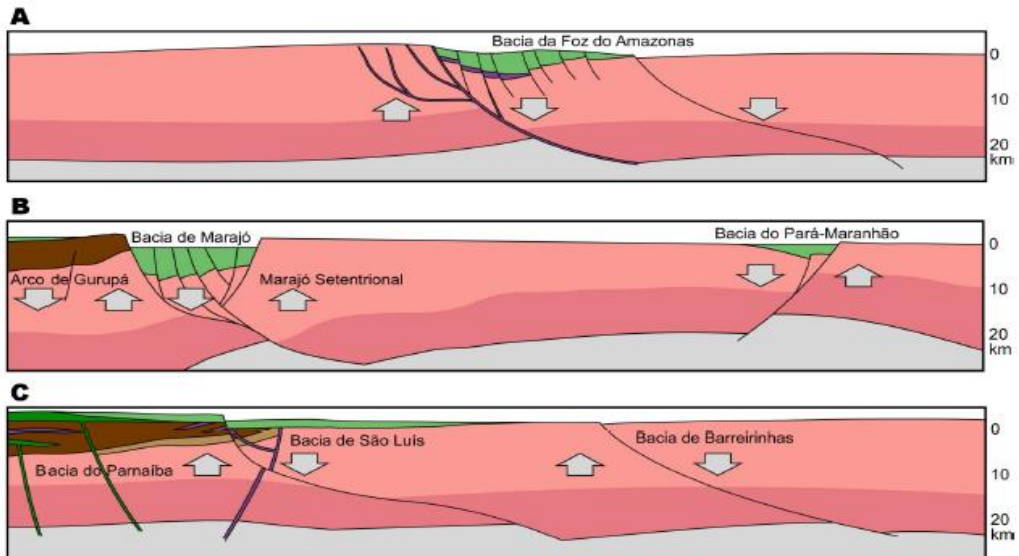
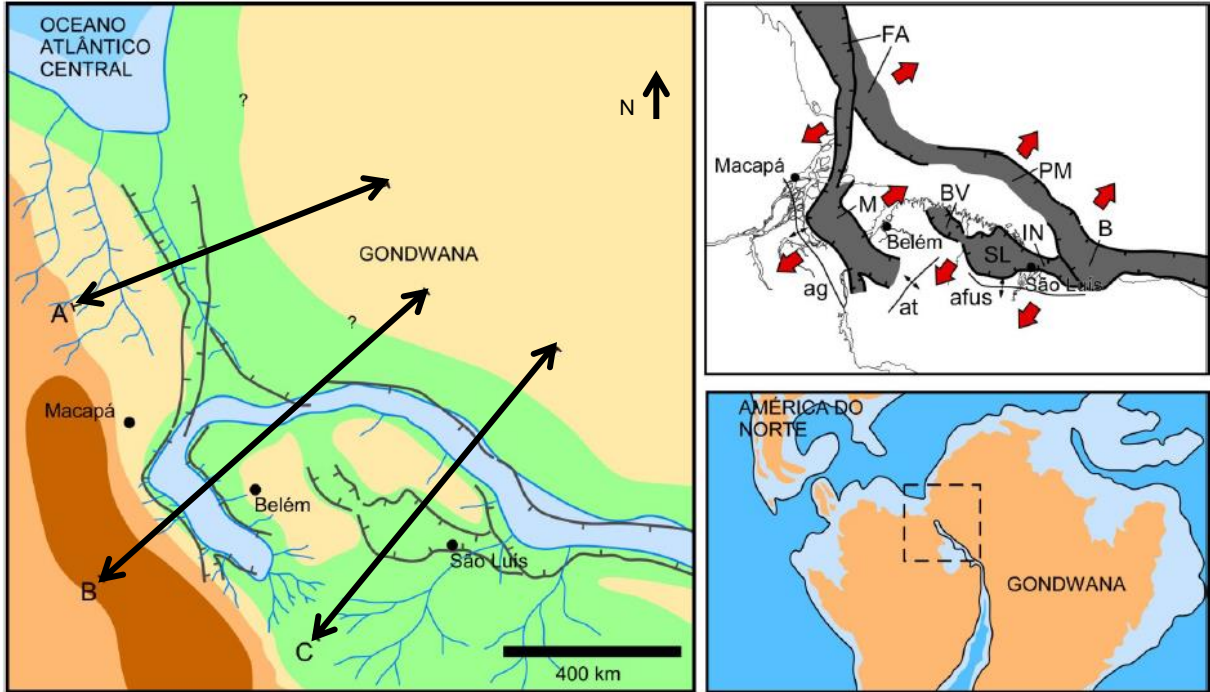
Fonte: ZALÁN, P.V. e MATSUDA, N.S. Bacia do Marajó. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15.

O Arco de Gurupá, formou-se devido a desnivelamentos impostos pelas principais falhas normais lístricas que originaram a Bacia de Marajó, através de soerguimento por alívio de carga e por rotações de blocos falhados nas adjacências do arco (Costa et al., 2002). Pode ser visualizado na Figura 10, seção B.

Os principais sistemas fluviais provavelmente originaram-se na área do Arco de Gurupá, e devem ter sido controlados pelas falhas transcorrentes de direção NE-SW e fluíram em direção à Bacia de Marajó, ao Proto-Atlântico Central e à Bacia do Amazonas (Zalán e Matsuda, 2007).

No Aptiano (Figura 12), a borda flexural da Bacia de Marajó começou a se individualizar a partir da instalação de falhas antitéticas, estabelecidas pela contínua ampliação da bacia. Essas falhas definiram principalmente sistemas lístricos e planares, inclinados para oeste na sub-bacia de Limoeiro, com pequenos rejeitos e posturas subhorizontais, em profundidades rasas.

Figura 12: Mapa paleogeográfico do Eocretáceo (início do Albiano). FA – Bacia da Foz do Amazonas; M – Bacia de Marajó; B – Bacia de Barreirinhas; BV – Bacia de Bragança – Viseu; SL – Bacia de São Luís; IN – Bacia de Ilha Nova; PM – Bacia do Pará – Maranhão; ag – Arco de Gurupá; afus – Arco Ferrer – Urbano Santos; at – Arco do Tocantins.



Legenda (mapas)

- Cidades
- Área estudada
- ↘ Falha normal
- ✱ Arco estrutural
- ⬇ Rifte ativo
- ↔ Direção da distensão
- ☁ Borda marinha
- ☁ Lagos
- ☁ Drenagem
- 🟡 Paleorelevo
- 🟢 Paleobatimetria

Legenda (seções)

- 🟢 Eocretáceo
- 🟡 Diques/Sills
- ⬆ Soergimento
- ⬇ Subsidência
- 🟣 Neotriássico
- 🟤 Paleozóico
- 🟢 Neoproterozóico (?)
- 🟡 Crosta Superior
- 🟢 Crosta Inferior
- 🟡 Astenosfera

Nessa fase, essa região, chamada aqui de Marajó Setentrional, começou a funcionar também como área fonte de sedimentos.

No mesmo estágio, um sistema fluvial bem desenvolvido se instalou na Bacia de Marajó, com grandes e efêmeros lagos, que alcançavam a porção noroeste das sub-bacias de Cametá e Mocajuba.

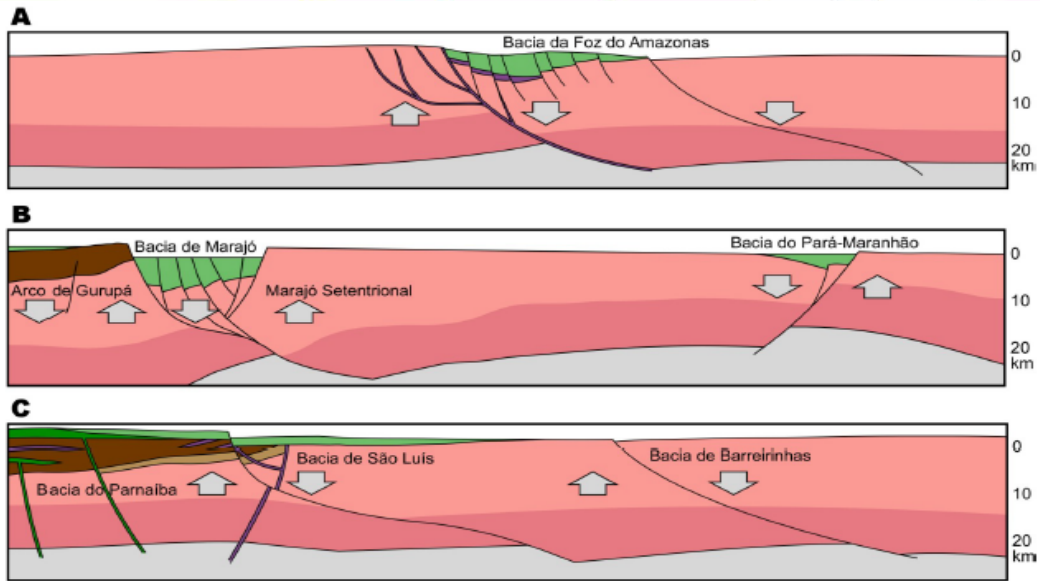
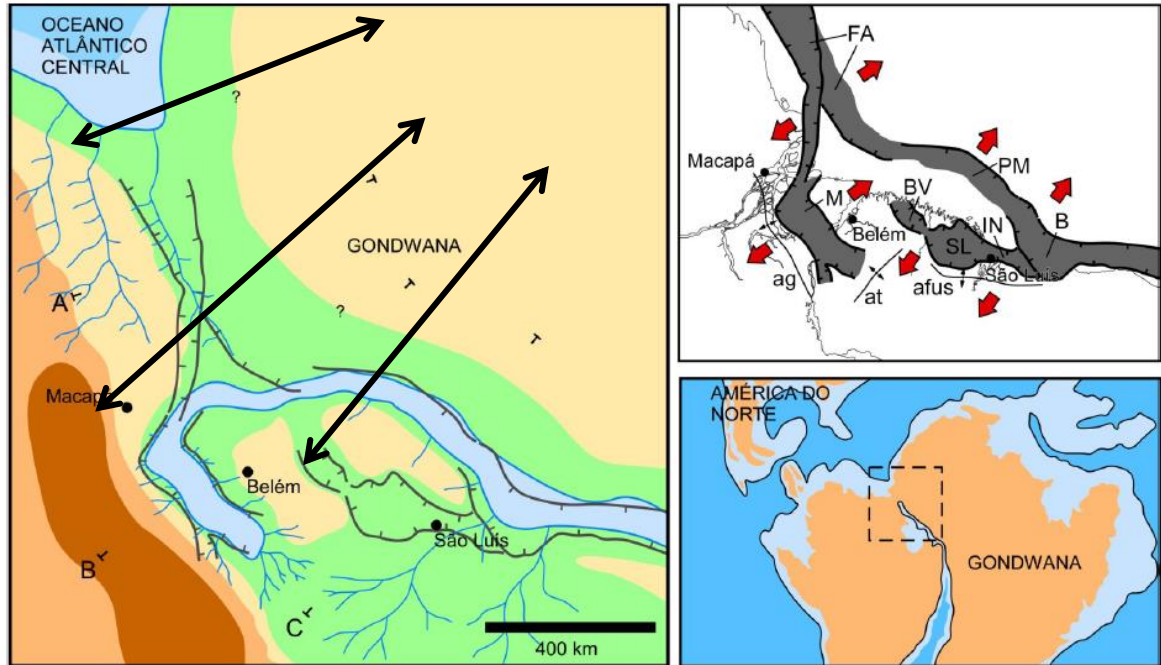
A paisagem montanhosa deveria predominar nas áreas adjacentes aos depocentros, considerando-se a grande espessura dos pacotes sedimentares depositados na Bacia de Marajó e na Bacia da Foz do Amazonas, e os rejeitos da ordem de vários quilômetros associados às falhas normais.

Enquanto a Bacia de Marajó ampliava, novos eventos de soerguimento e rifteamento iniciaram no interior da América do Sul. A leste da Bacia de Marajó iniciou a individualização do Arco Ferrer-Urbano Santos e Arco de Tocantins.

No início do Aptiano, iniciou o desenvolvimento do Sistema de Grábens Gurupi nas áreas das bacias de Bragança-Viseu e Ilha Nova, resultando na formação de pequenos grábens, onde foram depositados os sedimentos da Formação Bragança. Nesse período, a Bacia de São Luís ainda não havia sido formada (Figura 13).

Já no Albiano que é o estágio mais importante da evolução do Gondwana, foi marcado pela formação da frente extensional que originou as bacias do Pará-Maranhão e Barreirinhas, geração de novo sistema de falhas na Bacia da Foz do Amazonas e pela última expressão de fragmentação e separação dos continentes Sul-Americano e Africano. (Zalán e Matsuda,2007).

Figura 13: Mapa paleogeográfico do Eocretáceo (início do Albiano). FA – Bacia da Foz do Amazonas; M – Bacia de Marajó; B – Bacia de Barreirinhas; BV – Bacia de Bragança – Viseu; SL – Bacia de São Luís; IN – Bacia de Ilha Nova; PM – Bacia do Pará – Maranhão; ag – Arco de Gurupá; afus – Arco Ferrer – Urbano Santos; at – Arco do Tocantins.



Legenda (mapas)

- Cidades
- ⊠ Arco estrutural
- ⊠ Borda marinha
- ⊠ Paleozóico
- ⊠ Paleotermimetria
- ⊠ Área estudada
- ⊠ Rifte ativo
- ⊠ Lagos
- ⊠ Neoproterozóico (?)
- ⊠ Falha normal
- ⊠ Direção da distensão
- ⊠ Drenagem

Legenda (seções)

- ⊠ Eocretáceo
- ⊠ Neotriássico
- ⊠ Crosta Superior
- ⊠ Astenosfera
- ⊠ Diques/Sills
- ⊠ Paleozóico
- ⊠ Crosta Inferior
- ⊠ Soerguimento
- ⊠ Neoproterozóico (?)
- ⊠ Subsidência

Fonte: ZALÁN, P.V. e MATSUDA, N.S. Bacia do Marajó. Boletim de Geociências da Petrobras, v15.

No Neocretáceo diminuiu a intensidade dos movimentos extensionais na Bacia de Marajó, resultando em baixa taxa de subsidência na sub-bacia de Limoeiro.

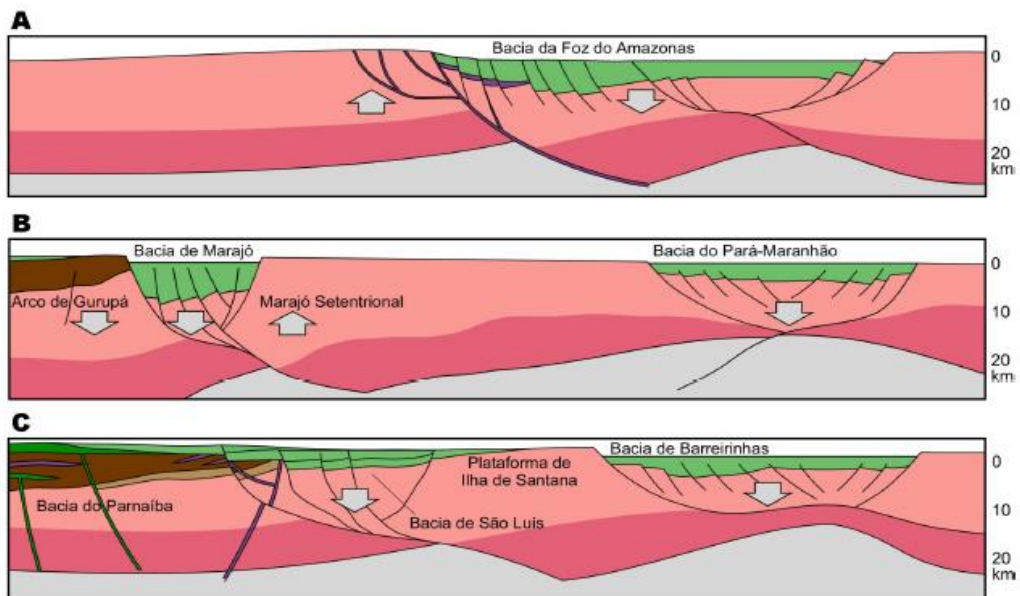
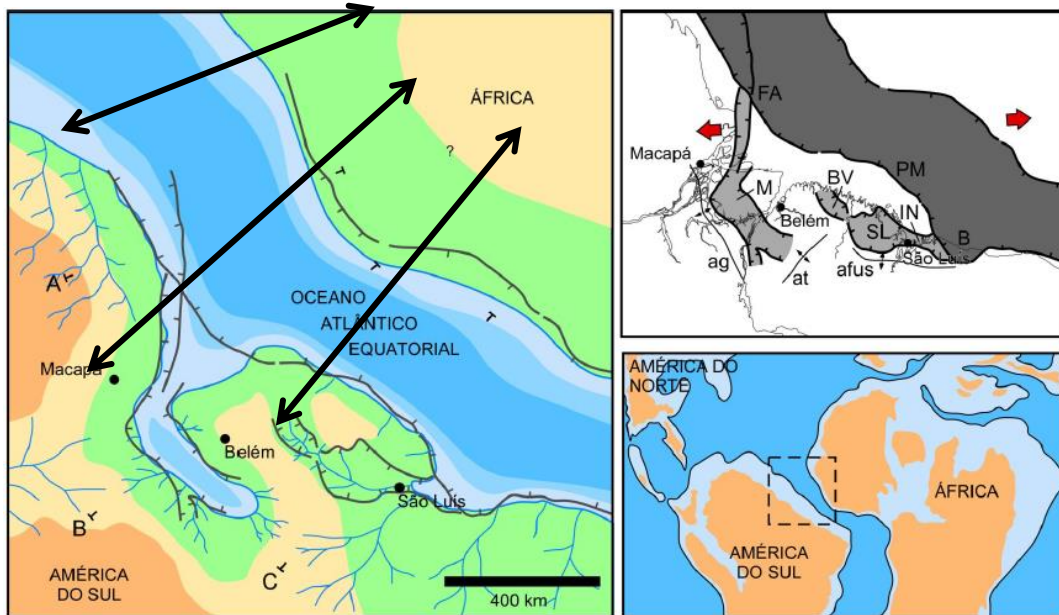
Ainda, com a diminuição da magnitude dos movimentos extensionais na Bacia de Marajó, cessaram os deslocamentos nas falhas normais (sintéticas e antitéticas) e a intensificação do jogo de blocos ou compartimentos ao longo de transcorrências NE-SW (lineamentos Arari, Limoeiro, Tocantins e Carapajó), que tiveram papel importante na região do Marajó Setentrional, com possíveis rearranjos de sistemas de drenagem e articulação interna de blocos. (Costa et al 2002)

Nessa fase, o limite noroeste do Marajó Setentrional começou a se destacar na paisagem, em decorrência do desenvolvimento da sub-bacia de Mexiana, através de movimentos direcionais dextrais ao longo do Lineamento Arari.

Os sistemas fluviais fluíam não apenas do Marajó Setentrional, do Arco de Tocantins e do Arco de Gurupá, mas também das sub-bacias de Cametá e Mocajuba em direção às sub-bacias de Limoeiro e Mexiana (Costa et al 2002).

Nesse período, o Marajó Setentrional ainda experimentava erosão, mas com diminuição das taxas de soerguimento. O rearranjo estrutural da Sub-bacia de Mexiana proporcionou a invasão marinha em toda a Bacia de Marajó, depositando os sedimentos da Formação Limoeiro (Figura 14).

Figura 14: Mapa paleogeográfico do Neocretáceo. FA – Bacia da Foz do Amazonas; M – Bacia de Marajó; B – Bacia de Barreirinhas; BV – Bacia de Bragança – Viseu; SL – Bacia de São Luís; IN – Bacia de Ilha Nova; PM – Bacia do Pará – Maranhão; ag – Arco de Gurupá; afus – Arco Ferrer – Urbano Santos; at – Arco do Tocantins.



Legenda (mapas)

- Cidades
- ⊗ Arco estrutural
- ⊖ Borda marinha
- ⊖ Lago
- ⊖ Drenagem
- ⊖ Paleorelevo
- ⊖ Paleobatimetria
- ⊖ Área estudada
- ⊖ Rifte ativo
- ⊖ Direção da distensão
- ⊖ Falha normal

Legenda (seções)

- Eocretáceo
- Neotriássico
- Crosta Superior
- Astenosfera
- Diques/Sills
- Paleozóico
- Crosta Inferior
- Soerguimento
- Neoproterozóico (?)
- Subsidência

O período foi marcado pela parada da movimentação extensional no interior do continente Sul-Americano, cessando as fases rifte nas bacias de Marajó, Grajaú e Sistema de Grábens Gurupi. Todo o esforço extensional se concentrou no Atlântico Equatorial, nas bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão e Barreirinhas, que evoluíram para margem passiva.

Apenas os efeitos de deriva foram registrados na região Meio-Norte do Brasil. Com o início da deriva continental, começou a atuação de falhas transcorrentes de direção NE-SW em todo o conjunto de riftes na região Meio-Norte do Brasil, impondo compartimentação dos depocentros.

A partir do Mioceno, com o final da interação das placas da América do Sul e África, incidiu, na região, o regime de tectônica intraplaca, marcado por sistemas transcorrentes dextrais E-W. Estes sistemas respondem pelos dois pulsos de inversão (transpressão e transtensão) da Bacia de Grajaú.

Ao mesmo tempo em que a Serra do Tiracambu estava sendo ampliada, a noroeste, estavam se formando falhas normais, de direção NWSE, na região do Arco de Gurupá, Bacia de Marajó e Marajó Setentrional, o que promoveu a ingressão do “Mar de Pirabas” na região. Estas falhas articularam-se através de falhas transcorrentes NE-SW, da Bacia de Marajó e que compartimentaram o Marajó Setentrional (Figura 15).

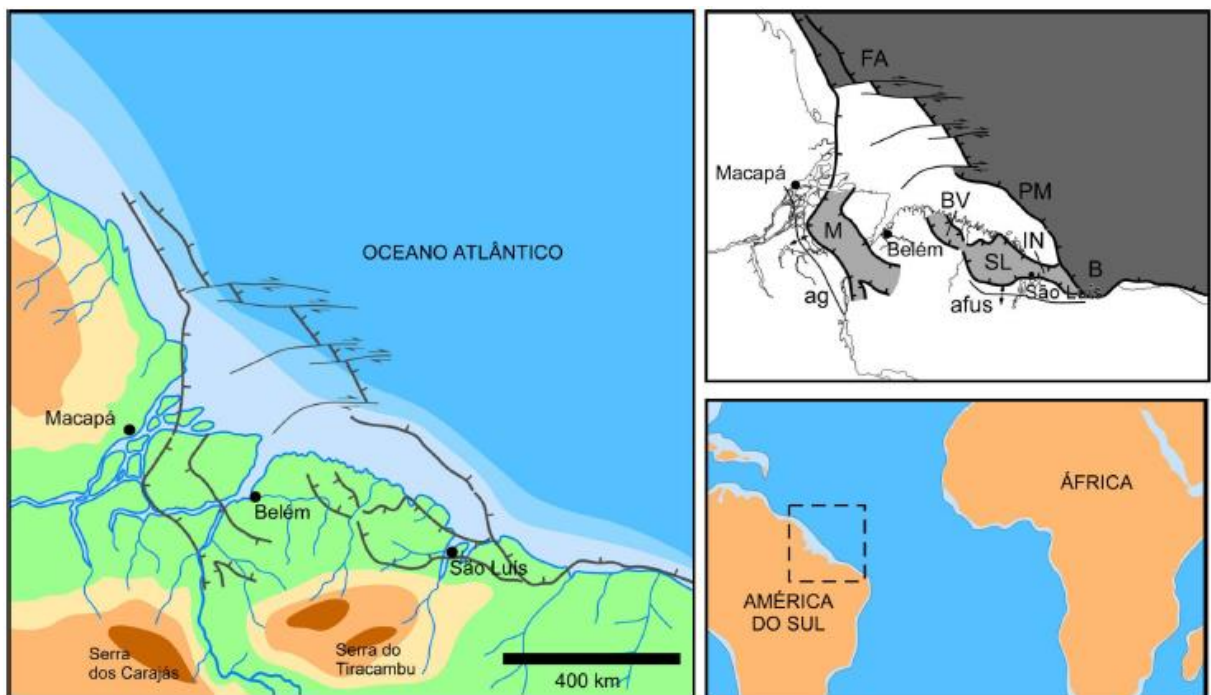
. Os principais rios da região, como Amazonas e Tocantins formaram extensos vales na plataforma continental, depositando sedimentos diretamente no talude, erodindo os sedimentos depositados no Terciário Superior na Plataforma continental.

A subida contínua do nível do mar durante o Holoceno, provocou o afogamento de parte das planícies costeiras e a modelagem de falésias em depósitos do Grupo Barreiras, que sustenta o planalto costeiro. Esse evento é marcado por lençóis de areia com fragmentos de conchas, que representam, provavelmente, o nível de mar transgressivo mais alto do Holoceno, há cerca de 5.200 anos.

Esta subida do nível do mar afogou a rede de drenagem, que foi progressivamente colmatada, evoluindo para uma sucessão de preenchimentos de

paleoestuários, além de esculpir as falésias de um metro de altura, fossilizadas no contato do planalto com a planície costeira, representativas da linha de Costa deste período. A partir deste afogamento de drenagens, ocorreu a individualização da Ilha de Marajó (Figura 9).

Figura 15: Mapa paleogeográfico do Holoceno. FA – Bacia da Foz do Amazonas; M – Bacia de Marajó; B – Bacia de Barreirinhas; BV – Bacia de Bragança – Viseu; SL – Bacia de São Luís; IN – Bacia de Ilha Nova; PM – Bacia do Pará – Maranhão; ag – Arco de Gurupá; afus – Arco Ferrer – Urbano Santos; at – Arco do Tocantins.m



Legenda

● Cidades	✂ Arco estrutural	○ Borda marinha	■ Paleorelevo	■ Paleobatimetria
□ Área estudada	▬ Rift ativo	○ Lagos		
↘ Falha normal	▬ Rift inativo	~ Drenagem		
↗ Falha transcorrente				

Fonte: ZALÁN, P.V. e MATSUDA, N.S. Bacia do Marajó. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15.

Com a formação do Rio Pará e definição dos limites sul e sudoeste da Ilha. Este representou a última modificação importante da paisagem na região.

5 METODOLOGIA

5.1 EQUIPAMENTOS

Rádios Cobra Marine MR HH 425 e GPSMAP 76CSx foram utilizados durante a navegação e aquisição dos dados para comunicação e georeferenciamento dos dados.

Os dados a serem analisados foram coletados pelo perfilador SB-512i, composto por três partes principais: a Deck Unit (Unidade de Convés); o “peixe” (parte rebocaver, SB-512i) e 75m de cabo reforçado *Kevlar*, responsável pela transferência de dados e alimentação elétrica.

O equipamento de fonte acústica tipo *chirp* e permite satisfatório do espectro de frequências e das características dos pulsos emitidos, parâmetros estes que estão diretamente relacionados com a resolução e penetração do sistema, facilidade operacional.

O perfilador SB-512i permite boa manobrabilidade devido ao pequeno porte, o baixo custo de manutenção, a alta taxa de repetitividade, alta relação sinal/ruído). (Souza, 2006).

O levantamento de sísmica rasa utilizado constitui-se em um método não-destrutivo, ou seja, as observações realizadas não causam dano ao ambiente investigado; permitem a caracterização da superfície e da subsuperfície de fundo.

Outro fator positivo é que o equipamento fica submerso em torno de 1 metro de profundidade, somado a embarcações de calado pequeno (até 3 metros), é possível coletar dados nos canais (geralmente regiões mais profundas dos rios) ou em pontos bem próximos das margens, caso seja necessário.

Os dados foram adquiridos utilizando o conjunto Perfilador, (Figura 18).

Figura 16: Sistema de perfilagem Sub-Botton 3200-XS. A esquerda, unidade de plataforma e a direita o perfilador (SB-512i).



Fonte: do autor

A unidade de plataforma, também inclui um monitor LCD, um RW / DVD, uma unidade de disquete 3.5 polegadas, um teclado e uma mouse. O Deck Unit gera um sinal piloto analógico que tem sua potência amplificada para acionar o transdutor no veículo de reboque e enviados para a água. Os retornos acústicas são recebidos pelos hidrofones no veículo de reboque e, em seguida, amplificado por um pré-amplificador que está instalado no veículo de reboque.

Os 75 Metros de cabo Kevlar são responsáveis pela transferência de dados e alimentação elétrica do perfilador).

O (SB-512i) Edge Tech é um equipamento que fornece perfis sísmicos a partir de dados acústico, utiliza a tecnologia *chirp*, que fornece perfis de alta resolução e penetração de até 100 metros abaixo do fundo do mar ou superfície do fundo do rio (Monteiro, 2010)

5.2 FUNCIONAMENTO

O perfilador produz um sinal acústico com forma conhecida, altamente repetitiva, e origina-se a partir da frequência de ressonância de pastilhas (cristais) piezelétricas.

Este sistema opera com base no princípio de que um campo elétrico aplicado sobre uma pastilha piezelétrica resulta na produção de um trabalho

mecânico proporcional à intensidade do campo elétrico aplicado. Se a frequência do campo elétrico aplicado é próxima da frequência de ressonância do material do transdutor, a energia elétrica é facilmente convertida em energia mecânica e, por conseguinte, em movimento de vibração da pastilha, que é facilmente transmitido à massa de água existente ao redor da fonte (Sousa, 2006).

Este processo é reversível, ou seja, a pressão da água sobre o transdutor gera um sinal elétrico que no receptor indica o retorno do sinal emitido.

A banda de frequência é selecionada pelo operador no Deck Unit, a informação chega no veículo rebocado, 'peixe', via cabo e por meio de uma placa piezoelétrica são convertidos de pulsos elétricos para ondas mecânicas altamente específicas e repetitivas.

Os sinais recebidos na superfície dos agregados de hidrofones, ainda no veículo de reboque, o sinal passa através de um amplificador de ganho programável controlado por *software*, antes de ser digitalizado por um (A / D) de 16-bit de analógico para digital, a uma taxa de amostragem de 20, 25, 40, ou 50 kHz o pulso FM será comprimido por meio de um filtro de compressão digital.

O pulso comprimido tem uma duração de tempo aproximadamente igual ao inverso da largura de banda do impulso de FM, que resulta em alta resolução temporal. Esta alta resolução permite a medição de camadas finas no sedimento, um fator importante na classificação de sedimentos, porque fornece uma imagem mais realista da realidade geológica do fundo do mar e uma determinação precisa dos processos deposicionais, como mostrador na imagem 17, mais a frente.

5.3 SOFTWARES

Edgetech discover 3.52 3200 SB é um software pré-instalado, utilizado na aquisição, projetado exclusivamente para os sistemas de sonar chirp Edgetech Full Spectrum. O programa, que é executado no sistema operacional Microsoft Windows XP.

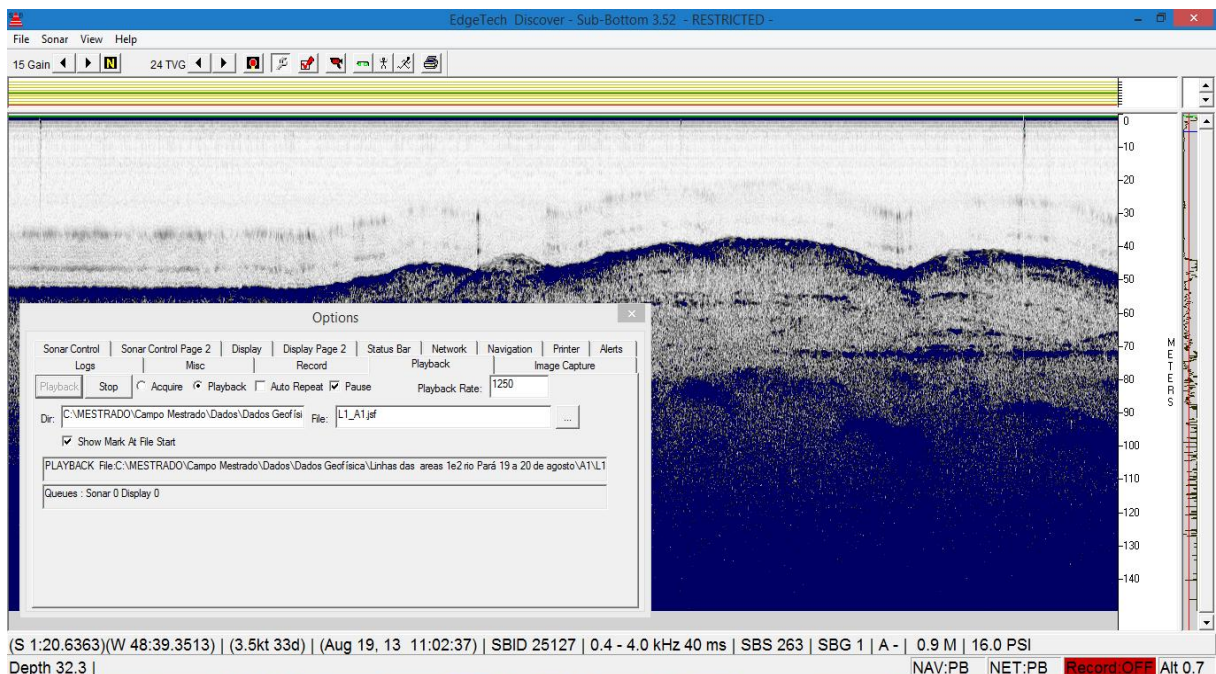
Os dados brutos, coletados com o perfilador sísmico X-Star (perfilagem contínua), foram gravados no formato JSF de aquisição da *Edgetech* (também é possível no formato SEG-Y) utilizando-se o programa de aquisição da EdgeTech.

O formato do dado consiste numa coleção de traços gravados com os seguintes componentes: 16 byte de mensagem de cabeçalho (*message header*); 240 byte cabeçalho do traço (*trace header*); e dados do traço (*Manual Edgetech*).

Este software verifica se o sistema de sonar está funcionando corretamente antes da implantação, fornecendo telas de dados, diagnósticos, gravação de dados, reprodução e saídas da impressora. O programa suporta entradas de sonar de dados e comando sonar e saídas de controle através de uma conexão TCP / IP, uma entrada NMEA navegação através de uma porta serial RS-232 e uma conexão de impressora através de uma porta paralela.

Para compatibilidade com outros produtos *Edgetech*, interfaces Discover 3200SB conta com um segundo programa de *software*, SONAR.EXE que roda em segundo plano e controla o sistema de sonar sub-fundo, executa um auto-teste na inicialização, e gera relatórios e informações de diagnóstico. Ele é iniciado automaticamente quando o processador está ligado.

Figura 17: Discover 3.52, software através do qual se pode visualizar o dado e fazer mudanças nos parâmetros utilizados no ato da aquisição.



Fonte: Programa discover.

Por meio do Discover pode-se, em tempo real, localizar geograficamente (caso um GPS esteja ligado a ele), obter a velocidade do levantamento, a banda de frequência e o intervalo entre os pulsos, saber a que profundidade o “peixe” está da

superfície, visualizar a profundidade dos horizontes sísmicos, etc. Esses são os parâmetros principais a serem analisados em campo.

Contudo o *software* possui muitas outras funcionalidades como: carregar as linhas para posterior análise; exportação de imagens; introduzir ganho na imagem para facilitar a interpretação; Converter formatos dos dados de Seg-y para JSF e vive-versa, etc.

5.4 PLANEJAMENTO PRÉ-CAMPO

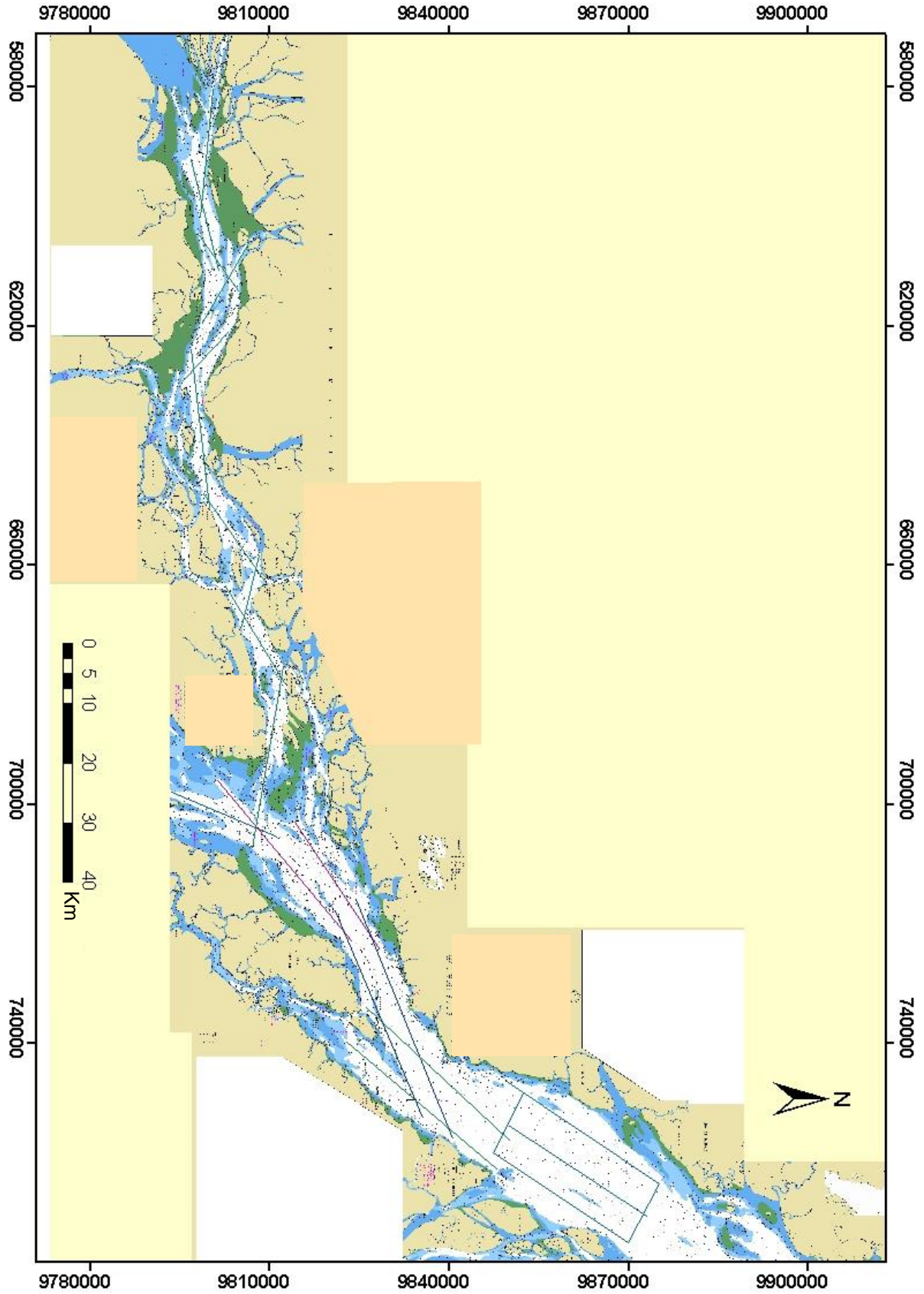
A partir do estudo prévio da região, delimitou-se a área de coleta de dados com o objetivo traçado para identificação de feições tectônicas presentes na região.

A análise das cartas náuticas 304, 305 e 306 da Marinha do Brasil, mapas geológicos da CPRM (Mapa Geológico do Estado do Pará) e mapas atuais da região contribuíram para indicação de trechos com possibilidade de identificação de estruturas tectônicas.

Os perfis sísmicos foram traçados no sentido de tentar encontrar possíveis feições tectônicas de modo perpendicular. A disposição destes perfis foram traçadas respeitando as características do rio Pará e foz do rio Tocantins, para isso, foi levado em consideração, também, parâmetros como morfologia do canal nos diferentes trechos, batimetria e maré.

No planejamento, as linhas sísmicas foram plotadas paralelas e transversalmente as margens dos rios, cortando os principais canais e distributários com o objetivo de identificar possíveis estruturas tectônicas em diferentes sentidos (Figura 18).

Figura 18: Planejamento da aquisição sísmica na área de estudo projetada no ArcGIS (ArcMap10)



Fonte: Imagem do autor em conjunto com integrantes do LIOG (Laboratório Institucional de Oceanografia Geológica), da UFPA.

Ao longo do rio Pará, dois perfis sísmicos foram distribuídos ao longo do canal principal onde a largura possui dimensões entre 10 km à 20 km e locais onde a largura do canal é inferior a 10 km foi traçado apenas um perfil sísmico geralmente transversal ao rio Pará.

De acordo com a tábua de maré e dados batimétricos estabeleceu-se a profundidade limite de 5 m para segurança da navegação.

Para plotar as linhas planejadas sobre cartas náuticas, disponibilizadas pela marinha do Brasil, foi utilizado o software ArcGIS, mais especificamente o pacote ArcMap 10, e o software Track Maker para que as rotas do navio e do equipamento sísmico fosse georreferenciada em tempo real ligados a um GPS portátil Garmin GPSMAP 76CSx.

5.5 AQUISIÇÃO DE DADOS SÍSMICOS

A aquisição foi realizada num período de 18/08/2013 à 24/08/2013, com a embarcação a uma velocidade de 6 nós para que a qualidade dos dados não fosse comprometida. Esta aquisição sísmica foi realizada pelo navio Rey Benedito (Figura 19), com dimensões aproximadas de 15 metros de comprimento, 6 metros de largura, com dois andares e 2 metros de calado.

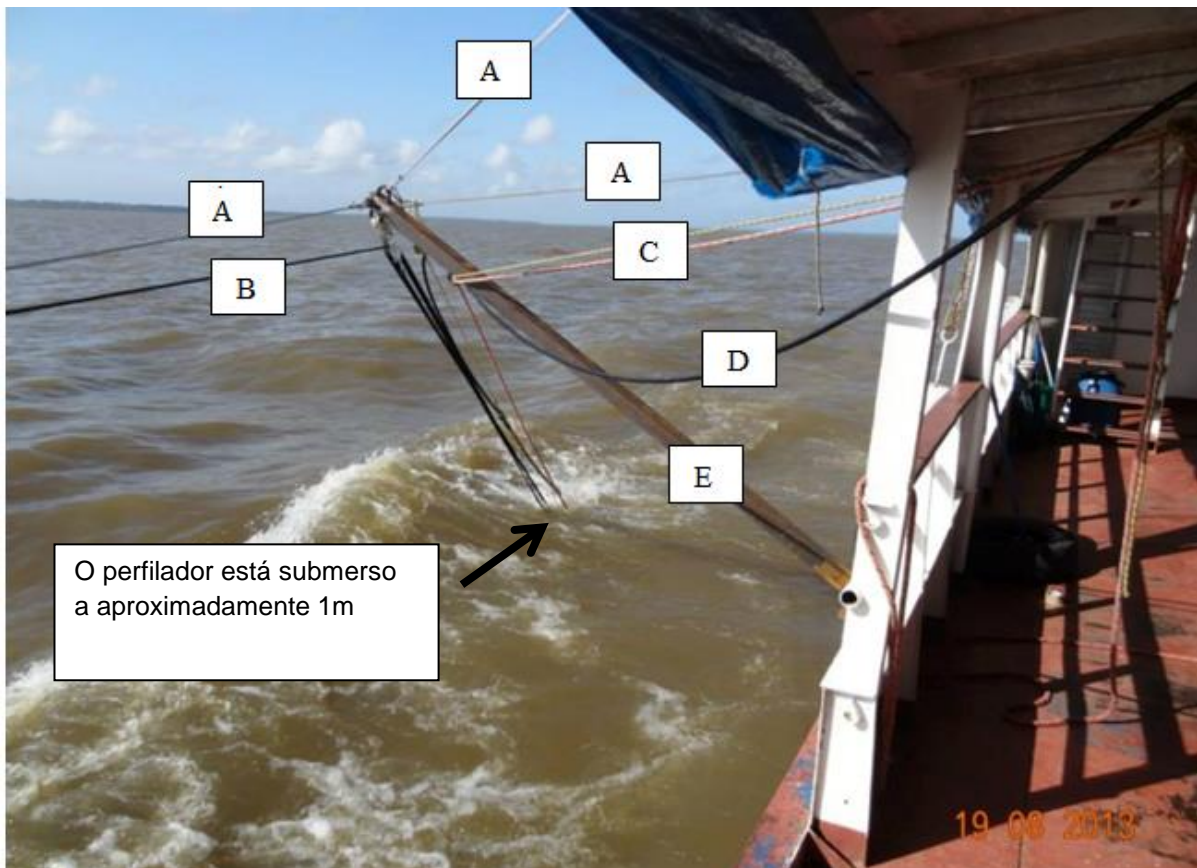
Para a aquisição de dados sísmicos, utilizou-se o equipamento de sísmica rasa SB-0512i da Edgetech, fixo a um 'braço' de aço. Neste suporte estariam acomodados os cabos para reboque, cabos de segurança, cabos de dados e de alimentação elétrica (Figura 20).

Figura 19: Imagem do autor em conjunto com integrantes do LIOG (Laboratório Institucional de Oceanografia Geológica), da UFPA



Fonte: do autor

Figura 20: (A) cabos de estabilização do braço de carga; (B) cabo de controle de profundidade do perfilador; (C) cabo de segurança; (D) cabo de dados e alimentação elétrica (E) braço do carga articulado. Fonte: O autor.

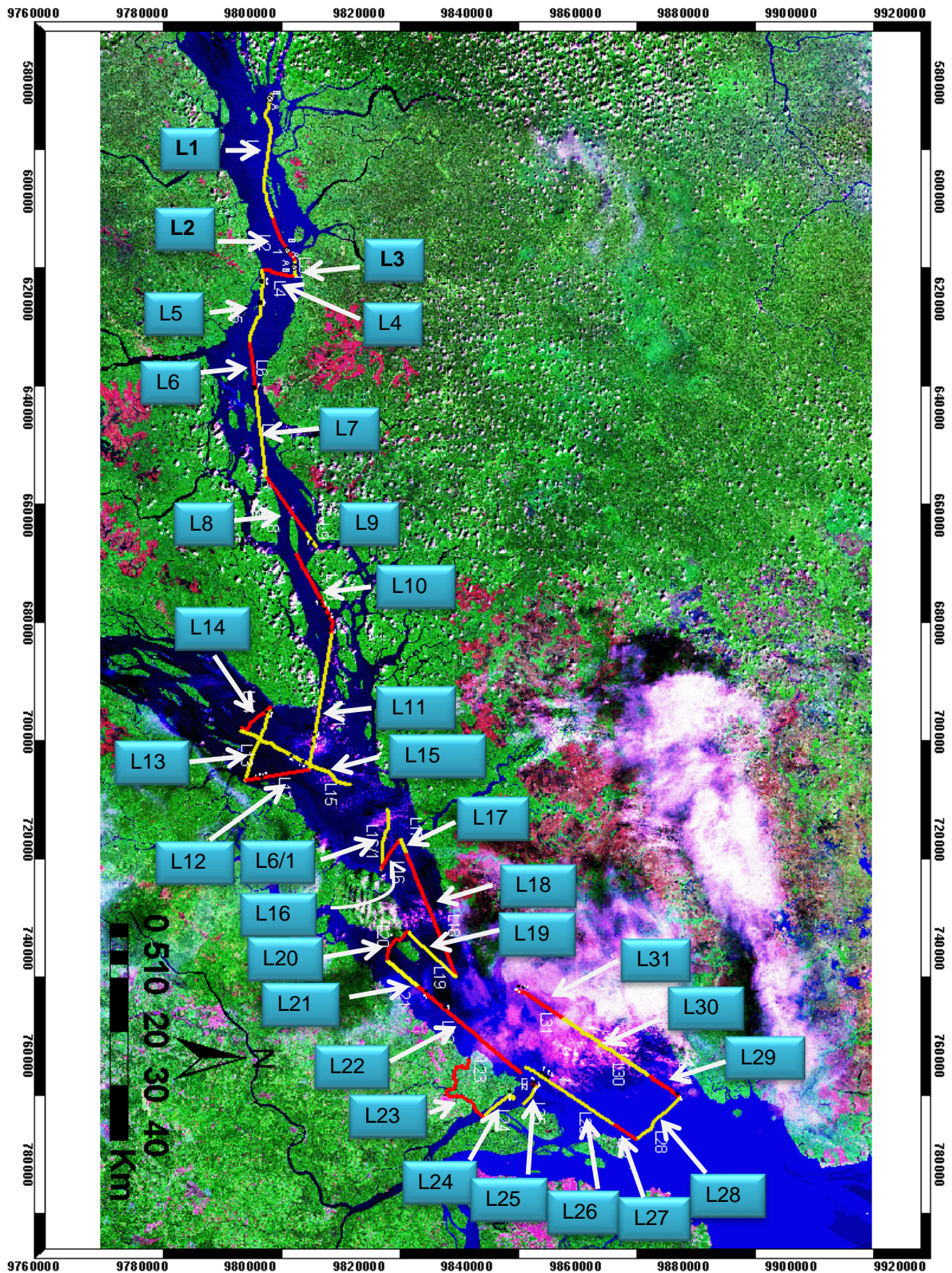


Fonte: do autor

Os dados adquiridos foram salvos no computador que compõe a plataforma de aquisição, que também possui um monitor no qual se visualiza a aquisição em tempo real, com esse recurso pode-se ajustar os perfis da aquisição durante imprevistos, pois uma metodologia de aquisição para esta região utilizando este perfilador ainda não existe.

Ao longo da aquisição, percebeu-se que o perfilamento ao longo do canal, possivelmente devido a constituição do leito por material sedimentar grosso comprometia a penetração do sinal. Portanto, as linhas projetadas durante o planejamento foram deslocadas para porções mais próximas das margens, onde o material depositado permite maior penetração do sinal acústico (Figura 21).

Figura 21: Imagem que localiza a área de estudo com todas as linhas sísmicas alternadas em cores vermelhas e amarelas, mostrando os limites de cada linha sísmica.



Fonte: LandCover (2014)

LandCover. (<http://nationalmap.gov/landcover.html>); acessado em 18 de novembro de 2014.

Todos os perfis totalizaram cerca de 400 km de perfilagem. E estas linhas sísmicas foram adquiridas em segmentos ao longo de toda a área de estudo.

5.6 PROCESSAMENTO DOS DADOS

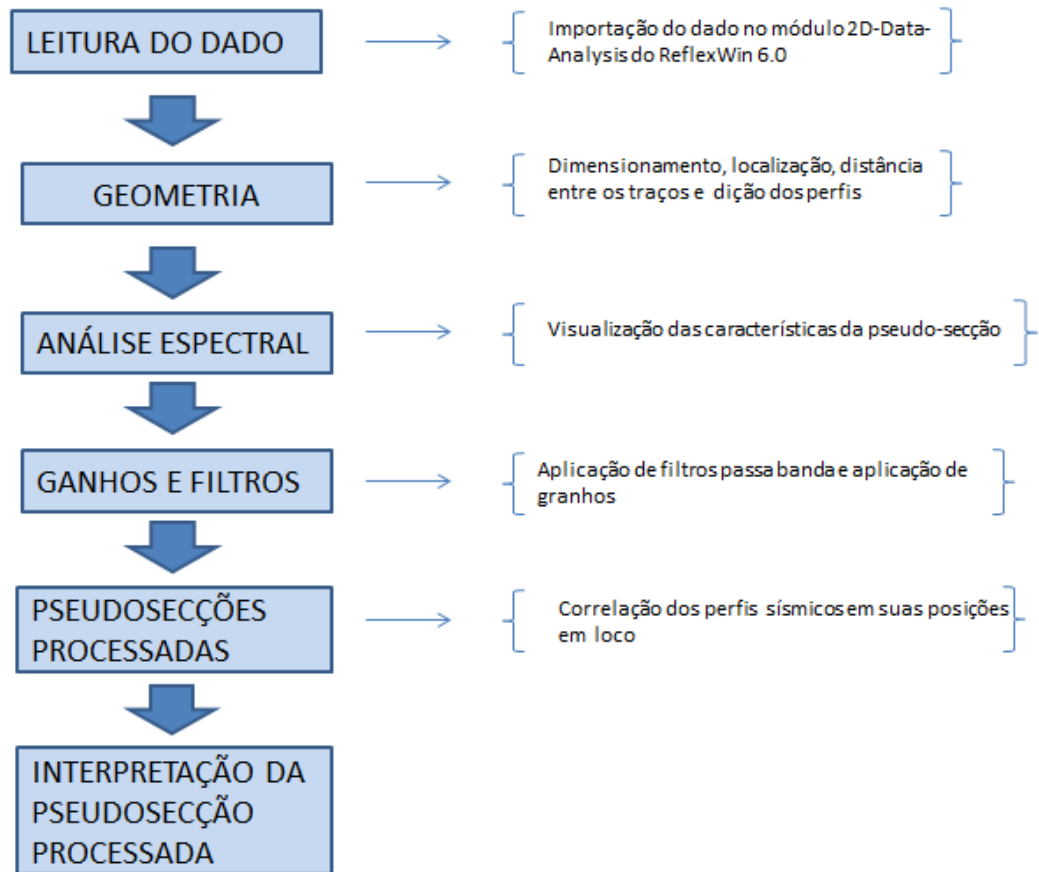
O processamento dos dados adquiridos na área objeto de estudo baseou-se na sequência de processamento desenvolvida por GOMES (2009). O *software ReflexWin 6.0* foi a ferramenta utilizada para o processamento de dados de alta resolução, este programa possui etapas básicas de um processamento sísmico e alguns processos suplementares que podem melhorar dados brutos após o processamento.

O programa *ReflexWin 6.0* possui módulos interativos para o processamento e interpretação de dados de sísmica 2D (e GPR), em particular o modo de visualização *2D-Data-analysis*, que suporta diversos padrões de dados, inclusive o formato de aquisição (*.jsf) do programa *Discovery SB* da *EdgeTech*.

Os recursos disponíveis no programa *ReflexWin 6.0* foram utilizados para aplicação do processamento de dados (GOMES, 2009).

Figura 22 - Fluxo de processamento para dados de sísmica rasa.

O fluxograma expõe as etapas básicas do processamento.



Fonte: Baseado em Gomes (2009).

5.7 AMBIENTE REFLEXWIN 6.0

Com base no processamento de Gomes (2009), o processamento de dados de sísmica rasa adquiridos com o perfilador x-star, seguiu as seguintes etapas de acordo com a necessidade dos perfis adquiridos na região amazônica.

5.8 LEITURA DOS DADOS

Os dados adquiridos com o perfilador *Sub-Bottom*, são armazenados com um formato interno do Discover em uma varia o do formato SEG-Y. Os dados brutos (*.jsf) ao entrar no ambiente ReflexWin são convertidos para o formato interno do programa. As linhas sísmicas são carregadas por meio da ferramenta 2D-Data-Analysis (GOMES, 2009).

5.9 GEOMETRIA DO DADO

A remoção da lâmina d'água pode ser útil na otimização de tempo e precisão de processamento e minimização da saturação visual (GOMES, 2009).

Em casos em que o processamento não consegue retirar múltiplas de amplitudes altas, dependendo da morfologia da múltipla, pode ser aplicável a remoção de parte da seção através do corte do tempo duplo (GOMES, 2009).

Em alguns casos em que um perfil sísmico continha grande quantidade de traços, extraiu-se parte da seção sísmica e utilizou-se para testes, pois assim, reduziu-se o tempo “gasto” durante o processamento (GOMES, 2010).

5.10 ANÁLISE ESPECTRAL

O balanceamento espectral Spectral whitening é uma ferramenta de filtragem útil para correção da atenuação das frequências no traço sísmico e em dados com ruídos, melhorando a resolução temporal e espacial do sismograma (GOMES, 2009).

5.11 Ganhos e filtros

O comando *div. Compensation* equaliza o dado em função do tempo (eixo x) e serve para realizar a compensação/recuperação da perda de energia por divergência geométrica, onde se aplica um fator de escala de ganho sobre a curva média de decaimento de amplitudes baseada em todos os traços (GOMES, 2009).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho apresenta os dados adquiridos na região amazônica, especificamente ao longo do Rio Pará e foz do Rio Tocantins, por meio da utilização do método geofísico de alta resolução com o principal objetivo de investigação de subsolo.

A utilização dos perfis sísmicos de alta resolução adquiridos com o perfilador de subsolo X-Star permitiu a identificação de feições morfológicas provavelmente provocadas por tectonismo, assim como a identificação de falhas propriamente ditas.

A partir da análise dos dados sísmicos obtidos na área de estudo, foram identificados nove feições interpretados como ocorrências tectônicas. Devido às especificidades do equipamento e características geológicas da região, áreas prováveis de falhas tectônicas não foram detectadas pelo equipamento utilizado, e em outras elas se confirmaram.

Como dito anteriormente, este trabalho por ser, também é de caráter exploratório, permitindo que uma região ampla fosse explorada, pois não há dados de sísmica rasa submersa nas localidades estudadas. Apesar de haver indicativos bibliográficos de dados terrestres e de feições tectônicas que possivelmente se prolongariam em áreas submersas, vimos em loco que nem sempre essas tendências se confirmaram.

Desta forma decidiu-se analisar a maior quantidade de área possível, para que os resultados obtidos servissem de indicativos para futuros trabalhos.

Navegar a uma velocidade de 6 nó que é equivalente a 9 km/h, com o perfilador a um metro de profundidade, trouxe melhores resultados na coleta dos dados.

Sendo a área de estudo ainda pouco estudada neste foco, testou-se as diferentes frequências disponíveis no perfilador, já se sabia de antemão que frequências com maior valor podem analisar pontos com maior detalhe, porém sem pouca penetração no substrato e vice-versa. Nem sempre uma mesma frequência funcionou satisfatoriamente em lugares diferentes.

É importante integrar dados de granulometria e sedimentologia para uma melhor escolha da frequência mais adequada em cada região.

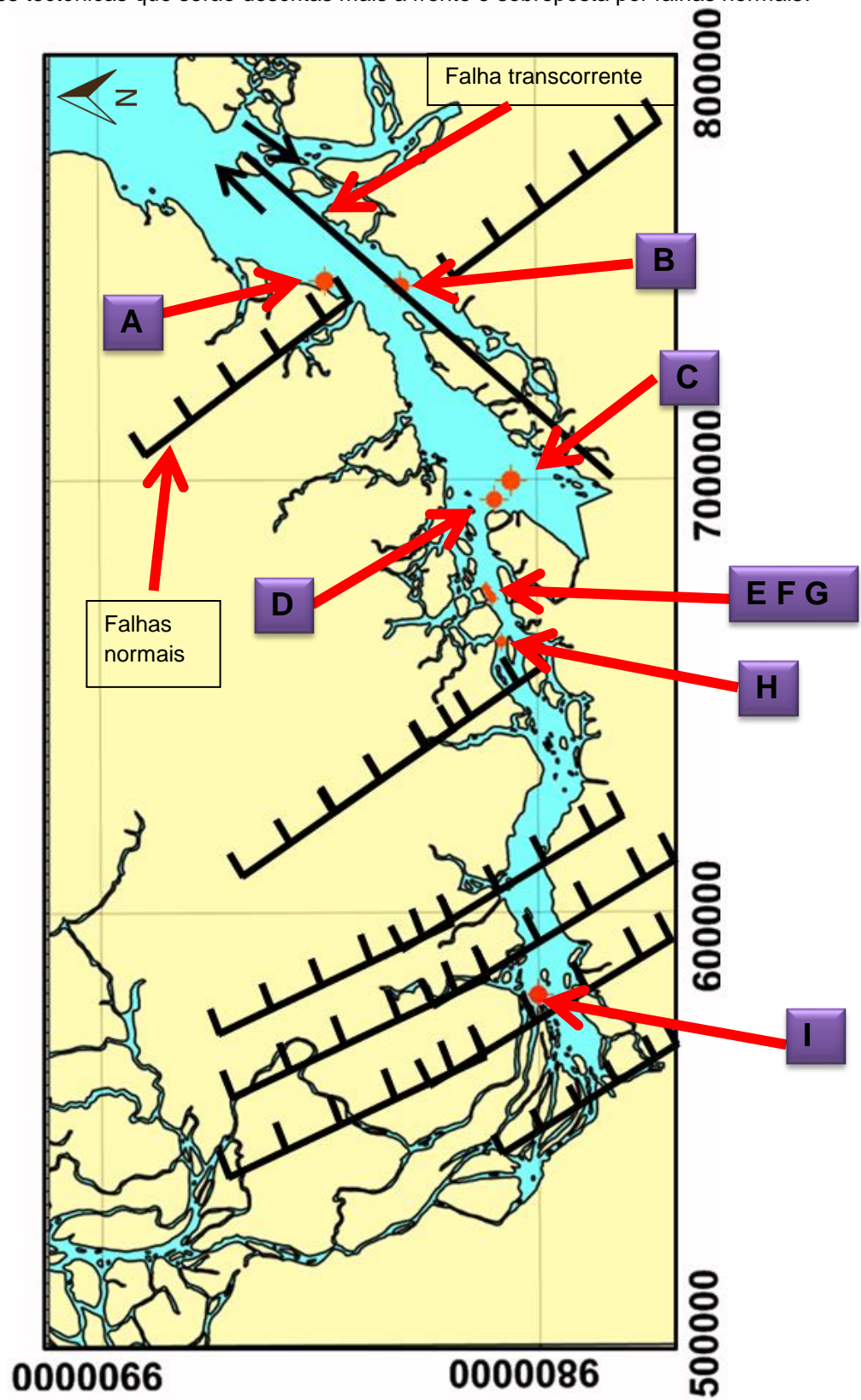
Dentre os trabalhos que tentam mapear as feições tectônicas da área de estudo podemos destacar o de Villegas (1994) e o de Costa et al (1996).

A Figura 25 abaixo, é uma imagem baseada no artigo de Costa et al. 2002, nesta imagem estão integradas as feições geológicas de seu trabalho e os pontos, que vão de A a I, em vermelho que correspondem as posições geo-referenciadas das estruturas encontradas pelo levantamento de sísmica rasa e descritas nesta dissertação.

A Figura 23 está referenciada em coordenadas UTM (Universal transversa de Mercator). Os pontos A, B, H e I estão concordantes ou bem próximos as falhas mostradas por Costa et al., já os pontos C, D, E, F e G não confirmam suas projeções, na escala de alcance do equipamento que é de no máximo, neste trabalho, de 30m a partir do fundo.

Estruturas, descritas por Costa et al. Podem estar lá, porém nosso equipamento pode não ter resolução adequada, camadas de areia grossa, clinações e fundo, influenciam fortemente na penetração do sinal.

Figura 23: Mapa da área de estudo acrescida de pontos em vermelho que representam os feições tectônicas que serão descritas mais a frente e sobreposta por falhas normais.



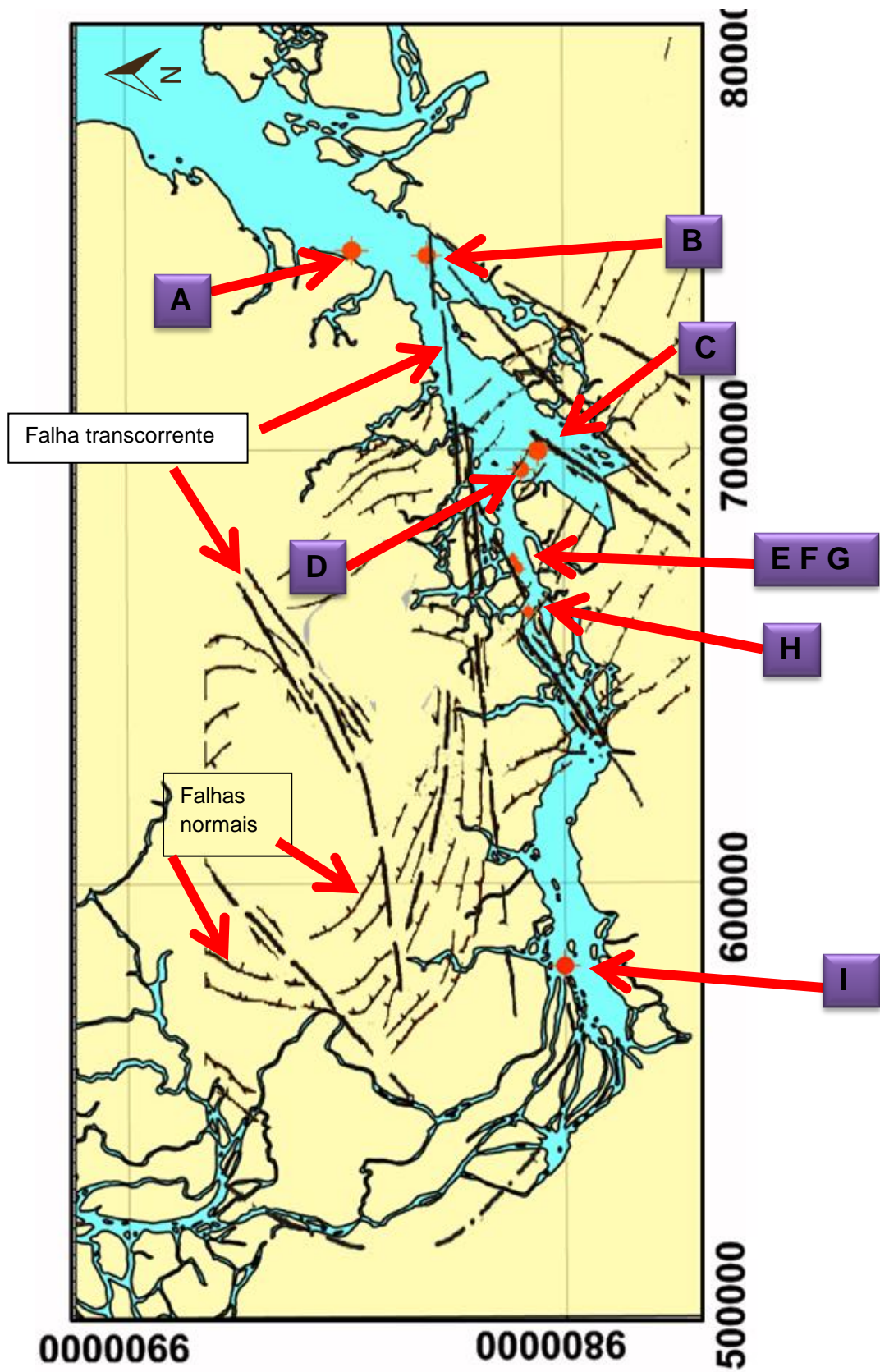
Fonte: modificado de Costa et al (1996).

A Figura 24, a seguir, tem a mesma configuração da Figura 23, sendo modificada, somente pela estruturas tectônicas, que agora são a versão de Villegas (1994).

As estruturas apresentadas por Villegas (1994), estão dispostas em uma área menor que a de Costa et al (1996), porém com uma densidade maior e com uma variação de direcionamento também maior.

As feições B, C, D, E, F, G e H coincidem com o que foi apresentado por Villegas (1994), porém A e I não são contempladas pelas estruturas, mas podem ser visualizadas pelo mapeamento de sísmica rasa.

Figura 24: Mapa da área de estudo acrescida de pontos em vermelho que representam as feições tectônicas que serão descritas mais a frente e sobreposta por falhas normais e transcorrentes gerados por Villegas (1994).



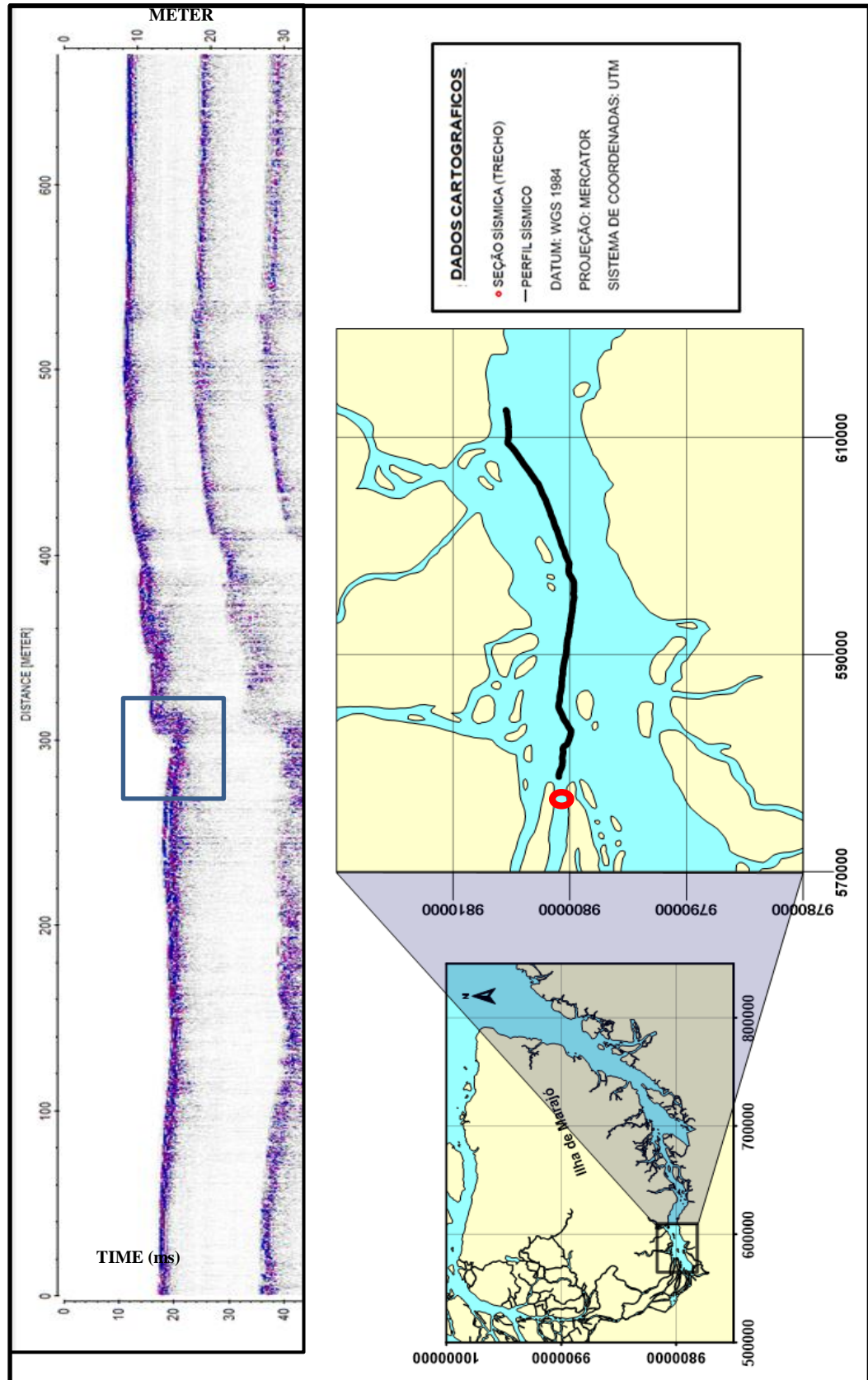
Fonte: modificado de Villegas (1994)

7 DESCRIÇÃO DOS PERFIS SÍSMICOS

As escalas verticais e horizontais de altura e extensão são expressos em metros nas pseudo-secções.

A Figura 25, localiza-se na porção interna do estuário do rio Pará onde a profundidade geralmente é inferior a 15 m e as intensidades de correntes não menores. A Figura 25 mostra um desnível de 7m na no fundo, provavelmente influenciada por tectonismo. A configuração dessa superfície e sua dimensão são indicativos de que essa feição morfológica possivelmente trata-se de uma falha normal, assinalado pelo polígono. Em subsuperfície não é observada presença de refletores, no entanto observa-se a repetição de múltiplas.

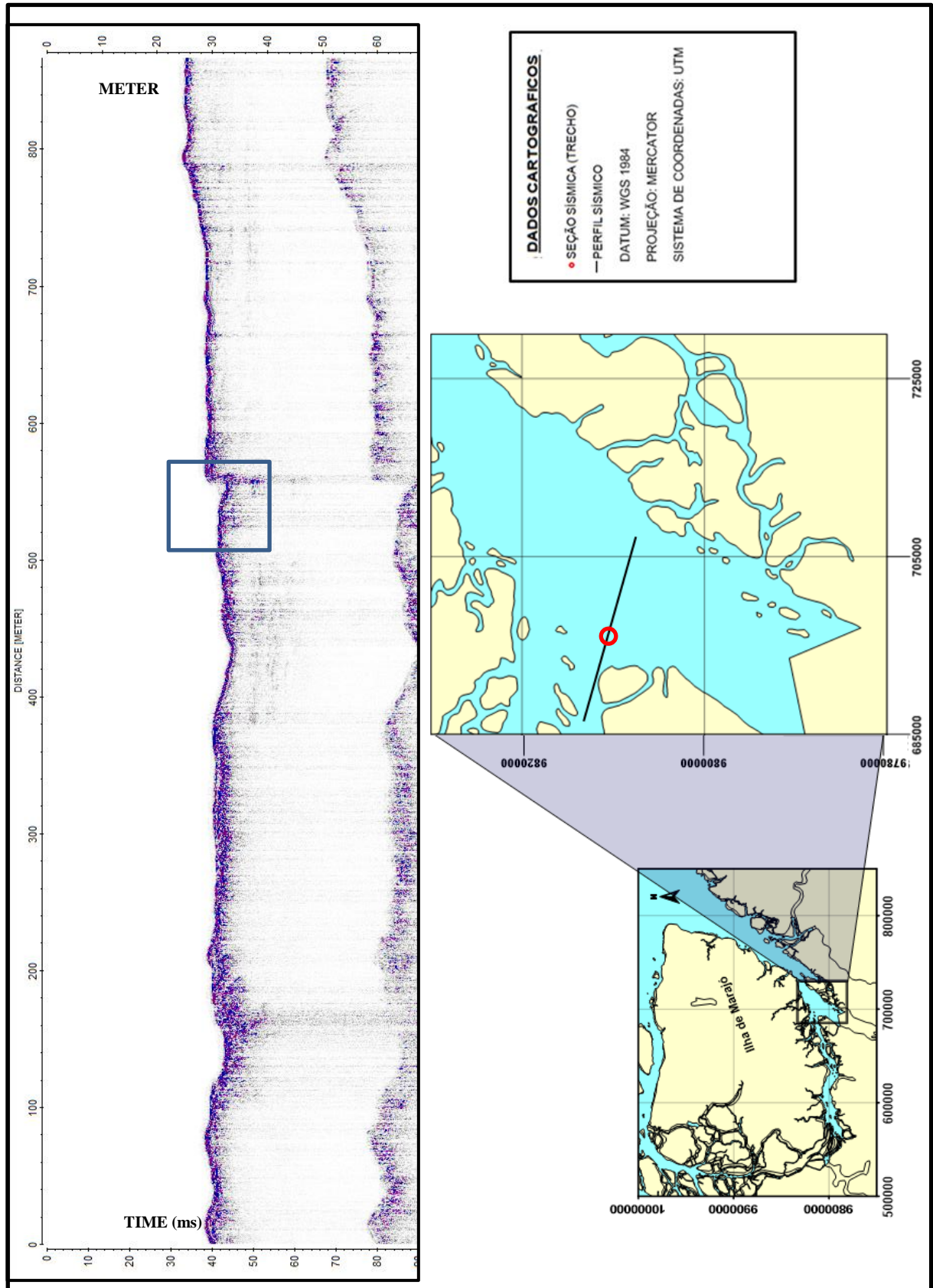
Figura 25: Trecho da linha L1, representando a feição I (Figura 24), evidenciando uma falha normal.



Fonte: do autor

Na figura 26 é possível visualizar em subsuperfície a presença de refletores, no entanto não é possível a visualização da falha em si através do perfilador X-Star. Neste ponto supõe-se a existência de uma ruptura, com valor aproximado de 5 m de variação, assinalado pelo retângulo, falha esta que pode ser descrita como falha normal, com o teto a oeste e o piso a leste.

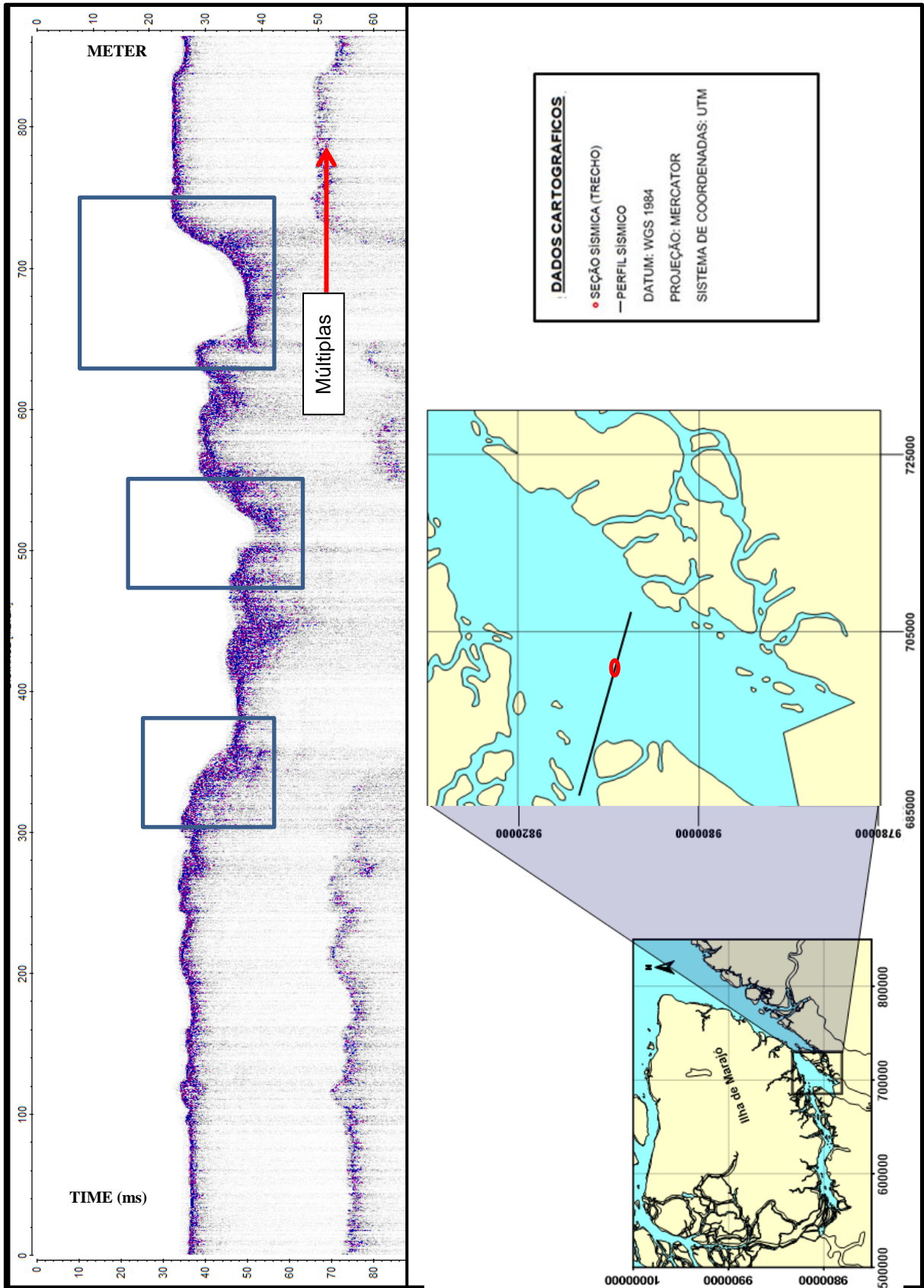
Figura 26: Trecho da linha L11, representando a feição D (Figura 24), evidenciando uma falha normal.



Fonte: do autor

A figura 27 mostra o leito a uma profundidade média de aproximada de 35 m onde a subsuperfície não mostra refletores, apenas múltiplas. Nas áreas em destaque observa-se inclinações maiores que 45° da superfície do leito. As irregularidades deste trecho, assinalados pelos retângulos, possivelmente, correspondem áreas rochosas deslocadas verticalmente por tectonismo.

Figura 27: Trecho da linha L11, representando a feição C (Figura 24), evidenciando uma sequencia de feições geológicas.

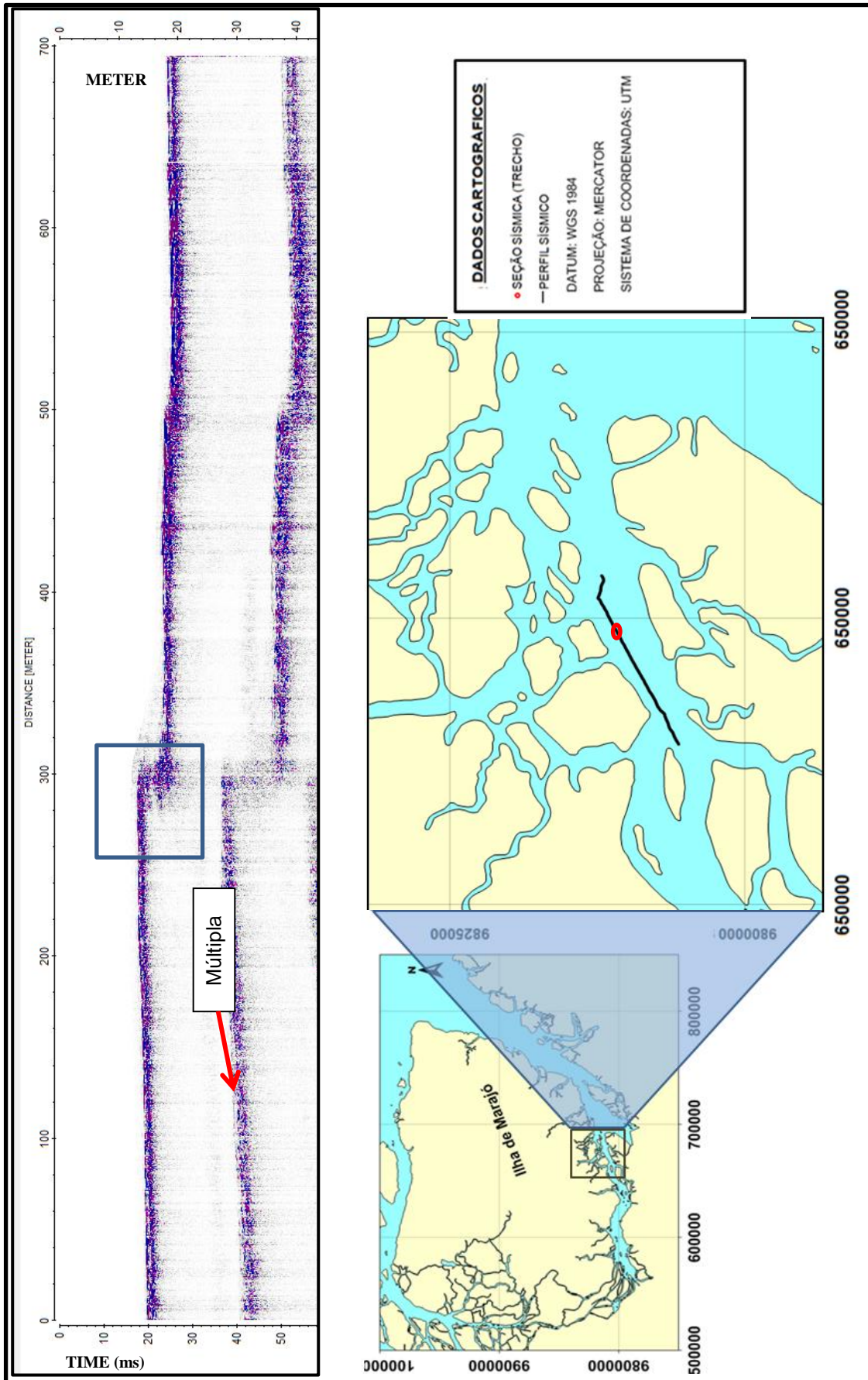


Fonte: do autor

Nas figuras 28, 29, 30 e 31 observa-se que as pseudo-seções sísmicas apresenta “quebras” bruscas da interface água-fundo de aproximadamente 5 metros, o que permite supor a existência de evento tectônico divergente, sendo que pelas limitações do equipamento não se pode visualizar a irradiação da falha em profundidade, porém a análise da descontinuidade de sua superfície, indicada pelos polígonos, permite tal suposição.

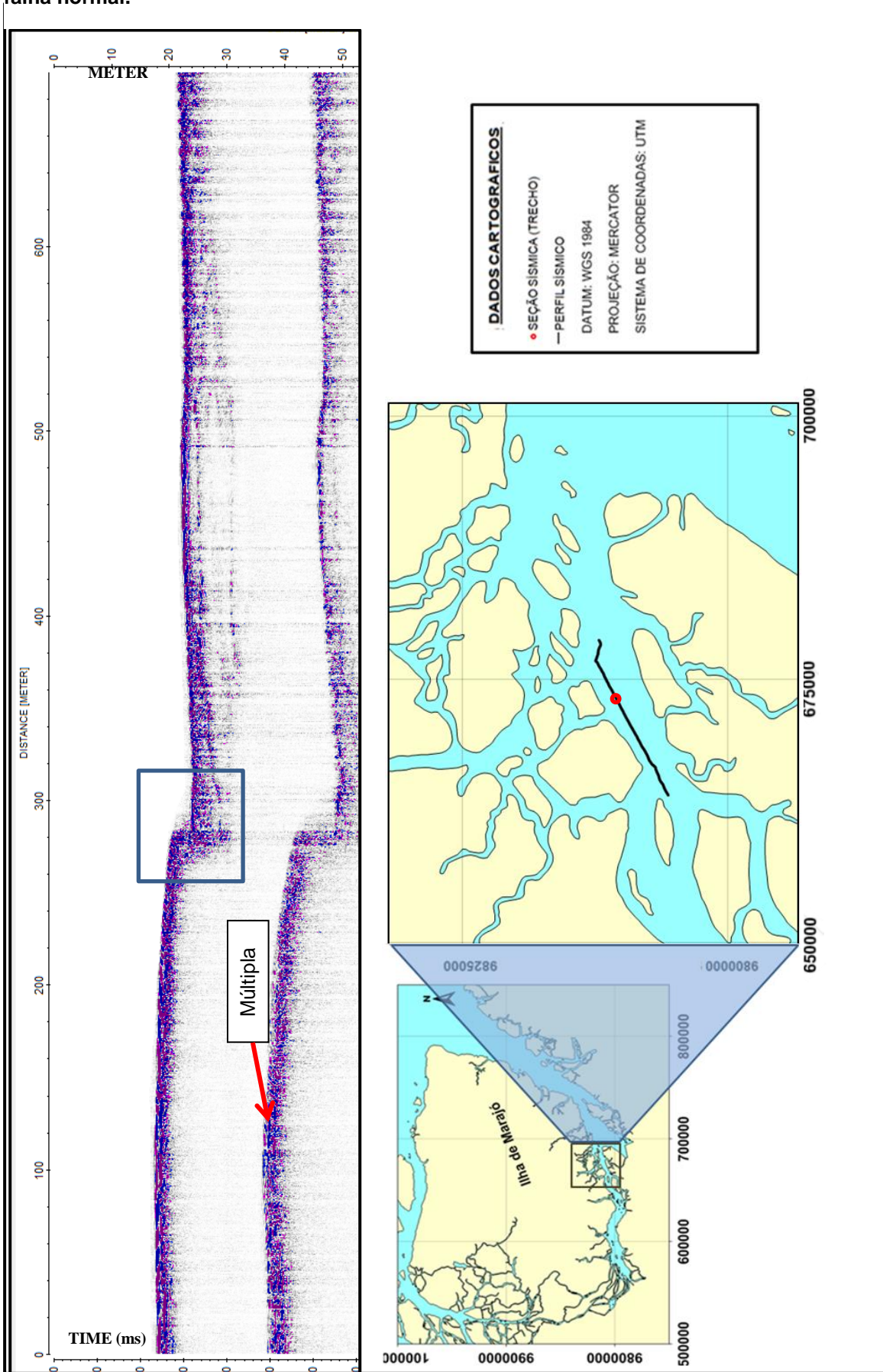
As imagens 28, 29 e 30 podem representar uma sequência de falhas bem similares pois e apresentam configuração de tem a parte mais alta a oeste, já a imagem 31 representa outra linha, e a mesma mostra a parte mais elevada mais a leste, indicando a posição de um possível graben.

Figura 29: Trecho da linha L10, representando a feição F (Figura 24), evidenciando uma falha normal.



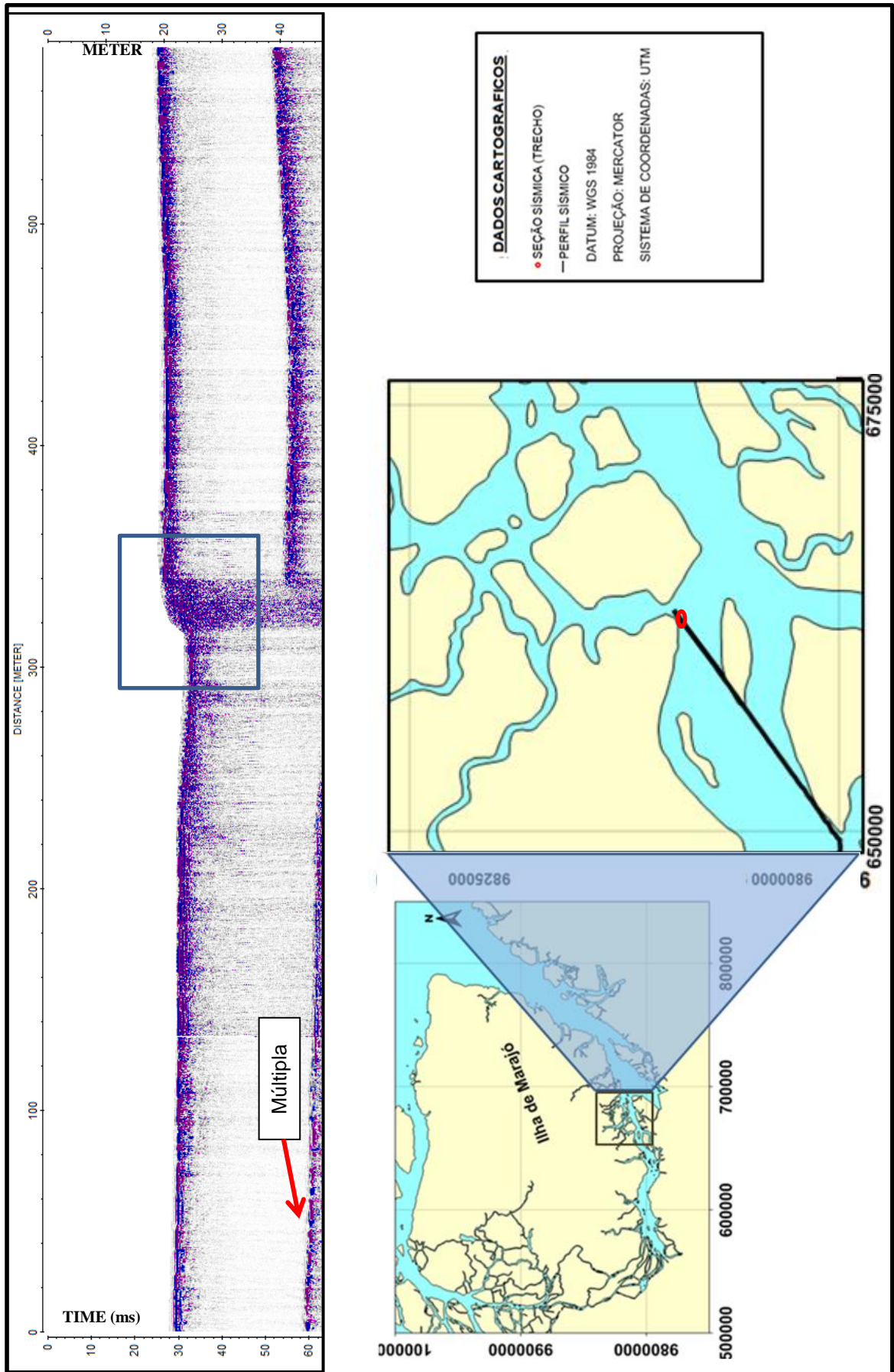
Fonte: do autor

Figura 30: Trecho da linha L10, representando a feição G (Figura 24), evidenciando uma falha normal.



Fonte: do autor

Figura 31: Trecho da linha L9, representando a feição H (Figura 24), evidenciando uma falha normal.

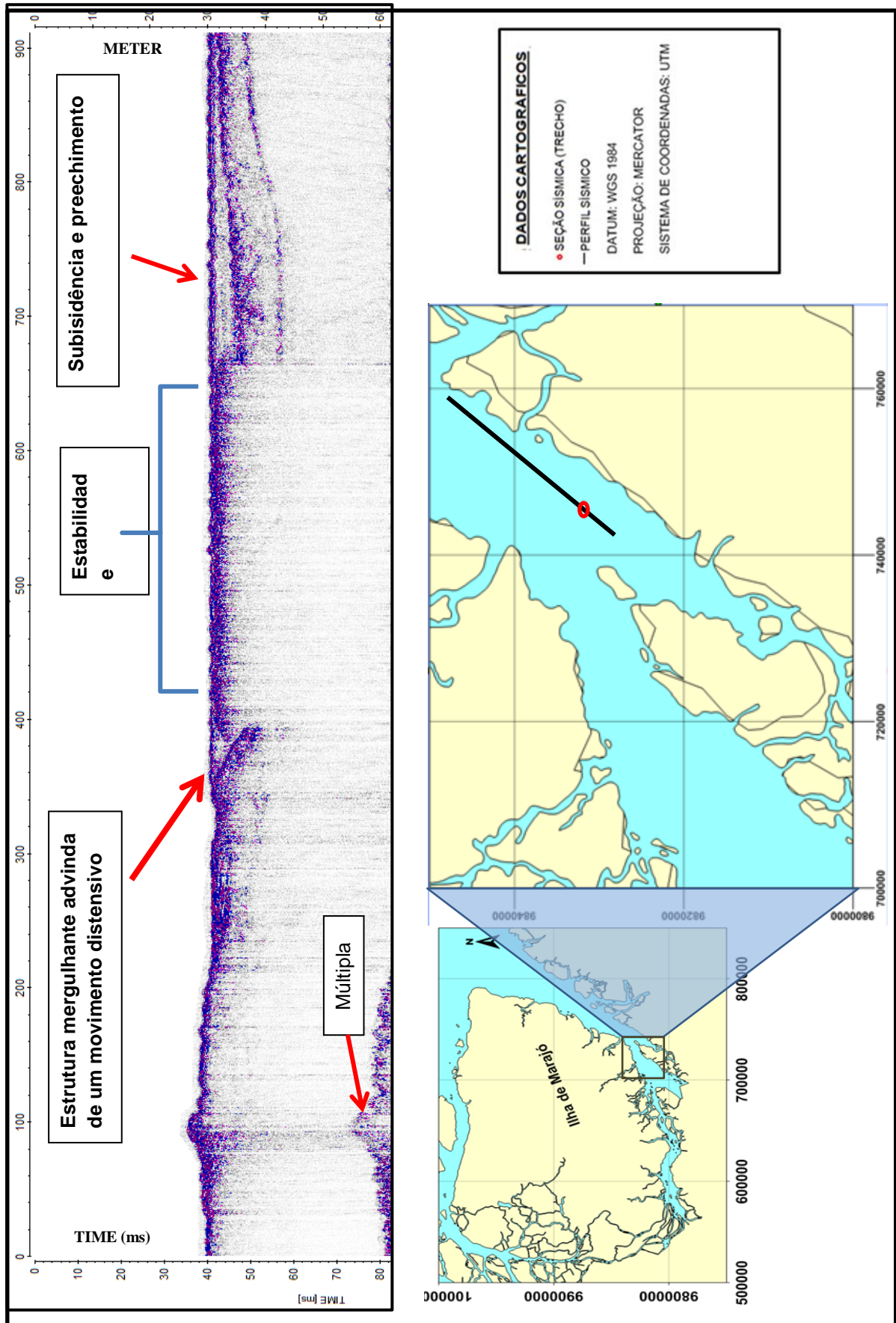


Fonte: do autor

A figura 32 apresenta um trecho com frequência alta em feições tectônicas. Em na posição de 350m tem-se uma estrutura mergulhante advinda de um movimento distensivo, seguida de uma região de estabilidade, que vai da posição 400 a 650m.

Mesmo tendo estabilidade em sua superfície, apresenta uma estrutura inclinada em subsuperfície (indicada pela seta vermelha), indicativo de falha normal. No trecho que vai de 690 a 900 é um trecho que apresentou subsidência e posterior preenchimento por sedimentos. Provavelmente temos Horst no trecho que vai de 400 a 650m.

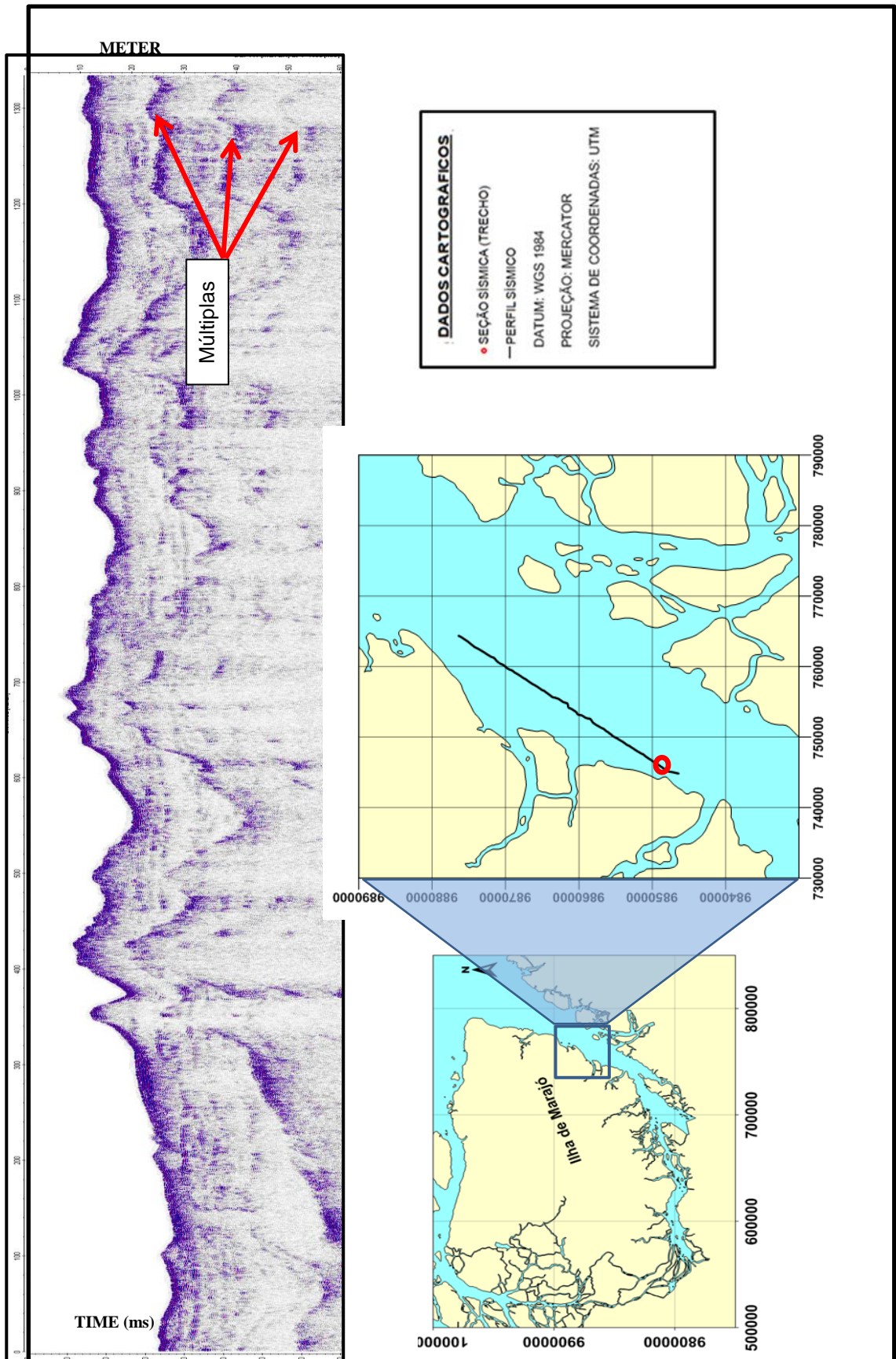
Figura 32: Trecho da linha L22, representando a feição B (Figura 26), sequencia de feições divergentes, com Host.



Fonte: do autor

A figura 33 mostra um trecho do perfil sísmico onde não há estabilidade estrutural, que é “quebrada” por variações verticais de tanto em superfície quanto por seus estratos na subsuperfície do leito. São aproximadamente 600 metros de estruturas deformadas, provavelmente, por ação de forças tectônicas que causam deformações de até 20 metros.

Figura 33: Trecho da linha L22, representando a feição A (Figura 24), sequencia de estruturas deformadas por tectonismo.



Fonte: do autor

8 CONCLUSÃO

Com aproximadamente 400 Km de linhas coletadas tivemos muitas áreas identificadas para futuros trabalhos que desejem escolher uma área promissora para mais detalhamento. Contudo não nos resumimos a indicadores de trabalhos futuros.

Pelo fato de a granulometria influenciar a aquisição de dados, há a necessidade de se planejar também a granulometria dos pontos de coleta, para um melhor resultado, no que diz respeito a penetração do sinal do perfilador.

Constatou-se o avanço no quesito detalhe em relação aos trabalhos de Villegas (1994) e Costa et al (1996), pois, numa estrutura indicada com símbolos geológicos por estes autores, foram encontradas várias feições geológicas com a sísmica de alta resolução, e não só indicadas, pode-se visualizar a feição e georeferência-las com mais exatidão.

Novos planejamentos podem ser mais bem orientados. Novos estudos delimitar melhor as bacias locais, utilizando equipamentos com maior penetração e utilizando dados coletados.

Os trabalhos anteriores na região mostram feições geológicas onde o alcance máximo em relação a superfície é de 1000m. O trabalho desta dissertação é uma lacuna a menos nesse estudo, pois mostra reflexos dessas estruturas que chegam a superfície.

Desta forma pode-se inferir quais estão mais ativas e com isso fazer correlações mais exatas da movimentação tectônica da região, delimitar melhor os limites das bacias, correlacionar as feições com a drenagem local, pois hoje a drenagem é utilizada com muita frequência como fator preponderante para sugerir feições geológicas submersas.

Não só a drenagem, mas também outros métodos geofísicos podem ser correlacionados como, por exemplo, gravimetria, magnetometria, métodos elétricos, etc. Todos esses recursos exploratórios podem se utilizar desses dados para futuros trabalhos.

Os dados podem ser reprocessados por outros *softwares* e com isso mostrar novas feições não visualizadas agora.

A pesquisa realizada foi proveitosa, pois nos mostrou a dinâmica da região, tanto na logística quanto nos pontos chave pra futuras campanhas científicas.

Os resultados obtidos causam um avanço nas pesquisas tanto vertical (profundidade) quanto horizontal (em planta), no que se refere aumento de detalhe e precisão de localização de eventos geológicos na Amazônia.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER A. N: Paisagens de exceção: o litoral e o pantanal matogrossense: patrimônios básicos. São Paulo, Ateliê editorial, 2006, 184p.
- ABREU, J. G. N. **Sedimentologia, sismoestratigrafia e evolução da plataforma continental interna na área sob influência dos rios Itajaí-Aço e Camboriú, Litoral Centro-Norte de Santa Catarina.** 2010. 124f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências. Porto Alegre. 2010.
- AYRES NETO, A. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v18n3/a04v18n3.pdf>>. Acesso setembro de 2014.
- AYRES NETO, A. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, V. 18, p. 241- 256. 2000.
- AYRES NETO, A.; FALCÃO, L. C.; AMARAL P. T. Caracterização de Ecofácies na margem continental norte brasileira – estado do conhecimento. **Revista Brasileira de Geofísica**, 27 (Supl. 1): 97 – 106. 2009.
- ASHLEY, G. Classification of large- scale subaqueous bedforms: a new look at na old problem. **Journal of Sedimentary Petrology**. v. 60, p. 160-172. 1990.
- AVENIUS, C.G. Cronostratigraphic study of the post-rift/sin-rift unconformity, Marajó Rift system. **Texaco/Canada Report**, Belém, p 6, 1988.
- BARBOSA, E. E. M. **Investigação sísmica na planície costeira de Bertioga (SP).** 2012. 108f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, 2012.
- BARROS, C. S. **Análise regional e ambiental: dinâmica sedimentar e hidrológica na confluência do rio Ivaí com o rio Paraná, município de Icaraíma- PR.** 2006. 51f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes Departamento de Geografia Maringá, PR, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2006.
- BELL, R.; GREEN, M.; HUME, T.; GORMAN, R. Whats regulates sedimentation in estuaries? **Journal of Water e Atmosphere** 8 (4):13-16. 2000.
- BEMERGUY, R. L. **Morfotectônica e evolução paleogeográfica da região da calha do rio Amazonas.** 1997. 200f. (Tese de Doutorado) - UFPA , CPGG, Belém, 1997.
- BERNER, S; CASTAING, P. E; LERICOLAS, G. Morphology, internal structure, and reversal of asymmetry of large subtidal dunes in the entrance of the Gironde (France). **Journal of Sedimentary Petrology**. v, 63, p. 780-793. 1993

BEZERRA, C. A. C. A. **Eletrorresistividade aplicada ao estudo de água subterrânea no Município de Salvaterra - Marajó - Pará.** 1979. 58f. Dissertação (Mestrado) - UFPA, NCGG, Belém, 1979.

BORGES, W. R. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicação no planejamento urbano e meio ambiente:** estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP 2007, 260f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2007.

BOULHOSA, M.B.M. **Morfologia, sedimentologia e índices de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo na região portuária de Vila do Conde-Barcarena-PA.** Relatório do programa de Capacitação Institucional-PCI/MPEG, 2007. 53p.

BRANDÃO, J.A.S.L.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Pará- Maranhão. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 8, p. 101-102, 1994 (b).

CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil.** (PhD) - University of California, Santa Barbara, 1984.

CASANOVA, V. **Teorías de la propagación de la luz:** principio de Huygens-Fresnel. 2012. Disponível em: <<http://www.astrofiscayfísica.com/2012/08/teorias-de-la-propagacion-de-la-luz.html>> Acessado em maio de 2014.

CARNES, J.B.; CHOU, G.T.; KATZ BJ; LORENZETTI, E.; SHIH, T.C. Exploration analysis of syn-rift section of Marajó Basin. **Texaco/Canada. Report**, Belém, v.89, n. 109, p. 61. 1989.

CARRASQUILA, A.; RIJO, L.; PORSANI, M. Estudo geofísico regional das águas subterrâneas na Ilha do Marajó - Pará. **Rev. Bras. Geof.**, n.9, p. 187-197. 1991.

CARVAJAL, D.A. ; DORMAN, J.T.; KENCK, A.R.; KEY,C.F.; MILLER, C.J. ; SPECHT, T.D. Final report of the third exploration phase, Marajó. **Texaco/Canada. Report**, Belém, p. 61. 1989.

CAVALCANTI, G. M. L. **Geofísica aplicada à prospecção de água subterrânea na área do Rio Paracauari - Ilha do Marajó – Pará.** 1979. 88f. Dissertação (Mestrado) -UFPA, NCGG, Belém, 1979.

COSTA, J.B.S.; HASUI, Y.; BEMERGUY, R.L.; SOARES JUNIOR, A.V.; VILLEGAS, J.M. Tectonic and paleogeography of the Marajó Region, Northern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 74, p. 519-531, 2002.

COSTA, J.B.S.; SOARES JUNIOR, A.V.; HASUI, Y. Evolução da Margem Atlântica Equatorial do Brasil: três fases distensivas, São Paulo. 2008 .UNESP, **Geociências**, v. 27, n. 4, 427-437f, 2008

COSTA, JBS; BEMERGUY, RL; HASUI, Y; BORGES, MS; FERREIRA JUNIOR CRP, BEZERRA PEL, COSTA ML; FERNANDES JMG. Neotectônica da região

amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. **Geonomos**, Belo Horizonte: UFMG, n 4, p. 23-44, 1996.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. In: BIZZI, L.A; SCHOBENHAUS, C. et al. (Eds.), **Sistema de Informações Geográficas - SIG**. Mapas em escala 1:2.500.000. Brasília: Serviço Geológico do Brasil, Ministério de Minas e Energia, v. 1, 674 p. 2002.

GADALLAH, M. R. "**Reservoir seismology** - geophysics in nontechnical language", Tulsa: PennWell Books, 1994.

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. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Rio Grande do Norte, 2009.

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 (mestrado). Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal-RN. 2009, 95. p.

GONZÁLES, A. A. C. **Estudo geofísico regional sobre água subterrânea da Ilha do Marajó - Pará - Brasil**. 1984. 143f. Dissertação (Mestrado) – UFPA, NCGG, Belém, 1984.

GUIMARÃES, P. P. D. **Métodos sísmicos de refração e eletromagnético aplicados ao estudo de um paleocanal da Ilha do Marajó - Pará**. 1983. 90 f. Dissertação (Mestrado) - UFPA, NCGG, Belém, 1983.

HOMESTUDIOBLOG. **Proximity Effect**. 2010. Disponível em <<http://homestudioblog.dreamwidth.org/1201.html>>. Acessado em 12 Out. 2014.

KOBAYASHI, C. N. **Métodos geofísicos aplicados à prospecção de água subterrânea no Município de Ponta de Pedras. Ilha do Marajó - Pará**. 1979. 93 f. Dissertação (Mestrado) – UFPA, NCGG, Belém, 1979.

LANDCOVER. **Imagem que localiza a área de estudo com todas as linhas sísmicas alternadas em cores vermelhas e amarelas, mostrando os limites de cada linha sísmica**. Disponível em <<http://nationalmap.gov/landcover.html>>. Acessado em 18 de novembro de 2014.

LIMA HP. **Notas sobre a análise estratigráfica da Bacia de Marajó**. Belém: Petrobras/Departamento de Exploração do Norte/Divisão de Interpretação. 15 p, 1987. (Relatório Interno).

LIMA, H. P. **Notas sobre a análise estratigráfica da Bacia do Marajó**. Belém: Petrobras. 1987. p.34.

LIMA.W.N.; KOBAYASHI. Sobre o quimismo predominante nas águas do sistema flúvio-estuarino de Barcarena, Pará. *Goechimica Brasiliensis*, v. 2, n.1. 1988, p. 53-71

MCHONE, J.G. **Igneous features and geodynamic models of rifting and magmatism around the Central Atlantic Ocean**. 2006. Disponível em: <<http://www.mantleplumes.org/CAMP.html>> . Acesso em setembro 2014.

MANTELLI, L. R.; ROSSETTI, D. F.. Significado tectônico de lineamentos de drenagem no sudoeste da Ilha do Marajó. *Rev. Bras. Geoc.*, n. 39, p. 1-13. 2009.

MONTEIRO, P. G., **Métodos Geofísicos Aplicados à Localização de Depósitos de Granulados Biodetríticos e Paleocanais no litoral da Paraíba, Brasil**. 92 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Aplicada) – Instituto de Geociências – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2010.

PORSANI, M. J. **Paleocanais, uma opção para prospecção de água subterrânea na Ilha de Marajó**. 1981. 109 f. Dissertação (Mestrado) – UFPA, NCGG, Belém, 1981.

REZENDE, W. N. ; FERNANDES J. O. **Integração geológica regional da bacia sedimentar da Foz do Amazonas**. Belém: Petrobras, 1971. 27 p.

ROSSETTI, D. F.; VALERIANO, M. M.; THALLÊS, M. An abandoned estuary within Marajó Island: implications for late quaternary paleogeography of northern Brazil. *Estuaries and Coasts*, n. 30, p. 813-826. 2007.

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. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, n. 80, p. 579-593. 2008.

ROSSETTI, D. F; GÓES, A. M.; VALERIANO, M. M; MIRANDA, M. C. C. Quaternary tectonics in a passive margin: Marajó Island, northern Brazil. *Journal of Quaternary Science*, n. 23, p. 121-135. 2008.

SCHÖN, J. H. Physical properties of rocks. Fundamentals and principles of petrophysics. In: *HANDBOOK of Geophysical Exploration*. Section I, Seismic Exploration, Pergamon Press. 1996. v. 18. 583 p.

SCHALLER, H. Estratigrafia preliminar da bacia sedimentar da Foz do Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, 1971, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SBG, 1971. p. 189-202 .

SHARMA, P.V. **Environmental and engineering geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 475 p.

SHERIFF, R. E.; GELDART, L. P. **Exploration seismology**. 2ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 592p.

SOUZA, L. A. P. de. **Revisão Crítica da Aplicabilidade dos Métodos Geofísicos na Investigação de Áreas Submersas Rasas**. 2006. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2006.

VERMA, O. P.; BISCHOFF, J. H. Laboratory and field studies of the application of

electromagnetic prospecting for groundwater on Marajó Island, Brazil. **Geophysics**, n. 54, p. 23-30. 1989.

VILLEGAS, J. M. **Geologia estrutural da Bacia de Marajó. Belém (PA)**. 1994. 119f. Dissertação (Mestrado) – UFPA, CPGG, 1994.

ZALÁN, P.V.; MATSUDA, N.S. Bacia do Marajó. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 311-319, 2007.