



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 498**

**RECONHECIMENTO DOS ELEMENTOS DEPOSICIONAIS DA  
LAGOA DO VIOLÃO NA SERRA SUL DE CARAJÁS: UM  
ESTUDO A PARTIR DE REGISTROS  
SISMOESTRATIGRÁFICOS**

**Dissertação apresentada por:**

**LIDIANE CRISTINA LIMA DE ARAÚJO**

**Orientador: Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA)**

---

**BELÉM  
2017**

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

---

Araújo, Lidiane Cristina Lima de, 1987-

Reconhecimento dos elementos deposicionais da lagoa do Violão na Serra Sul de Carajás: um estudo a partir de registros sismoestratigráficos / Lidiane Cristina Lima de Araújo. – 2017.

xv, 60 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Pedro Walfir Martins e Souza Filho

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2017.

1. Sedimentação e depósitos – Serra dos Carajás (PA). 2. Estratigrafia de seqüências. 3. Método de reflexão sísmica. I. Título.

CDD 22. 551.353098115

---



**Universidade Federal do Pará**  
**Instituto de Geociências**  
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

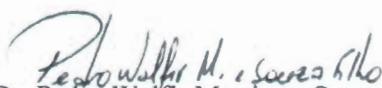
**RECONHECIMENTO DOS ELEMENTOS DE POSICIONAIS DA  
LAGOA DO VIOLÃO NA SERRA SUL DE CARAJÁS: UM  
ESTUDO A PARTIR DE REGISTROS  
SISMOESTRATIGRÁFICOS**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR  
LIDIANE CRISTINA LIMA DE ARAÚJO**

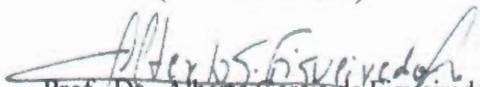
**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de  
GEOLOGIA.**

**Data de Aprovação: 21/11/2016**

**Banca Examinadora:**

  
Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho  
(Orientador-UFGPA)

  
Prof.ª Dr.ª Helenice Vital  
(Membro-UFRN)

  
Prof. Dr. Alberto Garcia de Figueiredo Jr.  
(Membro-UFG)

*A Deus, confiante e motivador nessa  
longa experiência.*

*À minha família, alicerce e amor  
incondicional.*

*Aos “velhos” e “novos” amigos,  
essenciais nessa jornada, que nunca  
me permitem perder a fé no ser  
humano.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, meu melhor amigo, pela vida e todos os momentos em que esteve comigo, colocando em meu caminho pessoas de bem. Obrigada Pai!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de Mestrado.

Ao Instituto Tecnológico Vale (ITV) e Fundação Amazônia Paraense de Amparo à Pesquisa (FAPESPA), pelo auxílio financeiro e suportes necessários durante a execução do projeto “História deposicional dos ambientes lacustres da Serra dos Carajás durante o Quaternário Tardio: evidências sismo-estratigráficas, sedimentológicas, biogeoquímicas e palinológicas”, o qual este trabalho é atrelado.

Ao prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho, meu orientador, pela confiança e esclarecimentos durante o desenvolvimento desta dissertação, além da compreensão nos momentos de necessidade. Aqui expresso meu respeito e admiração pelo profissional e ser humano que é.

Ao Laboratório de Oceanografia Geológica e Geofísica Marinha (LIOG) que permitiu a minha estadia durante parte da realização do Mestrado.

Ao Laboratório de Análises de Imagens do Trópico Úmido (LAIT) pelo apoio e recursos necessários até o final do curso.

Aos professores do PPGG pelos ensinamentos fundamentais inseridos ao trabalho e levados para toda a vida profissional.

Aos meus pais Francisca e Luíz por serem a base da minha formação pessoal e profissional, que com todo amor lutaram para proporcionar a mim e minhas irmãs, toda a educação necessária que não puderam dispor. Às minhas irmãs, Lílian e Liliane, pelo apoio e ensinamentos de irmãs mais velhas. E ao mais novo membro da família, meu sobrinho Lucas, que há quatro anos, torna os nossos dias mais felizes e “irritantes”. Amo vocês incondicionalmente.

Ao meu cunhado e ótimo geólogo, Eduardo Souza pela revisão do trabalho em momentos importantes.

Aos amigos e profissionais que integram a Coordenação de Ciências da Terra e Ecologia (CCTE) do Museu de Pesquisa Paraense Emílio Goeldi (MPEG) pelo acolhimento, suporte e ensinamentos, principalmente, na fase final da dissertação. Minha gratidão ao prof. Msc. Amílcar Mendes pela ajuda e compreensão, a Fran pela amizade, companheirismo e generosidade sendo telespectadora assídua deste trabalho, ao amigo Gustavo pela solicitude e

preocupação desde sempre, à Priscila pelos momentos de descontração e ajuda e a mais recente colaboradora Heloísa Vargas, que disponibilizou seu tempo e experiência na evolução deste trabalho.

As amigas que fiz durante o curso, Larissa, Lorena e Jaqueline que foram essenciais dentro e fora dele. Obrigada pela atenção, carinho e descontrações.

Aos amigos de longa data que, indiretamente, me apoiam na vida e que o destino ainda mantém ao meu lado.

Ofereço meus sinceros agradecimentos, a todos que colaboraram de alguma forma, para a realização deste trabalho.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes” —  
Marthin Luther King.

## RESUMO

A sismoestratigrafia é uma das principais ferramentas utilizadas para a caracterização de seqüências e fácies sísmicas, cuja interpretação é baseada nos conceitos de estratigrafia de seqüências. O presente estudo objetiva o reconhecimento e mapeamento dos elementos sismo-deposicionais da Lagoa do Violão – Serra Sul de Carajás – visando compreender o seu preenchimento sedimentar, diante da importância de ambientes lacustres sob os aspectos paleoambientais, principalmente em regiões tropicais. A Lagoa do Violão está inserida no platô S11D, desenvolvida sobre crostas lateríticas ferruginosas a uma altitude ~720 m acima do nível do mar. É uma bacia hidrográfica de 1.836 km<sup>2</sup>, alongada na orientação NW-SE, morfológicamente, semelhante a um violão. As etapas da pesquisa incluíram aquisição, tratamento e interpretação dos dados sísmicos rasos. Para a aquisição foi utilizado o sistema *Bathy 2010PC*<sup>TM</sup> da marca *SyQwest* de frequências 12 kHz e 3,5 kHz operando simultaneamente com o auxílio de DGPS. Foram coletados 22 perfis entre os dias 08/09 e 12/09/2014, tratados nos *softwares* sísmicos *Reflex Win* e *Kingdom® Suite*. Os perfis de 12 kHz garantiram maior qualidade de informações em relação aos de 3,5 kHz, sendo escolhidos os seis mais representativos quanto aos elementos sismo-deposicionais e padrões de ecocaráter. Foram reconhecidas três unidades sismoestratigráficas (USI, USII, USIII), classificadas em ordem cronológica da base para o topo. As US's repousam sobre o embasamento rochoso/acústico que afloram nas extremidades da lagoa, estendendo-se até 25 m em subsuperfície. Sua morfologia pode ser comparada a uma bacia de lavar roupa (“*washing basin*”) de margens íngremes e fundo relativamente plano. Seus refletores internos, por vezes descontínuos, compõem-se de baixa a média amplitude do sinal, ao contrário das suas superfícies limítrofes. A USI é caracterizada por uma sucessão progradacional, depositada a partir de fluxos gravitacionais que formam frentes deltaicas em condições de lagoa alta. A USII e USIII representam fácies plano-paralelas, concordantes entre si com refletores relativamente suaves. O reconhecimento de 7 ecofácies permitiu a relação entre as assinaturas acústicas presentes e dados de distribuição de sedimentos superficiais de fundo realizados em trabalhos anteriores, o qual possibilitou uma visão geral da deposição superficial da Lagoa do Violão, sendo os ecos de maior reflexão relacionados, predominantemente, a sedimentos lamosos com presença de turfas e, em alguns momentos, à lama orgânica ou oxidada, que favorecem a ocorrência de gases nos interstícios sedimentares oriundos da decomposição de matéria orgânica. Em contrapartida, reflexões de médio a baixo contraste de impedância se remetem a areia muito fina com teor de lama considerável e boa

propagação. O reconhecimento e interpretação dos padrões sismoestratigráficos identificou diferentes processos de preenchimento sedimentar da Lagoa do Violão. A USI é caracterizada por uma sucessão progradacional dos estratos e, a medida que se aproxima do depocentro, os estratos das USII e USIII, se dispõem mais uniformes, em forma de drapes, sobre uma superfície parcialmente irregular sob condições de baixa energia influenciada por fluxos superficial e intermediário, cuja deposição se dá por suspensão.

Palavras-chave: Sismoestratigrafia. Elementos Depositionais. Lagos de Platô. Serra Sul de Carajás.

## ABSTRACT

The sismoestratigraphy is one of the main tools used for the characterization of sequences and seismic facies, whose interpretation is based on the concepts of stratigraphic sequences. This study aims at the recognition and mapping of earthquake-depositional elements of Violão Lake - Serra Sul de Carajás - seeking to understand their sedimentary fill, considering the importance of lacustrine environments in the paleoenvironmental aspects, especially in tropical regions. The Violão Lake is part of the S11D plateau, built on lateritic ferruginous crusts at an altitude ~ 720 m above the sea level. It is a watershed of 1,836 km<sup>2</sup>, elongated in the NW-SE orientation, morphologically similar to a guitar. The research steps include acquisition, processing and interpretation of shallow seismic data. For the acquisition was used Bathy 2010PC™ brand system SyQwest frequency 12 kHz and 3.5 kHz operating simultaneously with the aid of DGPS. They were collected 22 days profiles between 08/09 and 12/09/2014, treated in seismic software Reflex Win and Kingdom® Suite. 12 kHz profiles guaranteed greater quality information in relation to 3.5 kHz, and the six selected as the most representative elements earthquake-depositional patterns and ecocaráter. Stratigraphics three units were recognized (USI, USII, USIII), classified in chronological order from bottom to top. The US's rest on the rocky basement / acoustic that outcrop in the lake edges, extending to 25 m in the subsurface. Their morphology can be likened to a bowl of washing ("washing basin") of steep margins and relatively flat bottom. Their internal reflectors, sometimes discontinuous, made up of low to medium signal amplitude, unlike their neighboring surfaces. The USI is characterized by a progradational succession deposited from gravitational flow forming delta fronts for high lake conditions. The USII and USIII represent facies plane-parallel, consistent with each other relatively soft reflectors. The recognition of 7 ecofacies allowed the relationship between the present acoustic signatures and the data of the distribution of superficial bottom sediments performed in previous works, which allowed an overview of the surface deposition of the Violão Lake, being the echoes of greater reflection related, predominantly, lamosos sediments with presence of peat and, in some moments, organic or oxidized sludge, favoring the occurrence of gases in the sedimentary interstices resulting from the decomposition of organic matter. In contrast, medium reflections low impedance contrast to refer to very fine sand with considerable mud content and good spread. Recognition and interpretation of stratigraphics standards identified different sedimentary filling processes of Violão Lake. The USI is characterized by a progradational succession of strata and, as they approach the depocenter, the strata of USII and USIII if have more

uniform, as drapes in on a partially uneven surface under conditions of low energy influenced by flows shallow and intermediate, whose deposition occurs by suspension.

Keywords: Sismoestratigraphy. Depositional elements. Lakes Plateau. Serra Sul de Carajás.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Localização da Serra Sul de Carajás. A figura 1a corresponde ao mapa geológico da Serra Sul e as figuras 1b e 1c mostram, respectivamente, o mapa batimétrico e a vista panorâmica da lagoa. ....	4
Figura 2 -	(A) Vegetação de campo rupestre e (B) vegetação de capão florestal da Lagoa do Violão. Em (C), vista panorâmica da Lagoa Violão margeada por crostas lateríticas e presença de vegetação arbustiva. ....	6
Figura 3 -	Mapa Geomorfológico da Serra Sul. ....	8
Figura 4 -	Perfilagem Sísmica Contínua: geometria do arranjo para aquisição de dados ...	12
Figura 5 -	Padrões de configurações de fácies sísmicas .....	15
Figura 6 -	Padrões de terminação lateral de reflexões/estratos nos limites superior e inferior de uma sequência deposicional. ....	16
Figura 7 -	Imagem WorldView-2 na composição colorida 4R5G3B ilustrando as linhas do levantamento sísmico na Lagoa do Violão. ....	18
Figura 8 -	Levantamento sísmico. Em A e B estão os respectivos transdutores de 12 kHz e 3,5 kHz; em C a navegação e posicionamento sísmicos em tempo real e em D o Sistema de montagem e aquisição sísmica com o equipamento <i>Bathy 2010PC™</i> da marca <i>SyQwest</i> .....	19
Figura 9 -	Perfil Transversal <i>T11</i> bruto coletado nas frequências de 3,5 e 12 kHz. ....	20
Figura 10 -	Principais etapas de análise e aplicação do tratamento nas seções de sísmica rasa. ....	21
Figura 11 -	Modelo topográfico e perfil sísmico demonstrando a morfologia atual de fundo da Lagoa do Violão. ....	24
Figura 12 -	Unidades Sismoestratigráficas identificadas na lagoa do Violão. Cada unidade está associada a uma sismossequência limitada na base e no topo por superfícies estratigráficas. ....	26
Figura 13 -	Perfil Sísmico longitudinal <i>L2</i> , referente à borda NE da lagoa Violão, com sua respectiva interpretação .....	29
Figura 14 -	Perfil Sísmico longitudinal <i>L7</i> , referente à borda SW da lagoa Violão, com sua respectiva interpretação .....	31
Figura 15 -	Perfil Sísmico transversal <i>T1</i> , referente ao canal principal (NW da lagoa), com sua respectiva interpretação .....	32

Figura 16 - Perfil Sísmico transversal <i>T5</i> referente à entrada do canal principal da lagoa ..	33
Figura 17 - Perfil Sísmico transversal <i>T8</i> localizado na região central da lagoa.....	35
Figura 18 - Perfil Sísmico transversal <i>T11</i> , levantado à borda SE da lagoa Violão .....	37
Figura 19- Áreas de ocorrência dos padrões de reflexão interna presentes na Lagoa do Violão.....	39
Figura 20 - Modelos de isópacas correspondentes à cada camada deposicional encontrada nas unidades. ....	42
Figura 21 - Modelo em planta do embasamento, indicando as respectivas profundidades atingidas, e modelo de isópacas total do pacote sedimentar da Lagoa Violão com suas respectivas espessuras.....	42
Figura 22 - Em (A), é mostrado o mapa de distribuição dos ecocaráteres reconhecidos em cada perfil levantado, em (B) observa-se o mapa de distribuição geral ao longo da lagoa. E (C), tem-se a classificação dos ecos nas seções mais representativas.....	45
Figura 23 - Descrição sedimentológica superficial da lagoa do Violão. Em (A) tem-se a classificação dos sedimentos clásticos com base em Folk & Ward (1957) e (B) mostra a classificação de fácies do depósito sedimentar superior com base em clastos e descrição orgânica. Em segundo plano, a figura mostra a relação entre os diferentes tipos de ecos encontrados e a distribuição sedimentológica superficial da lagoa .....	46

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>EPÍGRAFE</b> .....	vii
<b>RESUMO</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	xii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA .....	2
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 <b>Objetivo Geral</b> .....	2
<b>2 A SERRA SUL DA PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS</b> .....	4
2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA .....	4
2.2 ASPECTOS FÍSIOGRÁFICOS.....	4
2.3 ASPECTOS GEOLÓGICOS .....	6
2.3.1 <b>Geomorfologia</b> .....	6
2.3.2 <b>Evolução Tectono-Sedimentar</b> .....	9
<b>3 SISMOESTRATIGRAFIA</b> .....	12
3.1 ABORDAGEM GERAL .....	12
3.2 SISMOESTRATIGRAFIA EM SÍSMICA RASA.....	12
3.3 INTERPRETAÇÃO SISMOESTRATIGRÁFICA.....	14
3.3.1 <b>Fácies Sísmicas</b> .....	14
3.3.2 <b>Padrões de Terminações de Reflexões</b> .....	15
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	17

4.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	17
4.2 TRATAMENTO DOS DADOS DE SÍSMICA RASA.....	20
4.2.1 <b>Apresentação dos dados</b> .....	20
4.2.2 <b>Fluxo de Tratamento</b> .....	21
4.3 RESPOSTA E INTERPRETAÇÃO DAS SEÇÕES SÍSMICAS .....	22
<b>5 RESULTADOS</b> .....	23
5.1 MORFOLOGIA ATUAL DA SUPERFÍCIE DE FUNDO .....	23
5.2 MORFOLOGIA DE SUBSUPERFÍCIE .....	24
5.2.1 <b>Embasamento Acústico</b> .....	24
5.2.2 <b>Reconhecimento das Unidades Sísmicas</b> .....	25
5.2.3 <b>Descrição das Unidades Sismoestratigráficas</b> .....	26
5.3 DESCRIÇÃO DOS PERFIS SÍSMICOS .....	28
5.4 PADRÕES INTERNOS DE REFLEXÃO .....	38
5.4.1 <b>Distribuição dos Padrões Internos de Reflexão</b> .....	38
5.5 ESPESSURA DAS CAMADAS .....	40
5.6 CLASSIFICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS PADRÕES DE ECOCARÁTER .....	43
<b>6 DISCUSSÃO</b> .....	47
6.1 MORFOLOGIA ATUAL DA SUPERFÍCIE DE FUNDO.....	47
6.2 MORFOLOGIA DE SUBSUPERFÍCIE .....	48
6.3 PADRÕES DE ECOCARÁTER E OCORRÊNCIAS DE ACUMULAÇÕES DE GÁS EM SEDIMENTOS SUPERFICIAIS .....	50
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	53
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	55

## 1 INTRODUÇÃO

A caracterização superficial e subsuperficial de áreas submersas rasas, tais como rios, ambientes transicionais, áreas costeiras e plataforma continental interna, são extremamente importantes na investigação geológica e geotécnica, seja para fins acadêmicos ou na aplicação direta do conhecimento adquirido (Souza, 2006). Nesse contexto, o uso de métodos geofísicos, em particular a sísmica de alta resolução vem aumentando nos últimos anos devido às vantagens da sua aplicabilidade (Tóth *et al.* 1997) dentre elas a grande precisão e resolução do dado obtido, modelamento e aumento da curacidade da geometria interna e externa dos substratos.

Embora a resolução sísmica diminua com a profundidade, diversos elementos deposicionais podem ser imageados e, por conseguinte, caracterizados a partir da combinação entre reflexão sísmica e atributos sísmicos. O estudo da estratigrafia por meio de dados sísmicos pode ser realizado a partir da aplicação dos princípios e técnicas de interpretação baseados nos conceitos denominados por (Posamentier *et al.* 2012) de Estratigrafia de Sequências, cuja resultante é o refinamento do modelo deposicional do sistema diretamente imageado.

No caso dos ambientes lacustres, representam importantes ferramentas à investigação, não somente por atuar como fonte de recursos hídricos para o homem, mas também como fortes marcadores das condições paleoambientais e geológicas que caracterizaram o planeta durante o Pleistoceno e o Holoceno (Costa *et al.* 2007).

Lagos desenvolvidos sobre crostas lateríticas ferruginosas na região Amazônica apresentam-se como marcadores paleoambientais dessa região sendo, primeiramente, objeto de estudo palinológico, porém com poucas informações a respeito da evolução e preenchimento sedimentar dessas pequenas bacias.

Inúmeros lagos sobre as crostas lateríticas são encontrados tanto na Serra Norte como na Sul em Carajás, que ocupam depressões restritas parcialmente interligadas e fechadas, portanto coletores de materiais detríticos e orgânicos a exemplo dos lagos de Seis Lagos e em Carajás (Absy *et al.* 1991), Soubiés *et al.* (1991), Van der Hammen & Absy (1994), Corrêa (1996); Hooghiemstra & Van der Hammen (1998); Suguio (1999); Colinvaux *et al.* (2000), Mayle *et al.* (2000), Elias *et al.* (2001), Sifeddine *et al.* (2001), Bush *et al.* (2002), Turcq *et al.* (2002), Sifeddine *et al.* (2004) e Costa *et al.* (2005b), os quais permitem identificar mudanças paleoclimáticas nos últimos 50,000 anos A.P.

O platô S11D (Serra Sul-bloco 11D) está inserido no conjunto de 45 platôs da Serra Sul, situados na Província Mineral de Carajás, no sudeste do Pará. Nesta área, encontram-se várias lagoas restritas de formas variadas, como é o caso da Lagoa do Violão, um dos principais sistemas lacustres, que tem suas formações associadas à degradação das crostas ferruginosas e processos estruturais atuantes (Maurity & Kotchoubey 1995). São ambientes rasos que, mesmo sem influência fluvial, possuem diversos controladores no processo de fluxo sedimentar para essas bacias, tais como a morfologia, parâmetros limnológicos, circulação e variação nos níveis de água devido às condições pluviométricas (Talbot & Allen, 1996; Bridge & DeMicco, 2008; Dietze *et al.* 2010).

## 1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA

Lagos se apresentam como importantes materiais para a pesquisa paleoambiental e geológica locais, com crescente interesse nas ocorrências paleoclimáticas e evolutivas, principalmente em regiões tropicais. Este é o caso dos lagos ou lagoas de topo de Platô das Serras de minérios de ferro de Carajás, cuja origem e evolução ainda são pouco conhecidas. Levando em consideração esta premissa, este trabalho concentra esforços na compreensão da história deposicional de uma dessas lagoas, levantando informações sobre o processo de formação e consequente evolução desses ambientes, em particular a lagoa do Violão, utilizando uma abordagem ainda não atribuída na investigação do preenchimento dos lagos de platô na região Amazônica, contribuindo assim, para o entendimento evolutivo e dos processos sedimentares atuantes.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 **Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo reconhecer e mapear os elementos arquiteturais dos depósitos sedimentares da Lagoa do Violão, Serral Sul de Carajás, a partir de registros sismoestratigráficos, a fim de compreender a história do preenchimento sedimentar dessa bacia lacustre. Para que este objetivo seja alcançado é necessário: i) definir, classificar e interpretar padrões sismoestratigráficos obtidos a partir de perfis sísmicos de alta resolução,

bem como; ii) identificar e mapear a distribuição das fácies sísmicas da lagoa do Violão; iii) integrar os dados sísmicos e estratigráficos e iv) contribuir para o entendimento da evolução desta bacia e sua inserção dentro do quadro evolutivo da região Amazônica, a partir do Quaternário Tardio.

## 2 A SERRA SUL DA PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

### 2.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo está inserida no contexto da Província Mineral de Carajás, localizada no município de Parauapebas, centro-leste do estado do Pará, constituída por conjunto de platôs denominados serras Norte, Sul, Leste, Sossego entre outras. A Lagoa Violão (figura 1) localiza-se na Serra Sul de Carajás, mais especificamente na Serra S11, a uma altitude em torno de 730 m. É uma pequena bacia hidrográfica de forma alongada semelhante a um violão com 1.836 km<sup>2</sup> e orientação NW/SE (Sahoo *et al.* 2015).

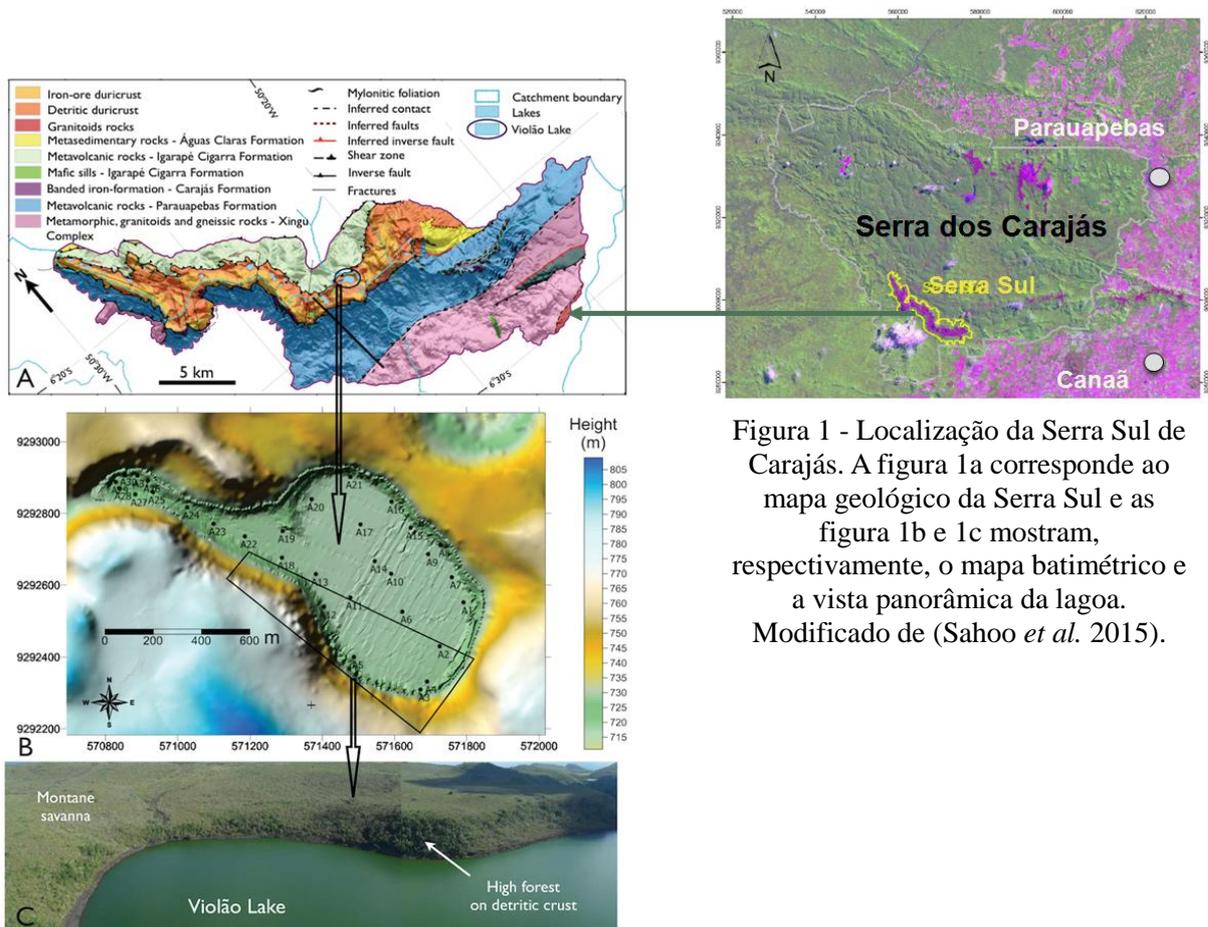


Figura 1 - Localização da Serra Sul de Carajás. A figura 1a corresponde ao mapa geológico da Serra Sul e as figura 1b e 1c mostram, respectivamente, o mapa batimétrico e a vista panorâmica da lagoa. Modificado de (Sahoo *et al.* 2015).

### 2.2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

A Serra dos Carajás é caracterizada por extensos platôs alongados intercalados com vales encaixados e fechados, em forma de “V” e, por vezes, abertos em forma de “U” onde

ocorrem as planícies aluvionares. Os platôs se alongam na direção leste-oeste a noroeste-sudeste com elevações que variam entre 350 a 700 m. Possuem superfícies sub-plana, ondulada e fortemente ondulada, cujos topos são caracterizados pelo aparecimento de cangas ferruginosas, no qual se desenvolveram inúmeras depressões. As bordas dos platôs comumente terminam em escarpas com desníveis abruptos de até 300 m (Carvalho, 2010).

O clima da região de Carajás é do tipo equatorial super-úmido, classe Am transição Aw segundo Koeppen. Possui uma temperatura média anual de 26°C e com umidade relativa do ar alta, em torno de 85%, contando com uma época relativamente seca entre junho a outubro e uma estação de maior precipitação e umidade que vai de novembro a maio, com médias pluviométricas anuais muito variáveis, em torno de 1500 a 2000 mm/ano (Soubiès *et al.* 1991).

A principal rede hidrográfica da região de Carajás é o rio Itacaiúnas, pertencente à bacia do rio com o mesmo nome, cujo maior tributário é o rio Parauapebas. A rede de drenagem de primeira ordem é, geralmente, intermitente com escoamento somente na estação chuvosa. Já na superfície dos platôs, são frequentes os cursos de água temporários, os quais alimentam as lagoas rasas em pequenas depressões (Relatório Técnico ITV, 2013). Algumas dessas lagoas também se apresentam como intermitentes, porém a lagoa Violão possui caráter perene com aporte de nascentes que surgem em porções mais elevadas do platô S11.

Ao longo de toda a Serra Sul S11, o relevo é escarpado, com ravinamento intenso, esculpido sobre crostas ferruginosas e formações ferríferas bandadas lateritizadas, densas e magnéticas com alto nível de minério de ferro (Carvalho, 2010). Apesar de ser referida como um platô, a S11 é composta por superfícies inclinadas, colinosas em diferentes graus, portadoras de drenagens temporárias e outras lagoas subcirculares do tipo “doliniformes” de pequeno a médio porte, parcialmente preenchidas e aplainadas por sedimentos lacustres, pantanosos, ocupados por vegetação, que varia de gramíneas (savanas) a formações arbustivas. Tais lagoas estão associadas a zonas de baixa permeabilidade e, possivelmente, a condições pseudocársticas dado a ocorrência de cavernas na área, mesmo nos platôs ferríferos (Maurity e Kotschoubey 1995).

A área onde se localiza a Lagoa do Violão constitui a superfície mais elevada da Serra Sul, de topo ondulado a semi-plainado coberto por savana metalófila e circundada por exuberantes formações arbóreas e floresta tropical densa (figura 2). São encontradas nos pequenos vales com níveis de colinas e platôs mais rebaixados, respectivamente, que cortam essa superfície Golder Associates (2010). Corresponde a uma bacia hidrologicamente restrita, margeada por afloramentos associados às crostas ferruginosas medindo 0,3 km<sup>2</sup> de superfície

e 600 m de circunferência, com comprimento e largura máximos de 1096 m, na direção NW/SE, e 380 m a NE/SW, respectivamente. É preenchida por sedimentos lacustres e/ou coluvionares ocupados, principalmente, pela vegetação local de menos de 2 m de altura (Nunes, 2009), influenciando a sedimentação orgânica superficial da lagoa. A entrada mais importante de água para a lagoa do Violão ocorre no seu extremo sul, como pode ser observado na figura 3, que mostra as principais drenagens para esta área.

A partir dos resultados adquiridos por Souza Filho (*et al.* 2016) em associação à classificação de ambientes lacustres realizados por Tundisi & Matsumura Tundisi (2008) e por Von Sperling (1999), a lagoa do Violão é considerada pequena, côncava e em forma de “U”, com profundidade média de 15 m.



Figura 2 - A) Vegetação de campo rupestre e B) vegetação de capão florestal nas margens da Lagoa do Violão. Em (C), vista panorâmica da Lagoa do Violão margeada por crostas lateríticas e presença de vegetação arbustiva.

Fonte: Do autor.

## 2.3 ASPECTOS GEOLÓGICOS

### 2.3.1 Geomorfologia

Com as formações e o retrabalhamento das unidades arqueanas, instalou-se na região da Serra de Carajás um clima tropical úmido durante o Cenozóico, favorecendo o intemperismo

intensivo que passou a controlar a sedimentação, desencadeando, frequentes processos erosivos nos quais configuraram a atual província mineral, principalmente sobre metavulcanitos básicos, formações ferríferas do Arqueano e das rochas sedimentares (Maurity e Kotschoubey 1995).

Durante a evolução quaternária tardia, os ciclos de alternância climática resultaram na formação de extensas crostas lateríticas nos períodos secos, acompanhada de vegetação do tipo savana e destruição parcial da crosta por subsidência da zona saprolítica subjacente. Já nos períodos úmidos, de maior duração, houve a expansão das florestas abertas, com consequente surgimento de depressões pseudocársticas e doliniformes ligadas à fixação de sistemas lacustres, que por sua vez, formaram-se a partir de depressões centrais sobre os platôs, mesmo com a baixa permeabilidade e capacidade erosiva da crosta laterítica Soubiés *et al.* (1991).

Dentre os aspectos geomorfológicos da região, Resende e Barbosa (1972) descrevem os vales cobertos por matas virgens, serras alongadas e íngremes e ainda, chapadas erguidas acima da floresta densa, cujas feições morfológicas englobam áreas predominantemente planas e alongadas; espigões alongados com topos suaves ou planos esculpido sobre o minério de ferro; depressões fechadas com a ocorrência de muitas lagoas e brejos temporários ou perenes em áreas planas e rebaixadas.

A partir dos dados fornecidos pela EIA RIMA I -S11D elaborado pela Golder Associates (2010) foram identificadas e mapeadas as unidades geomorfológicas observadas na figura 3 a seguir.

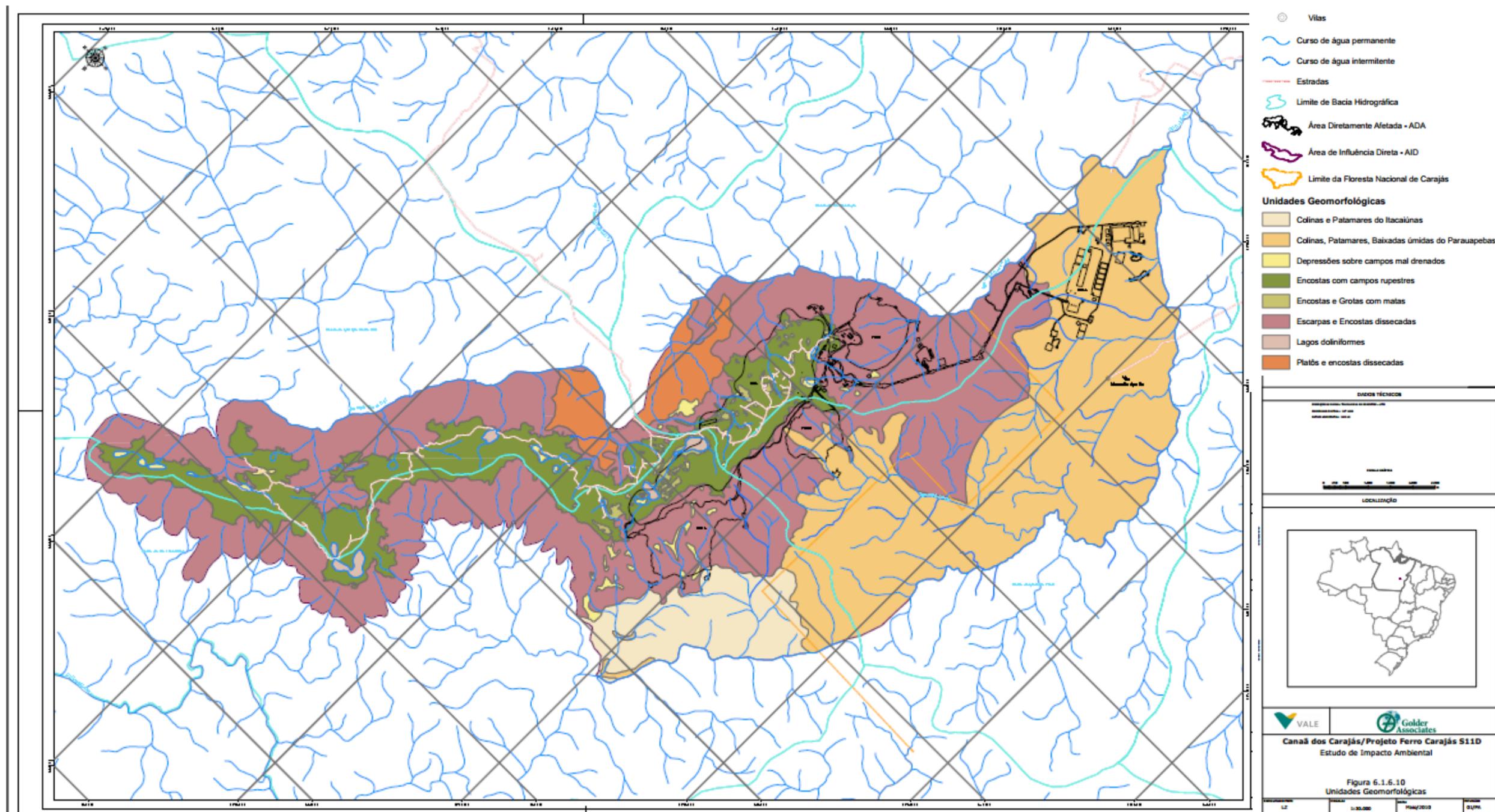


Figura 3 - Mapa Geomorfológico da Serra Sul.

Fonte: Relatório de Estudos de Impactos Ambientais I – EIA RIMA – Projeto. Ferro Carajás S11D RT-079-515-5020-0029-02-J/Golder Associates (2010).

As principais feições pseudocársticas ocorrentes são cavernas, dolinas e depressões superficiais que abrigam lagos rasos, em sua maioria, temporários. De um modo geral, essas feições desenvolveram-se a partir de um horizonte aparentemente descontínuo chamado de zona de baixa densidade, localizada na interface saprólito/crosta, que nada mais é do que a laterita degradada, porosa e permeável produto da alteração intempérica (Maurity e Kotschoubey 1995).

Os autores supracitados afirmam que a evolução de tais feições, desenvolvidas em condições atípicas (lateritas), despertam interesse quanto a sua origem e às associações mineralógicas neofornadas em seu interior. A formação está associada ao rebaixamento do nível de base, provavelmente resultante do tectonismo epirogenético, que pode ter afetado toda região no Terciário Superior e/ou Quaternário.

Maurity e Kotschoubey (1994a) relacionam a evolução dessas formas a três estágios: estágio protopseudocárstico, o qual corresponde à formação abaixo da crosta laterítica, a partir da geração de zonas de baixa densidade, alta porosidade e permeabilidade; o estágio de pseudocarstificação, intermediário, caracterizado pela eluviação química e degradação da parte inferior, abaixo da crosta, formando cavernas nas bordas do platô.

### 2.3.2 Evolução Tectono-Sedimentar

A Província Carajás, localizada na borda sudeste do Cráton Amazônico, no estado do Pará, é uma das mais importantes reservas minerais do Brasil contendo os depósitos de ferro de classe mundial de mineração, tais como Serra Norte, Serra Sul, Serra Leste e Serra de São Felix (Gibbs & Wirth 1990), além de Au, Cu, Mn, Ni e Pt sendo formada por rochas de idades arqueanas e paleoproterozóicas (Machado *et al.* 1991, Pimentel & Machado 1994, Macambira & Lafon 1995), que se apresentam em dois segmentos crustais, um ao norte e outro ao sul (Araújo *et al.* 1988).

A parte sul da região de Carajás, onde está situada a lagoa do Violão, é constituída por rochas do Supergrupo Itacaiúnas (cerca de 2,76 Ga.; Olszewski *et al.* 1989.; Machado *et al.* 1991) e Formação Águas Claras (ca 2,68 Ga.; Mougeot *et al.* 1996) (Fig. 1a). O Supergrupo Itacaiúnas inclui o Grupo Grão-Pará, formado por rochas vulcânicas máficas e félsicas intercaladas por lentes de formações ferríferas (BIF) da Formação Carajás (Rosière *et al.* 2005) variando praticamente de rochas não deformadas a fortemente deformadas (DOCEGEO, 1988; Olszewski *et al.* 1989) (figura 1a).

#### ❖ Sequências Metassedimentares e Metavulcanossedimentares Neoarqueanas

Macambira (1991) subdivide o Grupo Grão Pará em quatro sub-unidades, sendo da base para o topo a Formação Parauapebas, Formação Carajás, Formação Igarapé Cigarra e Formação Igarapé Boa Sorte, esta não ocorrendo nas adjacências da área de trabalho.

A Formação Parauapebas (Meireles *et al.* 1991) é formada por basaltos, basaltos andesíticos, shoshonitos e riolitos, cortados por corpos quartzo-dioríticos (Gibbs *et al.* 1986; Teixeira, 1994), metamorfisados na fácies xisto-verde e pouco deformados. As sequências vulcânicas desta Formação foram formadas em ambiente tipo rift continental (Olszewski *et al.* 1989; Meirelles & Dardenne 1991).

Já a Formação Carajás abriga as formações ferríferas bandadas, fácies óxido, tipo jaspelito, em grande parte transformada em minério hematítico predominantemente a hematita mole. Há presença de dolomitos observados por Teixeira (1994) na base da formação em contato gradacional com as formações ferríferas.

De acordo com Mdgeo (2006) a Formação Cigarra assemelha-se com a Formação Parauapebas em relação à mineralogia, principalmente pelo fato de que ainda não foi totalmente mapeada.

Sobre estas rochas arqueanas a paleoproteróicas de terrenos granito-greenstones e formações ferríferas e manganesíferas, desenvolveram espessos pacotes de formações lateríticas cenozóicas, que em suas depressões, foram posteriormente ocupadas por ambientes lacustres. Essas coberturas, denominadas como cangas, são produtos de alteração intempérica das sequências características da região de Serra Sul de ampla expressão e sustentação devido a sua resistência à erosão. Ocorrem de formas variadas dependendo do substrato rochoso sobre o qual veio a se desenvolver e que tipo de intemperismo veio a se originar. Podem ser de três tipos: canga química, formada a partir do intemperismo químico, canga de minério, formada por intemperismo químico e detríticos e, Hematita Laminada Lateritizada caracterizada por laminações com estruturas parcialmente preservadas devido à formação de horizontes cimentados por minerais de ferro (EIA RIMA I -S11D - Golder Associates (2010).

#### ❖ Coberturas Quaternárias e Recentes

Correspondem à coberturas de grande horizontalidade, de pequenas espessuras originadas a partir de processos aluvionares, coluvionares e de acumulação tipo talús.

Os depósitos de talús, também considerados como blocos de canga que compõem parte da área, concentram-se expressivamente nos bordos do platô da formação ferrífera a jusante de bruscas rupturas de relevo nos qual caracteriza uma dinâmica de dissecação intensa. Outros depósitos ainda de talús, estão restritos ao sopé das rupturas de relevo ao norte e sul das escapas que acompanham o espigão serrano com rochas das formações Carajás e Parauapebas. São compostos por uma mistura de solos, blocos fragmentados de rochas constituindo depósitos heterogêneos configurando sopés de espigão nos quais se transformam para depósitos coluvionares.

### 3 SISMOESTRATIGRAFIA

#### 3.1 ABORDAGEM GERAL

A Estratigrafia Sísmica ou Sismostratigrafia é uma ferramenta de interpretação estratigráfica baseada na análise dos padrões de reflexões sísmicas observados em amostragens sísmicas o qual permite, de acordo com Ribeiro (2000), uma melhor compreensão da evolução tectono-sedimentar de uma bacia a partir da definição de sua sequência deposicional e de suas fácies sedimentares.

A geofísica é uma importante ferramenta para a investigação indireta do fundo e subfundo marinho pela qualidade de seus resultados e pela facilidade de aplicação de seus métodos não destrutivos (Ayres Neto, 2001).

Dentre as investigações geofísicas, Souza (2006) descreve que a sísmica de alta resolução é um método baseado na emissão de ondas acústicas com transmissão e reflexão entre dois ou mais meios físicos de propriedades elásticas distintas (figura 4). Dessa forma, o autor supracitado ressalta que, a partir da geração de ondas sísmicas por uma fonte acústica, o sinal é refletido sempre que encontra meios de diferentes impedâncias acústicas e a energia não refletida ou espalhada será transmitida às camadas abaixo.

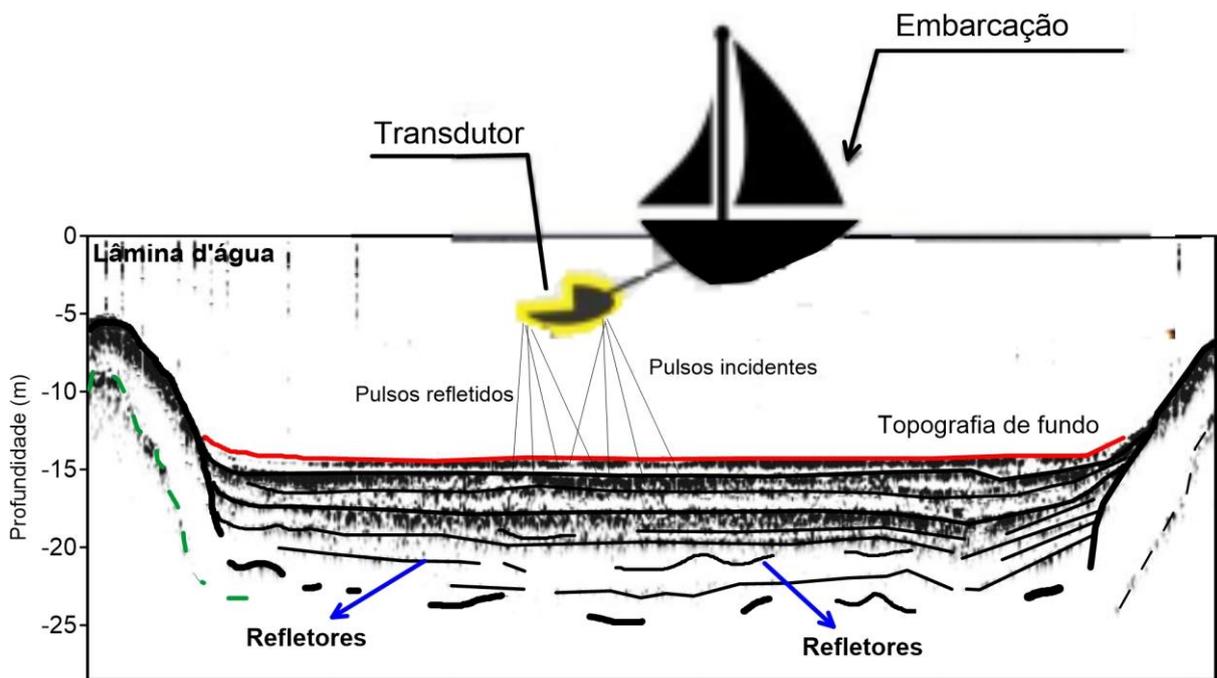


Figura 4 - Perfilagem Sísmica Contínua: geometria do arranjo para aquisição de dados. Fonte acústica sensores-embarcação Modificado de (Watanabe, 2015).

Sendo a impedância acústica o produto da velocidade sísmica pela densidade do material no qual a onda se propaga, Ayres Neto (2001) sugere que a densidade dos sedimentos de fundo é função basicamente da mineralogia, da porosidade e do teor de água. Estes fatores variam localmente em maior escala, controlando, portanto, de maneira mais intensa a impedância dos sedimentos.

A impedância acústica não é um fiel indicador de litologias, visto que reflexões sísmicas não apresentam, obrigatoriamente, correspondência com os limites dessas unidades. Reflexões com diferentes contrastes de densidade-velocidade correspondem às superfícies estratiais e discordâncias associadas a uma Sequência deposicional (SOUZA 2006).

Uma sequência deposicional é uma unidade estratigráfica composta de uma sucessão relativamente concordante de estratos (paleossuperfícies deposicionais) geneticamente relacionados e limitados no topo e na base por discordâncias (superfícies de erosão ou não deposição) ou superfícies relativamente concordantes, que são caracterizados por um refletor de maior amplitude.

As técnicas de interpretação sismoestratigráfica, se baseiam na subdivisão, correlação e mapeamento de uma sequência deposicional denominada por Posamentier (*et al.* 2012) de Estratigrafia de Sequências e a aplicação numa malha de seção sísmica permite agrupar refletores sísmicos em pacotes que correspondam a sequências sísmicas cujo conceito equivale ao de uma sequência deposicional.

Vail *et al.* (1977) dividem a interpretação sismoestratigráfica em três etapas: 1) análise de fácies sísmicas; 2) análise de sequências sísmicas; e, análise das variações relativas do nível do mar. Dessa maneira, as reflexões e/ou estratos se dispõem em paralelismo ou angularidade em relação aos limites de uma sequência, ou seja, concordante ou discordantemente. Padrões de terminação de reflexões não representam somente os limites de uma sequência, tais padrões de terminação indicam superfícies que vão delimitar unidades sísmicas a partir da uniformidade de suas características sísmicas internas e das terminações laterais de seus refletores sísmicos que, em última instância, serão interpretados como os tratos de sistemas deposicionais (RIBEIRO 2000).

### 3.2 SISMOESTRATIGRAFIA EM SÍSMICA RASA

Gomes (2009) afirma que os levantamentos sísmicos de alta resolução por perfilagem de subsuperfície, incluem em sua área operacional a coluna d'água e as primeiras dezenas de

metros de sedimentos como sendo os alvos das investigações. O autor faz ainda uma comparação, quanto ao campo de trabalhos dos métodos sísmicos. Na sísmica convencional o primeiro refletor sísmico a ser registrado representaria toda a espessura investigada na sísmica rasa no qual serão investigados as interfaces geológicas de baixa impedância acústica (baixos contrastes), baixa relação sinal/ruído e atenuação de sinais de alta frequência.

As aquisições em sísmica rasa utiliza-se de espectros de maior frequência em relação a sísmica convencional, o qual possibilita mapear pequenas feições geológicas (como as do Quaternário), investigar processos sedimentares, explorar possíveis depósitos minerais, além de atuar nos estudos de cunho biológico, dentre outros.

É importante ressaltar que ao gerar dados de alta resolução, a sísmica rasa garante a utilização de equipamentos (ecobatímetro, multifeixe, sonar de varredura lateral, perfilador sísmico) que não geram danos ambientais e ainda, dados que permitem uma boa visualização e interpretação sem a necessidade de complexos processamentos até mesmo em tempo real.

### 3.3 INTERPRETAÇÃO SISMOESTRATIGRÁFICA

#### 3.3.1 Fácies Sísmicas

Brown Jr. & Fisher (1980) conceituam fácies sísmicas como o registro das reflexões sísmicas dos fatores geológicos que as geraram como: litologia, estratificação, feições deposicionais entre outros. O seu reconhecimento e mapeamento são baseados em parâmetros definidos objetivamente através da configuração, continuidade, amplitude, frequência e velocidade intervalar interpretando-as geologicamente (RIBEIRO 2000).

Já a configuração interna das reflexões (paralela, divergente, caótica, transparente, progradante, etc.) é o parâmetro de fácies sísmica que melhor a caracteriza e, portanto, o mais comumente utilizado na sua análise. Pode ser de vários tipos, como mostrado na figura 5.

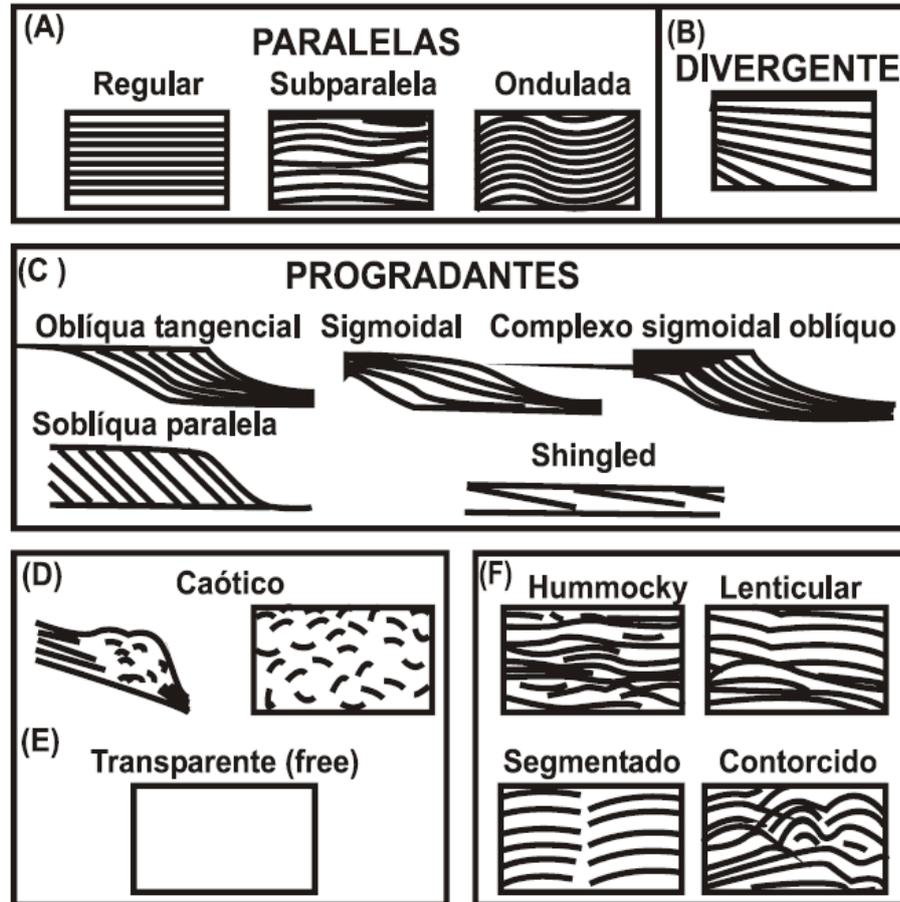


Figura 5 - Padrões de configurações de fácies sísmicas. Fonte: Ribeiro (2001).

### 3.3.2 Padrões de Terminações de Reflexões

Quanto aos padrões de terminação lateral dos refletores comumente utilizados nas interpretações sismoestratigráficas estão: *lapout*, *onlap*, *downlap*, *toplap*, concordante e truncamento erosivo (Vail *et al.* 1977), conforme descrito a seguir:

No *lapout* as reflexões terminam lateralmente em seu limite deposicional original e é dividido em *baselap* e *toplap* quando se estabelecem no limite inferior e superior da unidade sísmica, respectivamente.

O *baselap* é subdividido em *onlap* e *downlap*. O *onlap* é caracterizado pela terminação de refletores horizontais contra uma superfície inclinada, ou seja, uma discordância. Já o *Downlap*, caracteriza-se quando os refletores mergulham suavemente contra uma superfície inclinada ou horizontal. Em alguns casos tais termos podem ser confundidos, então se utiliza o termo mais abrangente de *baselap*.

A terminação em *toplap* é determinada quando os estratos se encontram contra camadas superiores sendo interpretada como produto de uma não-deposição ou erosão muito reduzida.

O paralelismo entre duas unidades sísmicas ou sequências adjacentes com a superfície que as delimitam é caracterizada pela concordância. Pode ocorrer no topo ou na base de uma sequência sísmica. Enquanto um truncamento erosivo implica em deposição de camada e seu consequente basculamento e remoção por erosão resultando em uma superfície discordante.

A figura 6 ilustra a geometria externa de fácies sísmicas cuja forma tridimensional e a expressão areal são características importantes.

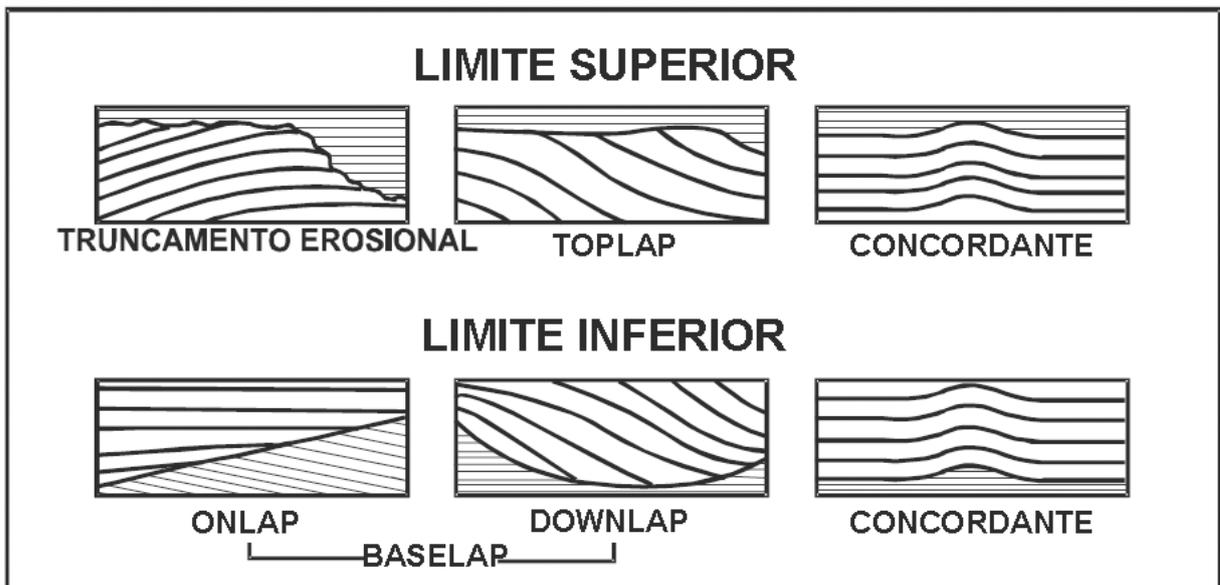


Figura 6 – Padrões de terminação lateral de reflexões/estratos nos limites superior e inferior de uma sequência deposicional. Fonte: Ribeiro (2001).

Tanto a geometria externa de fácies (lençol, cunha, banco, lente, montiforma, etc.), quanto a configuração interna das reflexões citadas anteriormente podem ser observadas nos dados de sísmica rasa dependendo do material encontrado no pacote sedimentar assim como hiatos e lacunas. Diferentemente ocorre para as unidades superiores (parassequências) e inferiores a conjunto de lâminas, pois na escala de alta resolução, é pouco comum observá-las e sim apenas o registro camadas e conjunto de camadas.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS

O levantamento de campo foi realizado entre os dias 08 e 12 de setembro de 2014 onde foram coletados 22 perfis sísmicos dispostos estrategicamente nos sentidos transversal e longitudinal visualizados na figura 7.

Para a aquisição foi utilizado o perfilador de subfundo modelo *Bathy 2010PC*<sup>TM</sup> da marca *SyQwest*. Um sistema de fonte ressonante com dois canais de frequência independentes sendo um canal destinado à frequência de 12 kHz e o outro à frequência de 3,5 kHz. Por se tratar de um sistema de tecnologia *chirp*, essas fontes fornecem dados de alta resolução (largas bandas de frequências e altas frequências), principalmente das camadas superiores, e penetração (fonte de menor frequência) com alcance de até 5.000 metros. Devido a pequena profundidade da área de estudo (~10 m de lâmina d'água com imageamento acústico de até 20 m) e o uso de uma embarcação de pequeno porte (“voadeira”), foram utilizados um transdutor de 3,5 kHz e o de 12 kHz, simultaneamente, garantindo boa penetração acústica em super e subsuperfícies. O equipamento possui dois modos de operação, o de frequência modulada (FM) e o de onda contínua (*Continuous wave - CW*), onde os dados foram adquiridos com janela de pulso retangular e velocidade do som de 1.500 m/s na água.

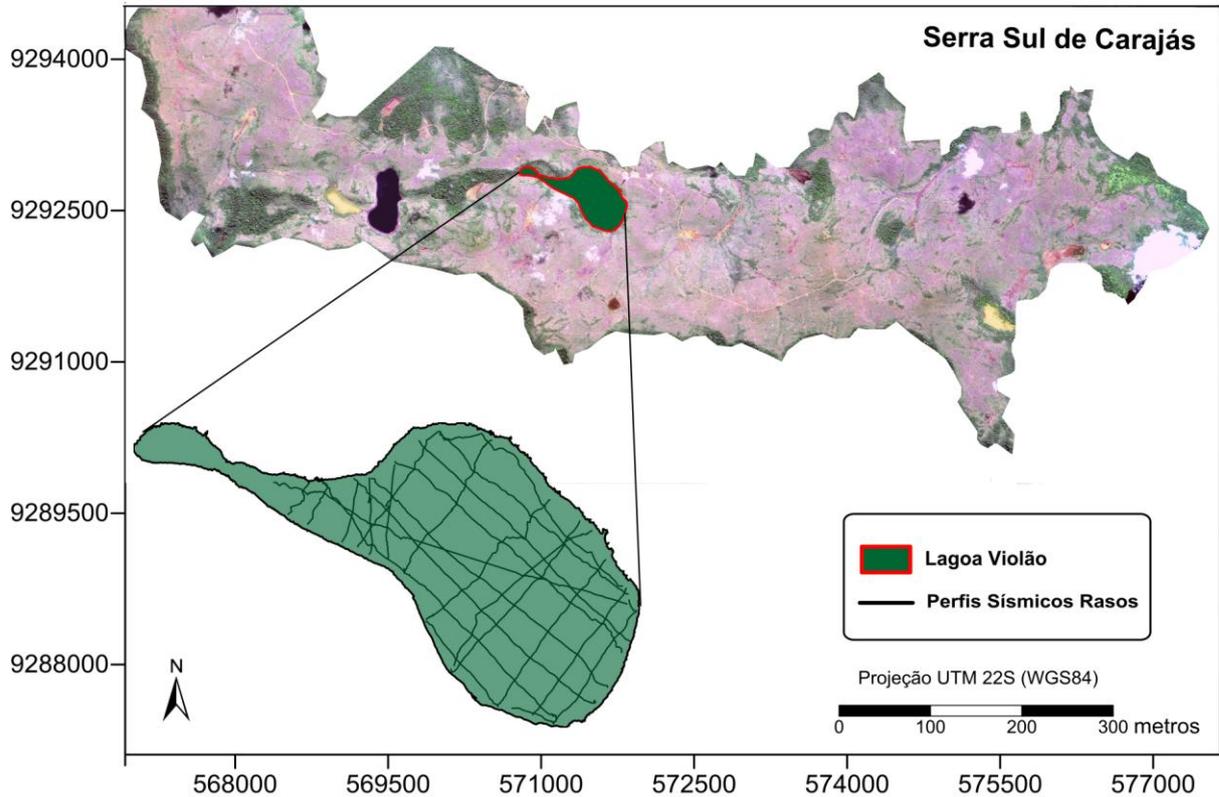


Figura 7 - Imagem WorldView-2 na composição colorida 4R5G3B ilustrando as linhas do levantamento sísmico na Lagoa do Violão.

A navegação foi realizada numa velocidade de 4.0 nós, com todos os perfis traçados a partir de uma malha densa visando uma melhor identificação da continuidade lateral dos refletores e dos eventos presentes. Para isso, as linhas foram planejadas dentro do *software GPS TrackMaker* conectado a um DGPS modelo *Trimble AG132*, com precisão de 1 m, com correção de posicionamento em tempo real pelo satélite *OmniSTAR ASAT L1 band*. A figura 8 ilustra todos os equipamento utilizados durante a campanha de coleta dos dados sísmicos.

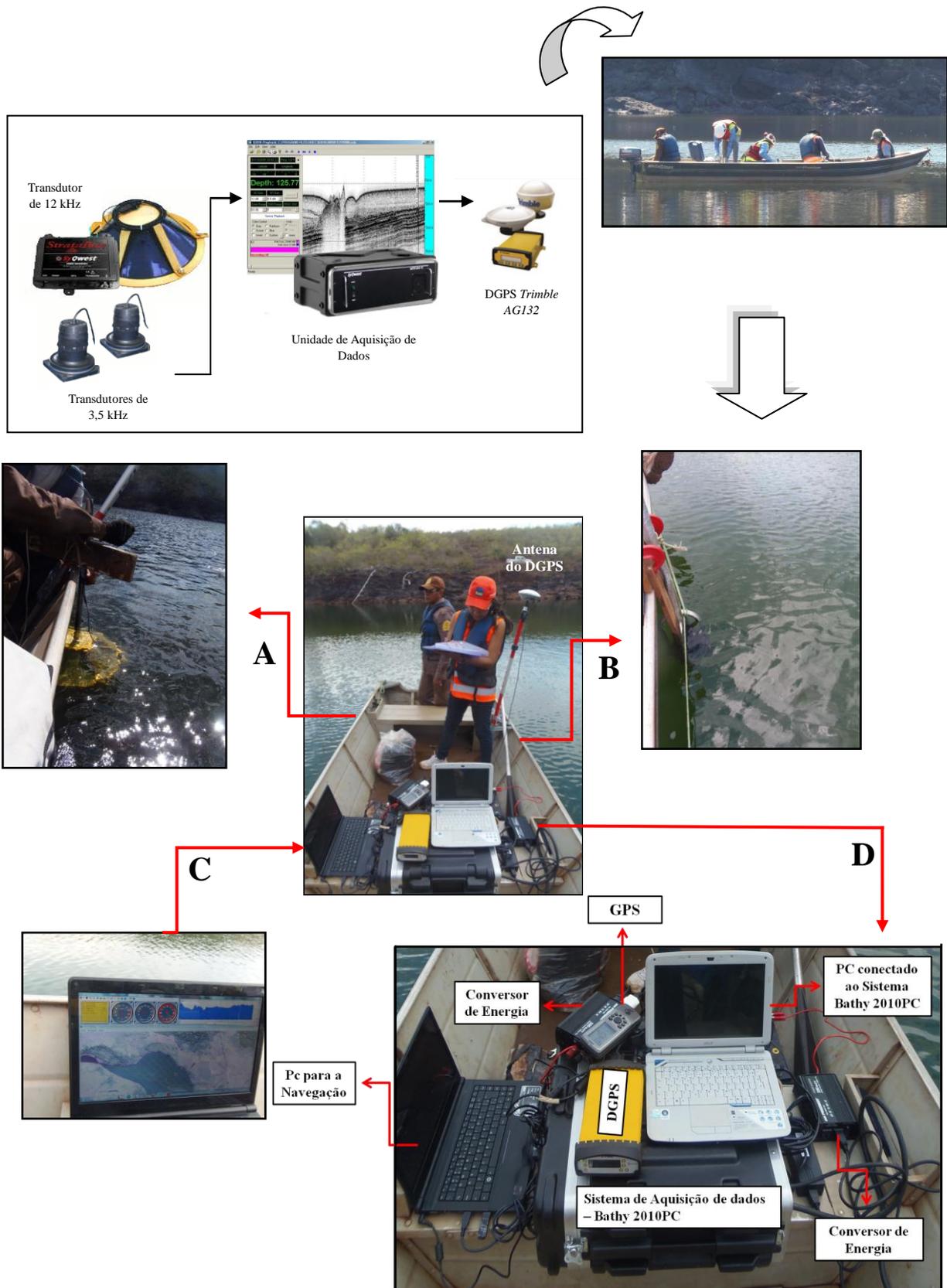


Figura 8 - Levantamento sísmico. Em A e B estão os respectivos transdutores de 12 kHz e 3,5 kHz; em C a navegação e posicionamento sísmicos em tempo real e em D o sistema de montagem e aquisição sísmica com o equipamento *Bathy 2010PC*<sup>TM</sup> da marca *SyQwest*.

## 4.2 TRATAMENTO DOS DADOS DE SÍSMICA RASA

### 4.2.1 Apresentação dos dados

Mesmo que os dados de sismica rasa obtenham imagens de alta resolução, a visualização e interpretação direta tornam-se muitas vezes impraticáveis devido à presença de ruídos sendo necessário um tratamento e aplicação de processos suplementares para esses dados. Nesse contexto, os perfis coletados com frequência de 12 kHz apresentaram boa penetração, resolução e poucos ruídos em relação aos de 3,5 kHz que, apesar da maior penetração, a grande quantidade de ruídos comprometeu a visualização prévia dos dados (figura 9). Portanto, foram tratadas somente as linhas de maior frequência sendo aplicadas para cada uma, algumas etapas do fluxo de processamento desenvolvido por Gomes (2009). Vale ressaltar que os dados de frequência 3,5 kHz, mesmo com a qualidade comprometida, contribuíram na validação de informações presentes ou não nos perfis de 12 kHz, principalmente as encontradas em maiores profundidades.

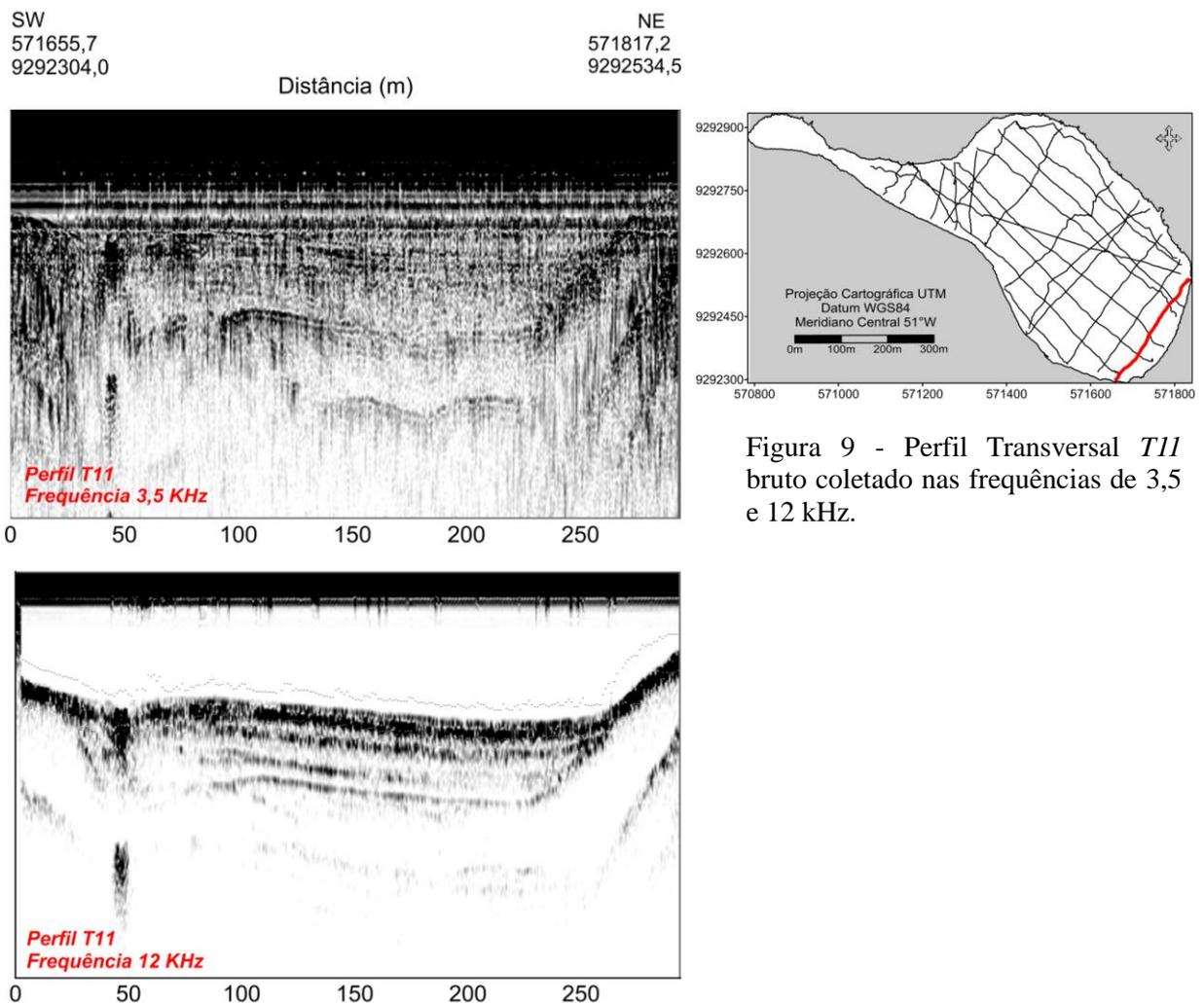


Figura 9 - Perfil Transversal *T11* bruto coletado nas frequências de 3,5 e 12 kHz.

#### 4.2.2 Fluxo de Tratamento

Os dados sísmicos foram gravados no formato padrão do equipamento *Office Data Connection* (ODC) e, posteriormente, convertido para a extensão *Society of Exploration Geophysicists* (\*.SEGY), compatível com vários *softwares* de processamento e interpretação, como os *softwares* *Reflex Win* e *Kingdom® Suite* utilizados neste trabalho.

O *Reflex Win 7.5* é comumente utilizado num fluxograma de processamento de sísmica convencional como o GPR. Porém, possui módulos interativos para processamento e interpretação de dados de sísmica 2D, em particular o *2D-Data-Analysis*. Sua utilização se restringiu as etapas de correção geométrica e análise espectral dos dados, pois as etapas seguintes produziram resultados desfavoráveis quanto à perda de resolução das imagens e consequentemente, de informações relevantes para o propósito deste trabalho. Contudo, como os dados de maior frequência possuem maior qualidade, a não aplicação das demais etapas de processamento não comprometeu a visualização da arquitetura interna e a interpretação dos principais eventos imageados.

Após os parâmetros definidos na primeira etapa, os sismogramas obtidos foram visualizados no *software Kingdom Suite 8.5*, sendo aplicados filtros para uma melhor análise e interpretação das imagens, além da identificação dos principais refletores com suas localizações geográficas. Por fim, foram gerados os arquivos “dat” cujos refletores encontram-se georreferenciados para a confecção de mapas (figura 10).

### Etapas do Tratamento das Seções Sísmicas Rasas

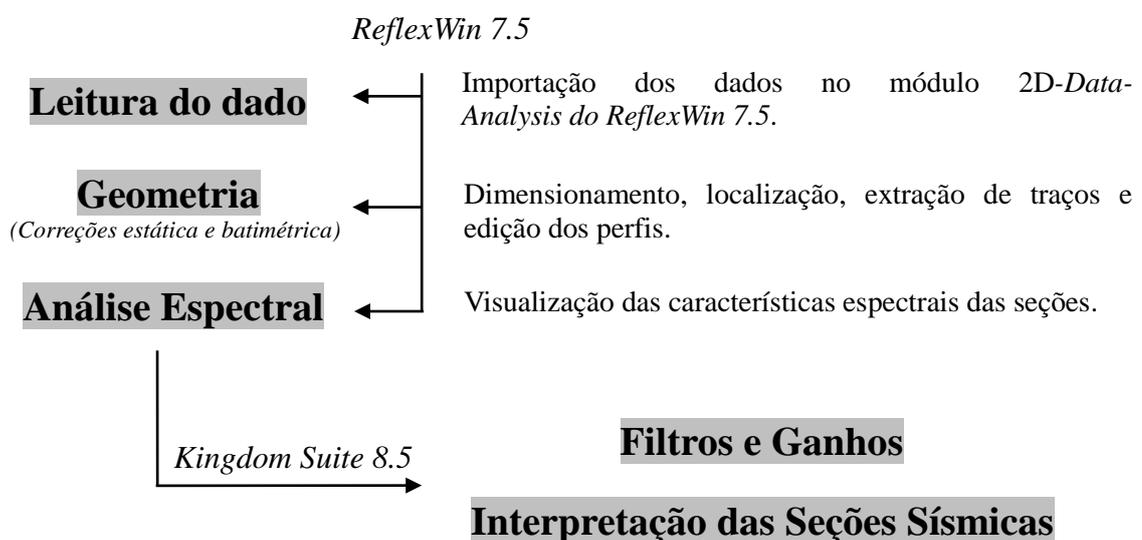


Figura 10 - Principais etapas de análise e aplicação do tratamento nas seções de sísmica rasa. Modificado de Watanabe, 2015.

#### 4.3 RESPOSTA E INTERPRETAÇÃO DAS SEÇÕES SÍSMICAS

Dentre os perfis sísmicos coletados foram escolhidos os seis mais representativos, dois longitudinais (*L2* e *L7*) e quatro transversais (*T1*, *T5*, *T8* e *T11*), no que se refere aos elementos sismo-deposicionais e aos padrões de ecocaráter. A interpretação sismoestratigráfica teve como base as análises de terminação lateral das superfícies sísmicas, configuração interna dos refletores e geometria externa dos pacotes todas em concordância com as linhas estabelecidas pela sismoestratigrafia propostas por Mitchum Jr. *et al.* 1977, cuja integração das informações permitiram a definição do preenchimento sedimentar da bacia considerando a atuação de processos deposicionais e/ou erosionais pretéritos.

O tipo de terminação lateral dos refletores sísmicos é determinante na definição das unidades sismoestratigráficas e foi o critério inicialmente utilizado para reconhecer os limites de sequências deposicionais. Por conseguinte, foram caracterizadas as sismofácies com base nos parâmetros das reflexões sísmicas sendo as informações geológicas expressas em diferenças de amplitudes, zonas saturadas de altas e baixas frequências, continuidade dos refletores e intervalo de velocidade. Por fim, a análise da geometria das unidades forneceu o contexto paleogeomorfológico, onde a disposição espacial dessas unidades mostrou o arranjo arquitetural do sistema de deposição durante o preenchimento da bacia.

A definição dos ecocaráteres frente ao substrato baseou-se na presença ou não de refletores em subsuperfície, geometria e textura das primeiras reflexões e aspecto do refletor primário considerando as delineações de Damuth (1975) & Lee *et al.* (2002) onde afirmam que o caráter do eco está relacionado principalmente a topografia de fundo e, neste caso, a textura dos sedimentos superficiais além das rochas subjacentes. É importante considerar que não existe uma classificação específica para cada sistema, pois o tipo de padrão de ecofácies é intrínseco às características da área estudada. Por essa razão, é importante a boa correlação entre o eco e o tipo de substrato, a morfologia submarina e os processos de sedimentação.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 MORFOLOGIA ATUAL DA SUPERFÍCIE DE FUNDO

A partir dos perfis sísmicos levantados, associados aos resultados batimétricos realizados anteriormente por Souza Filho (*et al.* 2016), foi gerado um mapa da morfologia atual de fundo juntamente com um perfil topográfico (figura 11). Foi possível constatar que a bacia possui fundo relativamente plano delimitado por margens íngremes aflorantes, sendo identificados três setores morfologicamente distintos em relação a altimetria, a saber: setor A, localizado na porção NW, setor B, intermediário e setor C na porção SE.

Existe uma zona segundo o autor supracitado, localizado no extremo ocidente da lagoa de plano raso (< 2,5 m de profundidade) e área elipsoidal (200 x 100 m) que se liga ao canal principal também chamado de “braço” da lagoa, onde não foi possível realizar o levantamento em detrimento dos níveis rasos de água comum na estação seca.

O setor A, está relacionado à parte do canal estreito e alongado de área de 300x150 m, fundo raso e média irregularidade com profundidade máxima encontrada a 14 m. Esse setor é conectado ao setor B que corresponde a zona mais profunda e intermediária da lagoa, por vezes, com mudança abrupta de relevo. Constitui um fundo parcialmente plano alcançando até 16 m de profundidade, circundado por margens íngremes encontradas em até 5 m abaixo da lâmina d’água.

O setor C está situado na porção oriental da lagoa também caracterizada por margens íngremes com fundo relativamente plano com declividade de relevo na direção NW a uma profundidade de 15 m.

As regiões mais rasas estão entre 200 e 350 m do perfil, a partir da abertura do canal (setor A), as regiões SE e NE (setor C) e a própria margem da lagoa.

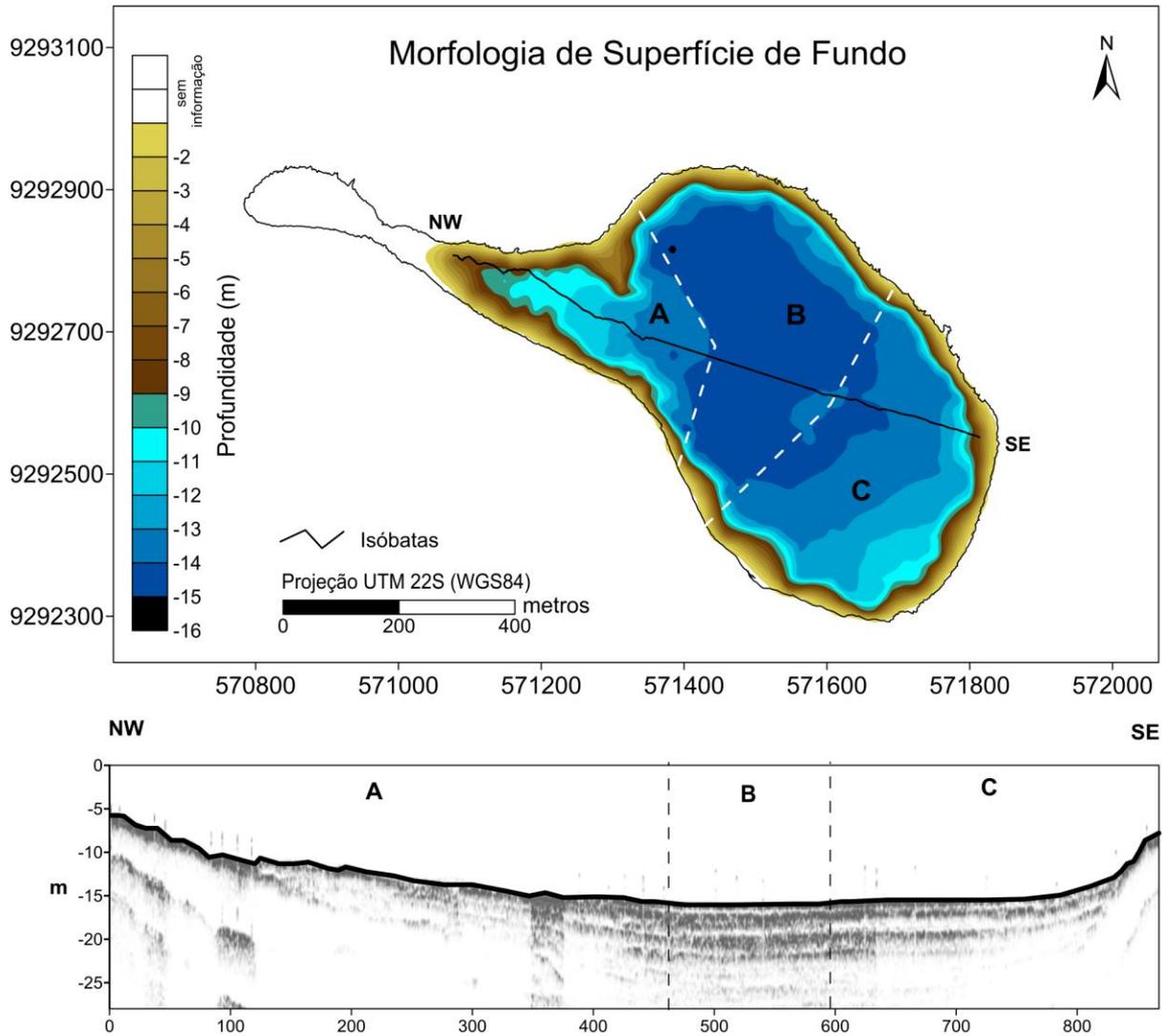


Figura 11 – Modelo topográfico e perfil sísmico demonstrando a morfologia atual de fundo da Lagoa Violão.

## 5.2 MORFOLOGIA DE SUBSUPERFÍCIE

### 5.2.1 Embasamento Acústico

A análise dos perfis sísmicos permitiu delimitar o embasamento acústico em toda a área de estudo. Este embasamento, apresenta-se como um refletor proeminentemente basal e irregular com média de 14 m de profundidade em relação a lâmina d'água. Nas margens aflora e no depocentro da bacia, estende-se por até 25 m de profundidade. O embasamento acústico classifica-se como padrão transparente característico de substrato rochoso, pois há perda e

espalhamento de sinal ao atingi-lo. Portanto, o embasamento acústico também é o embasamento rochoso.

### 5.2.2 Reconhecimento das Unidades Sísmicas

Foram reconhecidas três sequências sismoestratigráficas (figura 12), denominadas de Unidade Sísmica I (USI), Unidade Sísmica II (USII) e Unidade Sísmica III (USIII) hierarquizadas em ordem cronológica, da base para o topo.

As unidades repousam sobre o embasamento acústico/rochoso e variam de espessura devido a sua disposição em relação ao padrão irregular da bacia, que se assemelha a uma bacia de lavar roupa (*washing basin*), com margens íngremes e uma região mais profunda (depocentro) relativamente plana, que favorece a deposição das camadas mais espessas (13 a 14 m). Nessa região observa-se uma atenuação do sinal sísmico refletindo em mudanças nos padrões de reflexão.

### Perfil Sísmico L3

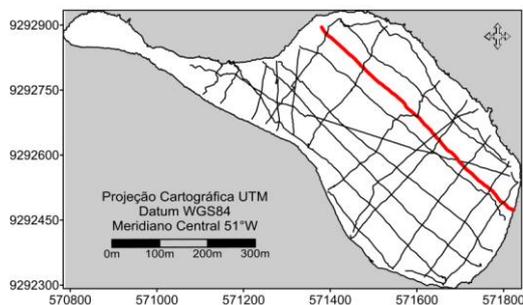
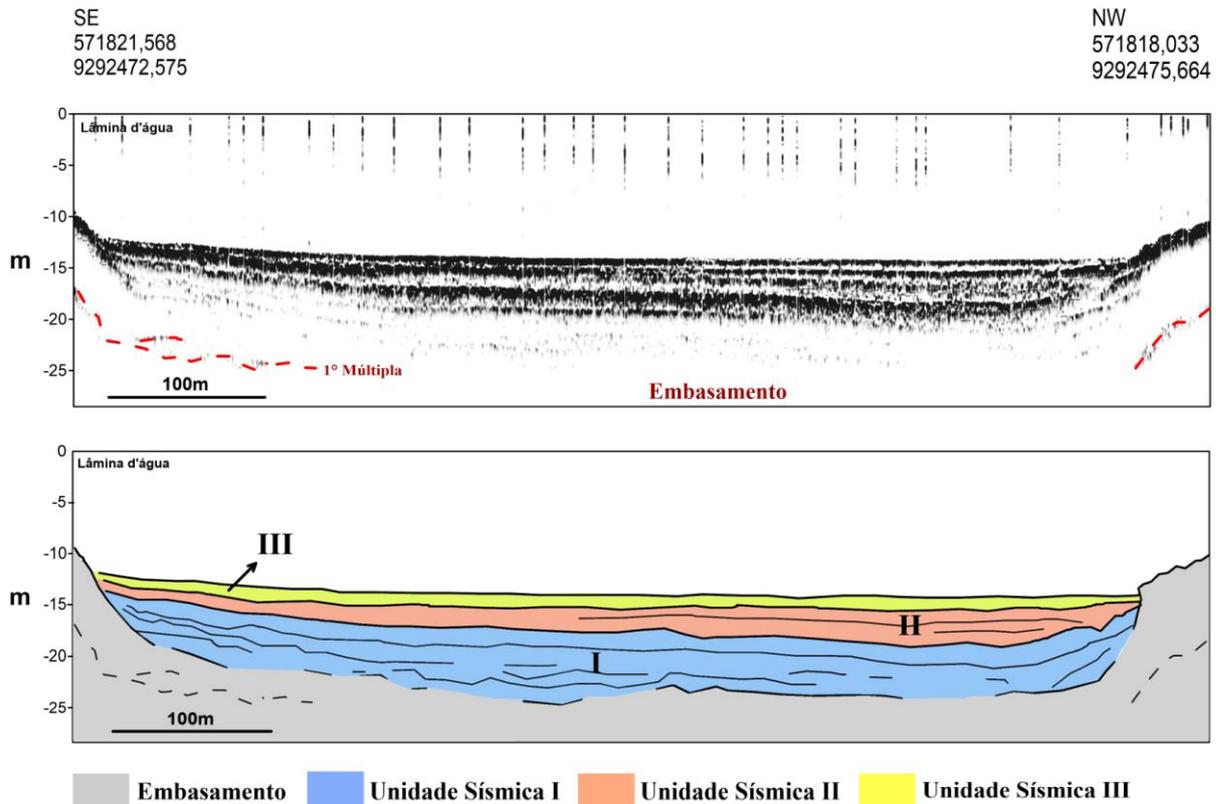


Figura 12 - Unidades sismoestratigráficas identificadas na Lagoa do Violão. Cada Unidade está associada a uma sismosequência limitada na base e no topo por superfícies estratigráficas.

#### 5.2.3 Descrição das Unidades Sismoestratigráficas

##### ✓ Unidade Sísmica I – USI

É a unidade de deposição mais antiga observada nos transectos, principalmente na porção central com imageamento de até 25 m. Compreende o preenchimento basal da lagoa, cuja deposição segue majoritariamente o substrato rochoso. Apresenta-se em média com 5 m de espessura atingindo um máximo de 7,5 m no depocentro, afinando à medida que se aproxima das margens, onde alcança 1,5 m de espessura. Seu limite inferior marca o contato

com o embasamento até o limite inferior da USII com refletores descontínuos, de baixa amplitude e contraste de impedância acústica.

A USI é constituída de fácies plano-paralelas a subparalelas presentes no centro da lagoa que, por vezes, é concordante com a USII. A fácies oblíqua tangencial e sigmoidal de refletores íngremes concentrados nas extremidades representa uma sucessão progracional à medida que adentra na lagoa com terminação do tipo *downlap* sobre o embasamento e para cima em *toplap* em contato com a USII.

✓ Unidade Sísmica II - USII

A USII é caracterizada por um pacote de aproximadamente 3,5 m de espessura, relativamente homogêneo, encontrado em quase todos os perfis, com exceção da região referente ao ‘braço’ da lagoa. Suas superfícies estratigráficas limítrofes são marcadas por forte reflexão e alto contraste de impedância acústica, ao contrário dos refletores internos que possuem baixa penetração do sinal, conseqüentemente, baixa amplitude e impedância. Tais refletores estão dispostos plano-paralelamente em concordância com as USI e USIII.

✓ Unidade Sísmica III - USIII

Consiste na sucessão mais superficial de idade holocênica (Souza Filho *et al.* 2016) distribuída em toda superfície da lagoa. Encontra-se em média a 9 m abaixo da lâmina d’água, podendo atingir profundidades entre 8 e 10 m. Constitui um horizonte de 1,5 m de espessura, fortemente marcado e depositado plano-paralelamente sobre a USII. Compõe uma superfície uniforme em forma de drapes que termina em *onlap* sobre o embasamento cristalino, especificamente nas margens da lagoa próximo a profundidade de 10 m, onde se apresenta com menor espessura. Nas porções NW e SW são observados padrões de eco distintos associados a escape ou acúmulo de gás representado por uma superfície escura que se estende aos interstícios sedimentares dessa unidade, impedindo as reflexões subjacentes que resulta em múltiplas até o final dos perfis.

A descrição detalhada de perfis sismoestratigráficos é feita a seguir, a fim de caracterizar as unidades sísmicas da Lagoa do Violão.

### 5.3 DESCRIÇÃO DOS PERFIS SÍSMICOS

#### ➤ *Perfil Longitudinal 2 L2*

A seção sísmica *L2* (figura 13) tem aproximadamente 560 m de comprimento e está disposta longitudinalmente de NW para SE, a aproximadamente 86 m da margem NE da lagoa. A profundidade média da lâmina d'água é de 12 m decrescendo para 5 m à medida que se aproxima da extremidade, início e fim da seção, onde o embasamento aflora.

O perfil mostra três unidades deposicionais com três fácies sísmicas distintas: plano-paralela, subparalela e oblíqua tangencial. O primeiro horizonte sísmico identificado marca o contato entre o embasamento acústico/rochoso e o início da USI, limitada até 16 m de profundidade onde inicia a USII. A fácies plano-paralela é a única encontrada, uniformemente, nas três unidades sísmicas depositada nas porções de fundo mais regular da lagoa, apresentando estratos concordantes entre 130 e 300 m ao longo da seção, das USI e USII.

Na USI, os refletores aparecem com baixa amplitude e fracamente continuados, estendendo-se à margem oposta onde há uma diminuição da espessura do pacote e a justaposição lateral de clinofomas de acreção frontal. Nas margens, os refletores íngremes representam uma sucessão progradacional com obliquidade tangencial e terminam em *downlap* sobre o embasamento e em *toplap* contra a USII.

Nessa unidade, a fácies subparalela está entre as clinofomas progradacionais e a fácies plano-paralela, de refletores bem espaçados em todo o perfil, aumentando sua amplitude da base para o topo da USIII. Próximos aos 350 m do perfil, é possível perceber um afinamento da USII em direção à SE, implicando na continuidade dos refletores. Na mesma margem, a USIII termina em *onlap* com a superfície superior da USII.

Vale ressaltar que todos os limites de contatos entre as unidades, são representados por refletores de alta energia acústica que demonstram um contraste em relação a sedimentação.



➤ *Perfil Longitudinal L7*

A figura 14 ilustra a seção L7 na porção SW da lagoa, com orientação de NW para SE, ao longo de aproximadamente 790 m. A seção é separada pelo embasamento que aflora entre 200 e 370 m no perfil e atinge 5 m de lâmina d'água. Na porção de menor espessura (NW), o embasamento encontra-se à 15 m em subsuperfície abrigando um pacote deposicional de ~4,5 m. O imageamento é interrompido por um refletor de forte marcação, entre 100 e 200 m da seção, atribuído a presença de gás instalado nos interstícios das primeiras camadas sedimentares, que provoca o aumento de contraste de impedância em alguns refletores tanto lateralmente quanto em profundidade, como a geração de múltiplas. Em contrapartida, o embasamento da região a SE do perfil é imageado a até 22 m de profundidade, comportando pacotes de maior espessura, estratificados e com perda de continuidade á medida que atinge a extremidade lacustre.

Devido à perda de sinal com o aumento da profundidade e a resposta acústica da presença de gás, o reconhecimento dos refletores sísmicos, assim como sua continuidade lateral, se tornam comprometidos. Os refletores são subparalelos à paralelos, da base para topo, com presença de reflexão oblíqua mergulhante na USI no contato com o embasamento que aflora ao longo da seção, terminando em *downlap* sobre o contato basal e em *toplap* com a unidade sotoposta. Os refletores paralelos regulares são bem marcados nas USII e USIII com maior espaçamento e continuidade lateral dos estratos.

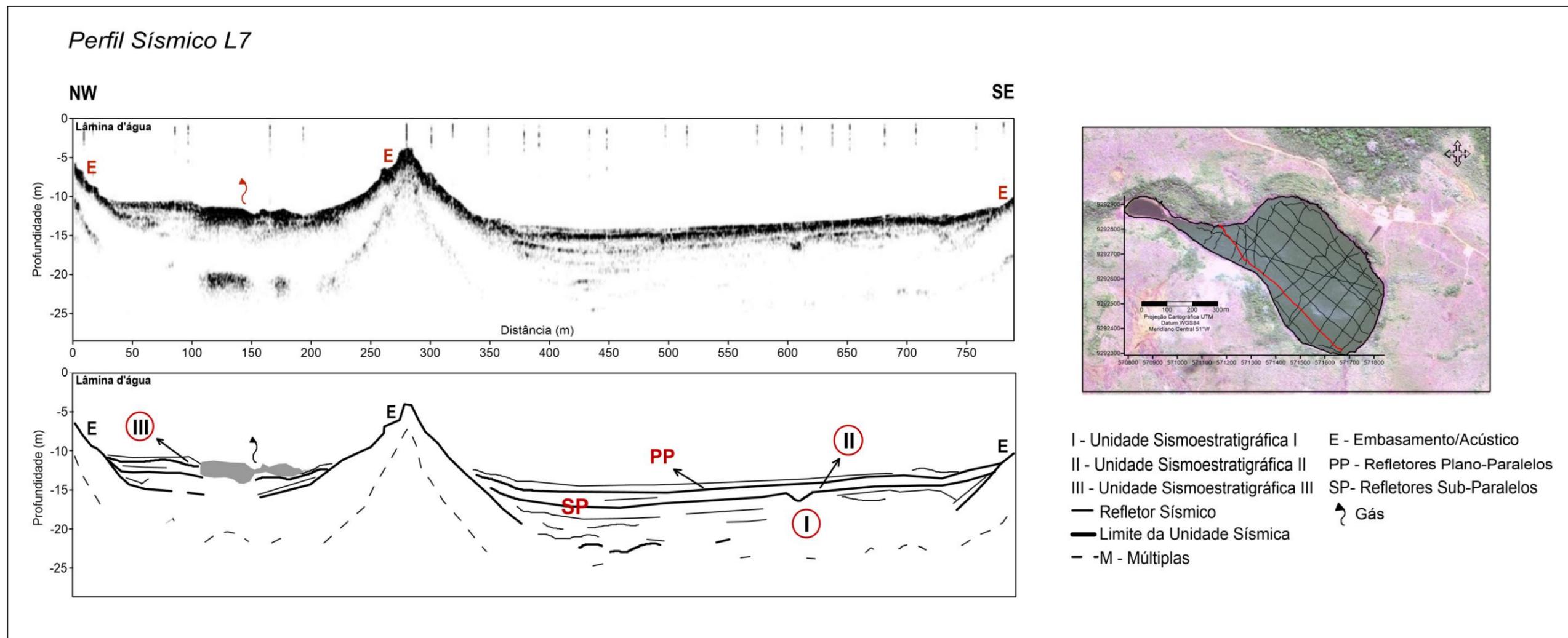


Figura 14 - Perfil Sísmico longitudinal L7, referente à borda SW da lagoa Violão, com sua respectiva interpretação.

➤ *Perfil Transversal T1*

O perfil T1 tem em torno de 138 m de comprimento, disposto na direção NE/SW, localizado no setor ocidental da lagoa, correspondendo a um canal estreito e raso com profundidades entre 0 e 2 m (figura 15). Seu pacote é relativamente delgado em comparação às demais regiões imageadas. As USI e USII não estão presentes e o limite inferior da USIII marca o contato com o embasamento, cujos refletores, por vezes, se confundem devido ao alto contraste de impedância. Esse mesmo contato pode ser observado na margem NE do perfil, com espessura máxima de 0,5 m e no seu topo um padrão reflexivo distinto dos demais, com baixa a alta amplitude. Em aproximadamente 45 m, o sinal acústico é afetado novamente pela presença de gás gerando um “branqueamento” da camada e fortes múltiplas em subsuperfície. O padrão transparente ocorre lateralmente a partir dos 20 m iniciais até o fim do perfil gerando ausência de reflexão em subsuperfície típico de resposta do embasamento rochoso.

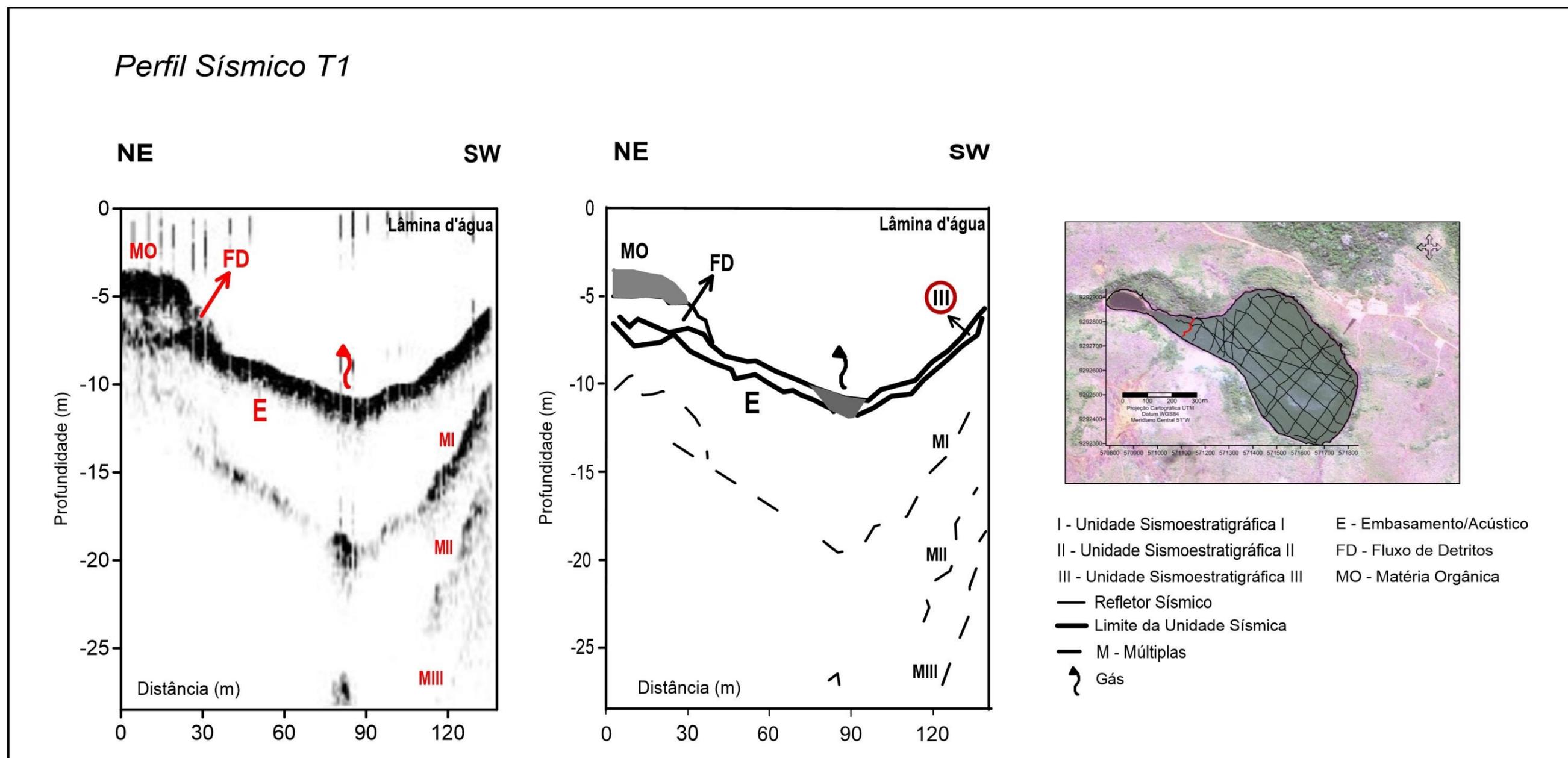


Figura 15 - Perfil Sísmico transversal T1, referente ao canal principal (NW da lagoa), com sua respectiva interpretação.

➤ *Perfil Transversal T5*

O transecto *T5*, figura 16, possui cerca de 215 m de comprimento e orientação NW/SE. Foi adquirido próximo a abertura do braço da Lagoa do Violão, apresentando irregularidades na morfologia de fundo, iniciada na margem NW da lagoa até 100 m, passando abruptamente para um fundo menos irregular, porém favorável à deposição que se estende até a margem oposta da bacia. A ausência de reflexão em subsuperfície e a morfologia assimétrica remete a porção mais elevada ao embasamento que aflora até a superfície. Não é possível distinguir se há limites reflexivos no topo rochoso. Entretanto, a porção que acomoda os estratos é encontrada em aproximadamente 10 m de profundidade onde são observadas todas as unidades presentes, que são caracterizadas por refletores de fraca reflexão acústica, por vezes, transparentes e descontínuos com exceção da USIII. Os pacotes revelam o padrão contorcido de configuração interna que de forma geral, apresenta-se nas áreas mais elevadas da lagoa.

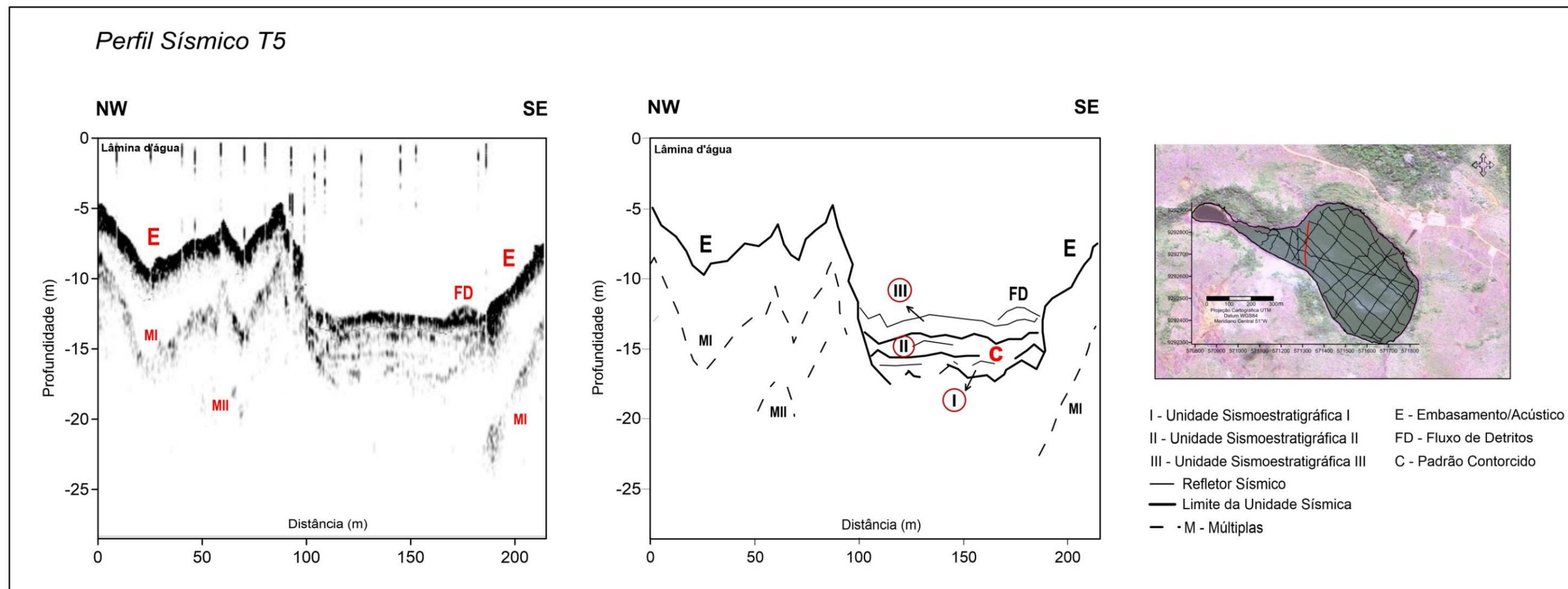


Figura 16 – Perfil Sísmico transversal *T5* referente à entrada do canal principal da lagoa.

➤ *Perfil Transversal T8*

O perfil mostrado na figura 17 tem 461 m de comprimento e orientação SW/NE. É localizado no depocentro da lagoa onde se percebe um fundo relativamente plano limitado pelas margens íngremes aflorantes. Sua morfologia pode ser comparada a uma “caixa”, com preenchimento de fundo progradacional do tipo oblíquo tangencial e paralelo regular. As reflexões oblíquas, associadas à USI, mergulham da margem NE em direção ao contato basal em *downlap*, suavizando em direção ao centro da lagoa, com reflexões paralelas depositadas concordantemente sobre os estratos sotopostos. Em relação à resposta acústica de seus refletores, apresentam-se com baixa amplitude no contato do embasamento com a USI e a partir daí, demonstram forte reflexão vertical e lateral bem definidos e contínuos até o topo da USIII com pouca variação no contraste de impedância. O fundo parcialmente regular favorece a disposição de pacotes uniformes com espessura em média de 8 m, variando pouco às proximidades do embasamento nas extremidades, que atinge em torno de 4 m abaixo da superfície aquosa e até 22 m em subsuperfície.

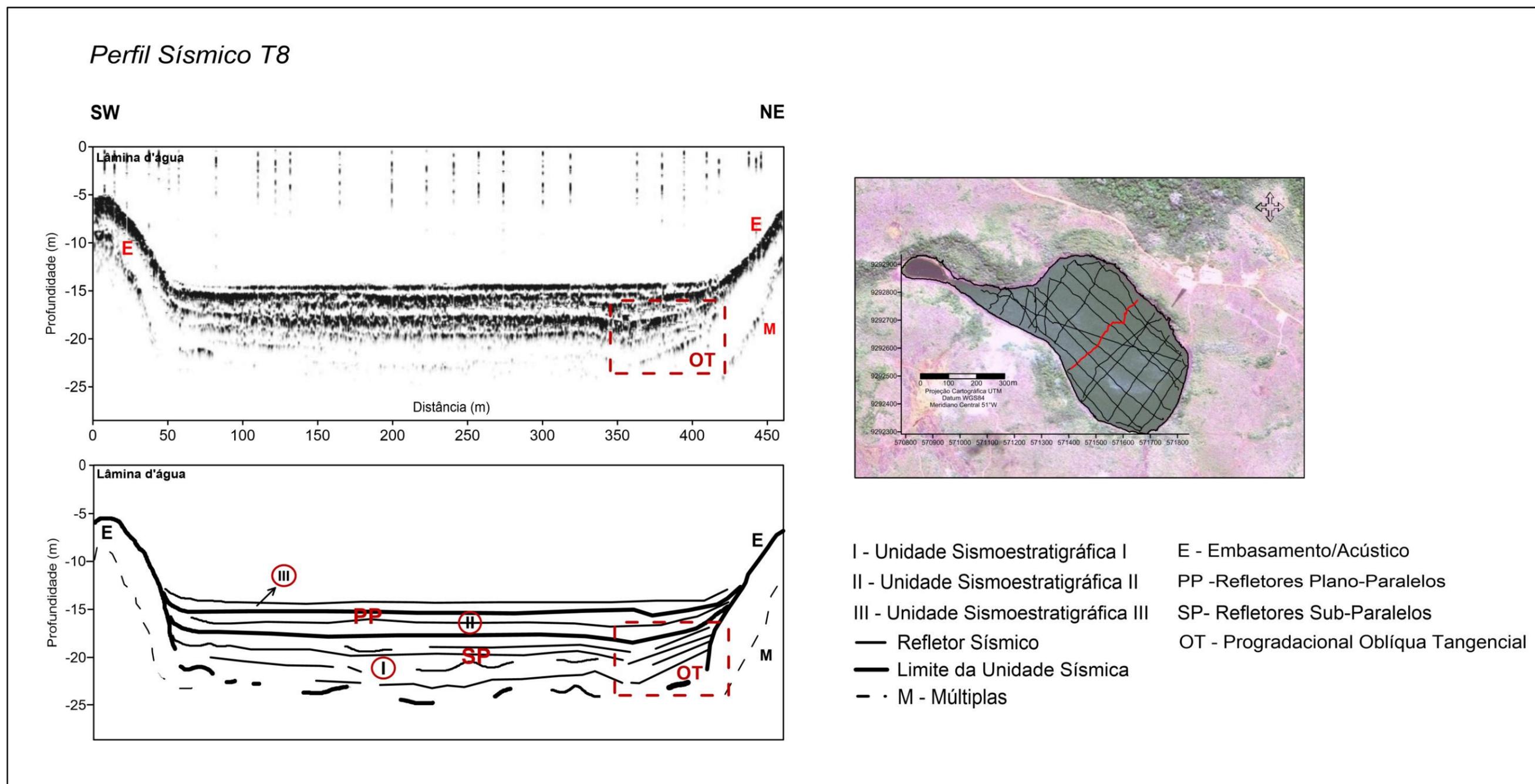


Figura 17 - Perfil Sísmico transversal T8 localizado na região central da lagoa.

➤ *Perfil Transversal T11*

A seção *T11*, orientada na direção SW/NE, localiza-se no extremo SE da lagoa e tem comprimento em torno 295 m. A figura 18, mostra uma declividade acentuada do relevo de fundo entre 20 e 50 m (porção SW), associada ao embasamento onde forma um vale em “U”, totalmente preenchido, cuja arquitetura interna chega até 15 m de espessura. A partir desse ponto, o relevo estende-se com suave inclinação dos pacotes até o contato com o embasamento aflorante no final do perfil na extremidade oposta da lagoa. O embasamento é bastante irregular, caracterizado por um refletor de fraca marcação, descontínuo e profundidade máxima visível em torno de -15 m referente ao fundo do “vale”. Os refletores acima do contato rochoso variam lateralmente de média a alta amplitude nas USI e USII, e da base para o topo até o limite inferior da USIII, onde se apresenta mais reflexivo na sua totalidade. Em 50 m de distância ocorre uma forte reflexão, que assim como no L7, é atribuído a presença de gás. Desta distância até 100 m é observada uma turbidez acústica, também associada a presença de gás, contudo ainda foi possível dar seguimento aos refletores mais fortes em subsuperfície.

As sismofácies são bem evidentes e estratificadas configurando padrões do tipo subparalelo no qual constitui a USI, e paralelo nas USII e USIII. A sucessão progradacional é oblíqua tangencial como observado na porção NE do perfil.

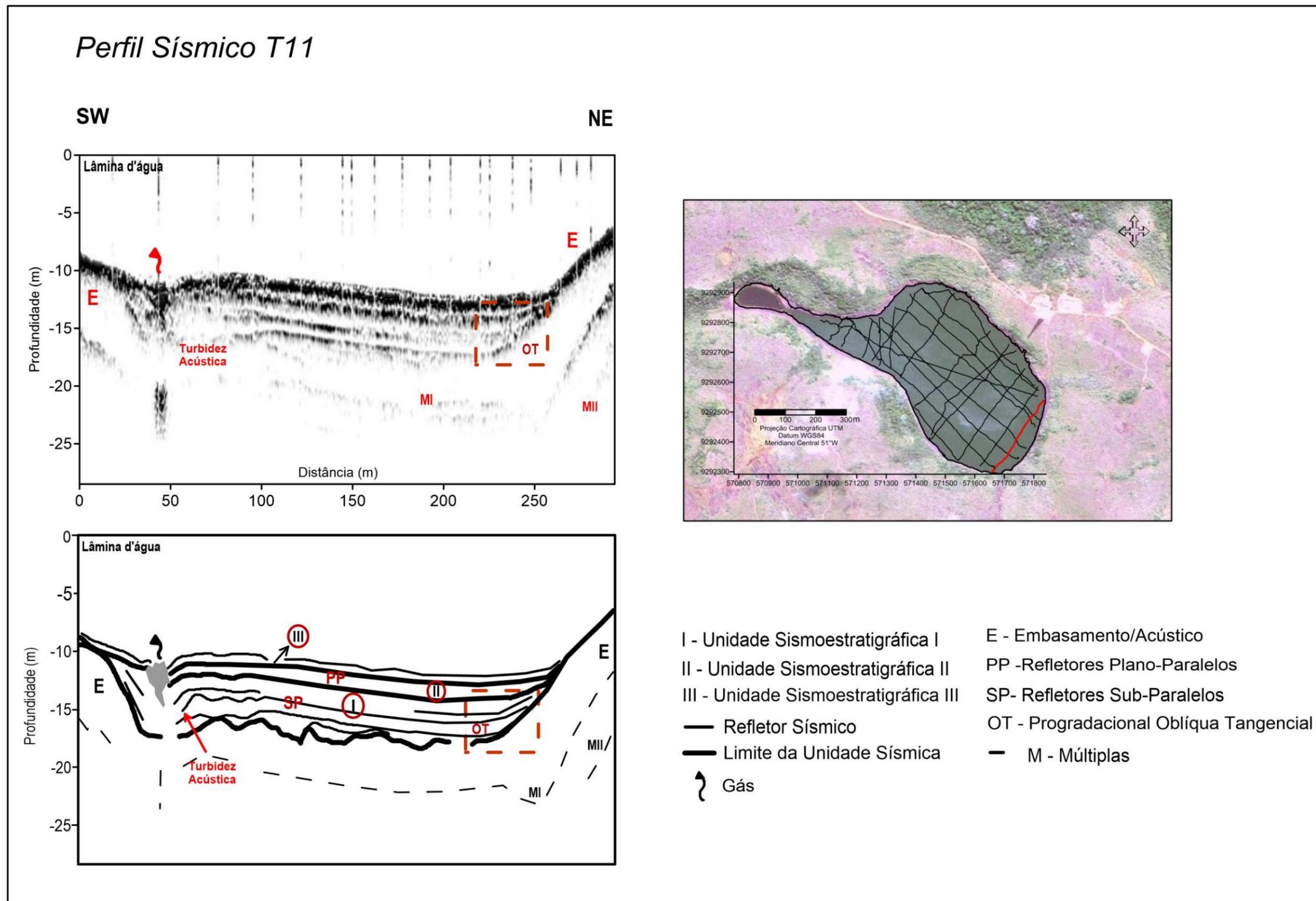
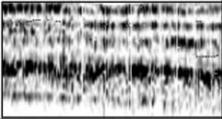
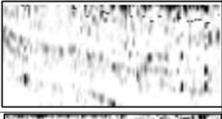
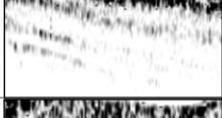
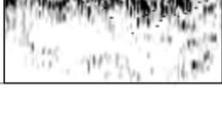


Figura 18 - Perfil Sísmico transversal T11, levantado à borda SE da lagoa Violão.

## 5.4 PADRÕES INTERNOS DE REFLEXÃO

Levando em consideração que a configuração interna das reflexões é o parâmetro que melhor caracteriza a fácies sísmica, já que auxiliam na compreensão deposicional do sistema, foram descritos cinco padrões de configuração interna presentes nas unidades sísmicas. São elas: progradantes oblíqua tangencial e sigmoidal, plano-paralelo, sub-paralelo e padrão contorcido. A tabela 1 apresenta a descrição e a interpretação de cada um dos padrões internos de reflexão mencionados acima.

Tabela 1 - Padrões Internos de Reflexão e suas respectivas descrições e interpretação dos processos.

<i>Padrão Interno de Reflexão</i>	<i>Descrição</i>	<i>Interpretação</i>
<b>Plano Paralelo</b> 	Refletores horizontais de baixa à alta amplitude do sinal acústico. Em sua maioria contínuos, espaçados e concentrados no depocentro da bacia.	Associado a unidade de preenchimento de baixa energia com deposição uniforme, em forma de drapes, sobre uma superfície subsidente e estável.
<b>Sub-Paralelo</b> 	Refletores de baixa à média amplitude do sinal acústico, descontínuos, espaçados e concentrados no depocentro da bacia.	Associado a unidade de preenchimento de baixa energia sugerindo taxas de deposição sobre uma superfície subsidente e parcialmente irregular.
<b>Progradante Oblíqua Tangencial</b> 	Refletores íngremes de baixa amplitude. Concentram-se nas extremidades da lagoa representando uma sucessão progradacional terminando em downlap sobre o embasamento e para cima em toplap contra a USII.	Desenvolvimento lateral dos estratos depositados por fluxos gravitacionais em meio a morfologia íngreme das margens da lagoa gerando frentes deltaicas em condições de águas rasas.
<b>Progradante Sigmoidal</b> 	Fraca reflexão acústica e de média continuidade. Refletores presentes nas margens da lagoa terminando em downlap sobre o embasamento.	Sobreposição lateral das reflexões em forma de "S", pouco espesso, mergulhando suavemente sobre o embasamento. Sugere baixo aporte sedimentar em um ambiente de baixa energia.
<b>Contorcido</b> 	Fraca reflexão acústica e refletores descontínuos. São observados nas áreas mais elevadas da lagoa. Podem apresentar um padrão transparente.	Podem estar relacionados a deformações sin deposicionais associadas a fluxo de massas em direção ao depocentro da bacia.

### 5.4.1 Distribuição dos Padrões Internos de Reflexão

A figura 19 constitui o modelo de distribuição dos padrões identificados nas diferentes unidades sísmicas. Primeiramente, foi elaborado um modelo tridimensional do embasamento rochoso, onde é possível destacar uma região com fundo mais plano e uniforme, que abrange a maior parte da bacia e outra região mais profunda e irregular no extremo NW.

A USI é a única a concentrar todos os padrões de reflexão. Os padrões progradantes (sigmoidal e oblíqua tangencial) se dispõem próximo às margens, com maior ocorrência destas clinofomas à SE e mergulho dos refletores, predominantemente para NW. O padrão contorcido se encontra, preferencialmente, nas extremidades, com uma maior extensão. Já os

padrões subparalelo e plano-paralelo se interligam e são distribuídos quase uniformemente na porção central da lagoa. As áreas vermelhas fazem referência à ausência de reflexão, contudo ao correspondem ao padrão transparente e as brancas, sem levantamento em todas as unidades sísmicas.

A USII caracteriza-se pelas configurações subparalelas, distribuem-se das proximidades das margens para o centro, e as plano-paralelas predominantemente na região central. É a unidade que possui maior região com refletores de baixa amplitude impossibilitando seu mapeamento.

Os padrões de configuração plano-paralelos e subparalelos são mais bem distribuídos na USIII. O tipo subparalelo se dispõe nas regiões marginais, seguido pelo plano-paralelo, com maior distribuição, preenchendo uniformemente o centro da bacia.

## Distribuição dos Padrões de Reflexão Interna

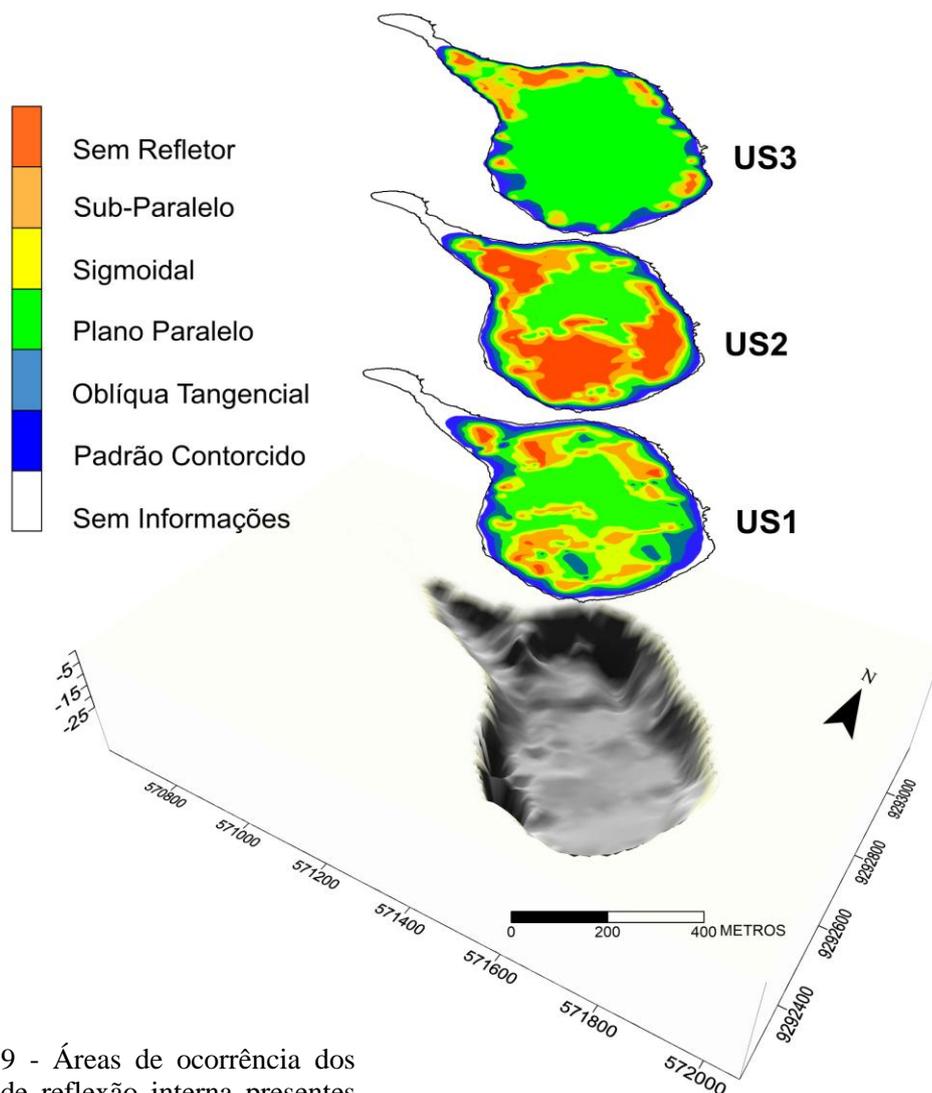


Figura 19 - Áreas de ocorrência dos padrões de reflexão interna presentes na Lagoa Violão.

## 5.5 ESPESSURA DAS CAMADAS – mapa de isópacas

As unidades sismoestratigráficas foram individualizadas a partir de terminações dos refletores ao longo de uma superfície. Cada Unidade, por definição, corresponde a conjunto de camadas ou estratos cronoestratigraficamente relacionados, com expressão sísmica, limitados no topo e na base por terminações de refletores, que estão relacionadas a um período de tempo específico e distinto das unidades abaixo e acima (Mitchum *et al.* 1977) .

Modelos de isópacas foram gerados a fim de representar a espessura total das unidades sísmicas assim como as profundidades referentes ao embasamento, além das espessuras de cada camada sedimentar encontrada (figuras 20 e 21). Cada camada é associada a um refletor sísmico que acompanha a morfologia da bacia.

O primeiro modelo a ser definido consiste no próprio embasamento documentando variações entre 2 e 25 m de profundidades, sendo as menores encontradas nas bordas da lagoa aumentando em direção ao centro de forma praticamente contínua. A variação de profundidade é relativamente alta evidenciando uma conseqüente e acentuada irregularidade na morfologia a qual apresenta um depocentro predominantemente central com profundidade média de 18 m e suave orientação para NW onde atinge profundidades de até 25 m. Tal irregularidade é definida pelas três principais superfícies sendo a primeira, plana e uniforme, a maior porção em termos de área situada no depocentro, a segunda mais profunda e irregular, é observada no extremo NW, e a última correspondente ao canal principal e as margens da lagoa (porções mais rasas), caracterizadas pelo embasamento envolto aflorante imageadas em até 5 m de profundidade. Como este refletor não possui continuidade lateral, não foi possível realizar um mapa de isópaca para o embasamento.

No mapa de isópacas total dois depocentros são destacados, um mais central e o principal dentre eles, alocado próximo a borda NW. Ambos possuem cerca de 11 a 14 m de espessura. A espessura média do pacote sedimentar está entre 7 e 8 m, majoritariamente encontrado no centro da bacia, de maneira homogênea, onde variam pouco na espessura. A partir dessa média, há um afinamento próximo as bordas da lagoa e dentro do canal onde atinge espessura mínima de 1,5 e máxima de 3 m.

Cada unidade sísmica compõe-se de refletores associados a camadas que atingem um total de 14 m em subsuperfície. Foram reconhecidas sete camadas denominadas de C1, C2, C3, C4, C5, C6 e C7 como mostra a figura 21, que variam entre 0,5 e 3,5 m de espessura distribuídas em diferentes profundidades ao longo da lagoa. A camada 1 (C1), possui maior espessura atingindo um máximo de 3,5 m, nos depocentros e pontualmente na entrada do

canal, e mínimo de 0,5 m em menor proporção às margens. A espessura média da camada é de 1,5 m preenchendo quase a totalidade da bacia compondo a base sedimentar da USI.

A variação na espessura da camada 2 (C2) reflete um preenchimento heterogêneo observadas em várias porções da lagoa. A espessura média da C2 é entre 1 e 1,5 m com maior concentração na porção central, já os menores valores podem ser observados nos extremos e em determinado pontos mais ao centro. O maior valor encontrado é de 3 m no principal depocentro da bacia. As camadas 3, 4 e 5 (C3, C4 e C5), medem entre 0,5 e 2 m de espessura e se assemelham em relação o preenchimento uniforme e a distribuição de suas medidas sendo as maiores concentradas no centro e extremo NW envolvidas pelas de menores espessuras. A camada 6 (C6) possui média de 0,5 m chegando a 1 m de espessura. É encontrada exclusivamente no extremo NW, porém é observada de forma pontual na extremidade oposta com 0,5 m. Já a camada 7 (C7) é a camada mais superior e a mais fina com 0,5 m de espessura. Concentra-se unicamente na porção NW em menor proporção que em relação a C6. Tanto a C6 quanto a C7 compõem a USIII.

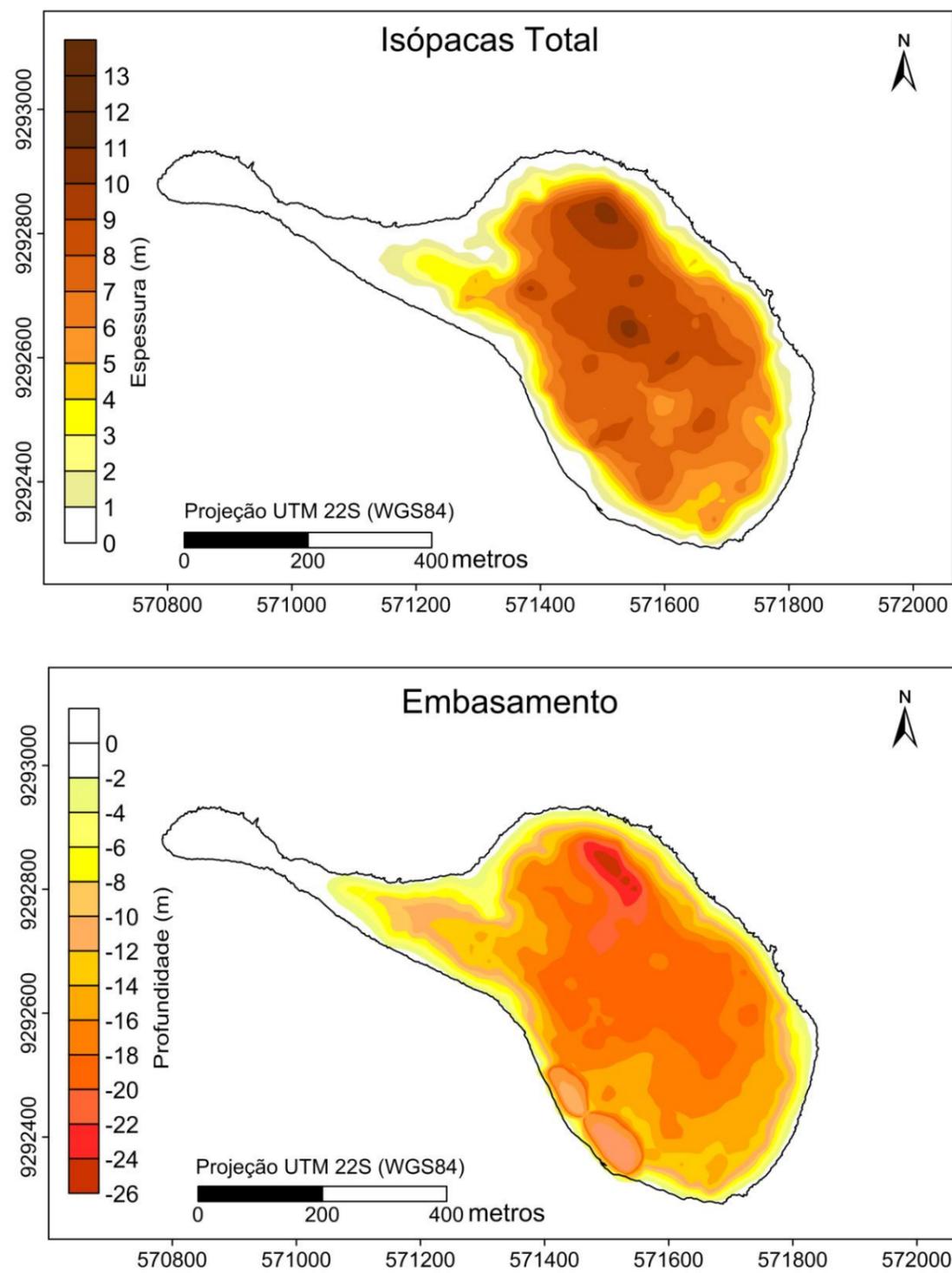


Figura 20 - Modelos de isópacas correspondentes à cada camada deposicional encontrada nas unidades.

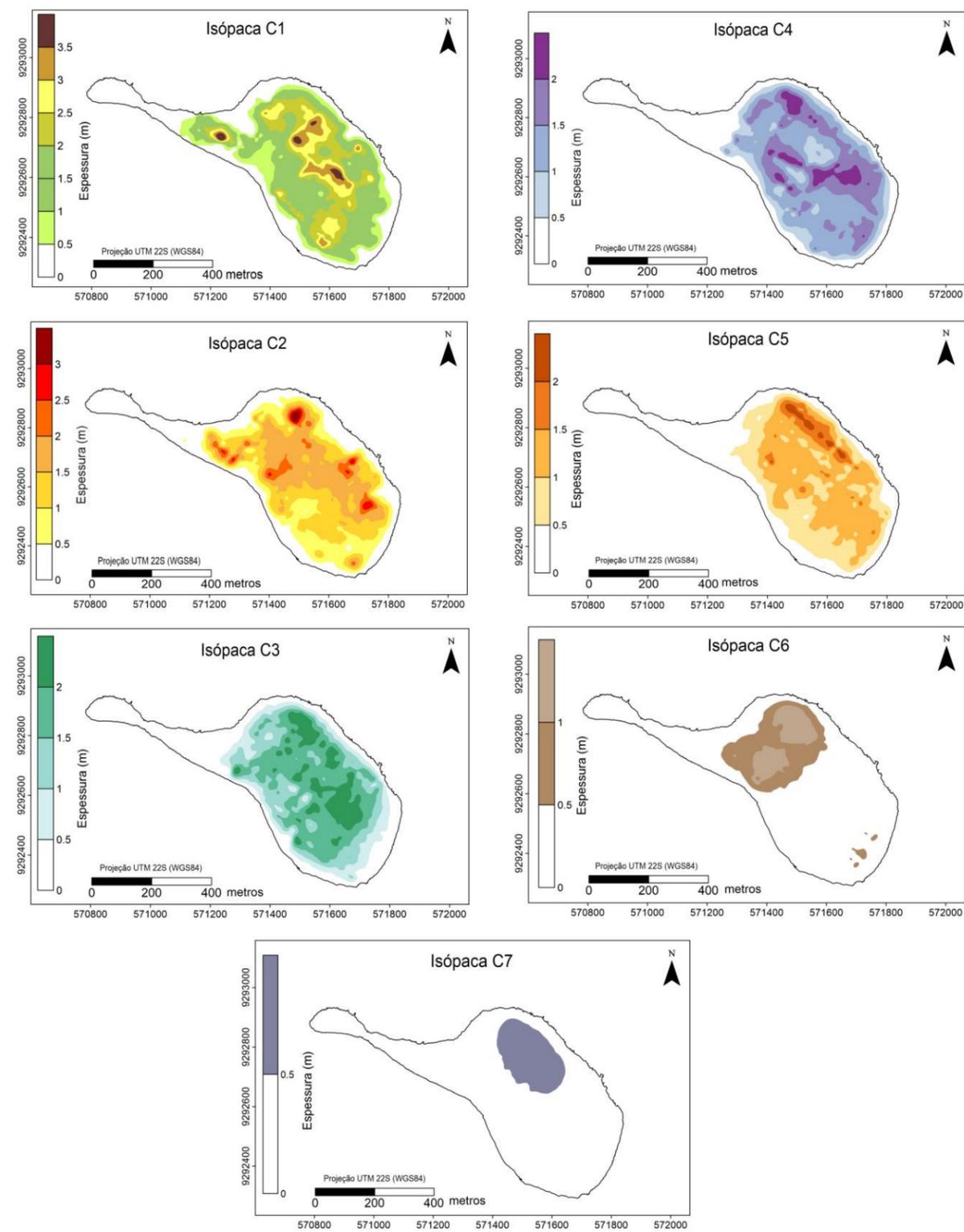


Figura 21 - Modelo em planta do embasamento, indicando as respectivas profundidades atingidas, e modelo de isópacas total do pacote sedimentar da Lagoa Violão com suas respectivas espessuras.

## 5.6 CLASSIFICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS PADRÕES DE ECOCARÁTER

De acordo com Félix (2012), ao utilizar fontes acústicas de altas frequências, as assinaturas acústicas estão intimamente relacionadas à caracterização textural dos sedimentos. Neste trabalho, utilizaremos a caracterização granulométrica dos sedimentos superficiais de fundo da Lagoa do Violão publicados por Souza Filho *et al.* 2016, baseada nos parâmetros estatísticos de Folk & Ward (1957), bem como a concentração de carbono orgânico total (TOC – *total organic carbon*) nas amostras. Assim, foi possível relacionar os padrões de ecocaráter com a deposição superficial da Lagoa Violão.

As respostas acústicas frente ao substrato foram definidas com base nas características dos sinais emitidos, na presença/ausência de sub-refletores, textura das primeiras reflexões incluindo o aspecto do refletor primário, e a irregularidade do leito. Foram identificados sete tipos de ecocaráteres distintos em toda extensão da lagoa sendo classificadas em: Eco 1, Eco 2, Eco 3, Eco 4, Eco 5, Eco 6 e Eco 7 através das seções sísmicas mais representativas. Desta forma, foi elaborado o mapa de fácies acústicas onde demonstra a distribuição dos diferentes tipos de ecos encontrados, conforme ilustrado na figura 22.

Eco 1 – Corresponde a um padrão de reflexão difusa com presença de uma superfície escura, porém com penetração de sinal. Ocorre em menor proporção ao longo da área, imageado entre 3,5 e 7 m abaixo da lâmina d'água e encontrados, exclusivamente, em dois setores: à NW da abertura do canal e margem adentro com mesma orientação onde são praticamente pontuais como mostrado no perfil *T1*.

O eco 1 está associado a fundos de silte grosso em regiões onde o embasamento é raso. A superfície escura sobreposta sugere presença de vegetação. O fundo lamoso é levemente oxidado, por vezes com presença de clastos lateríticos com turfas.

Eco 2 – Representa uma faixa escura de forte reflexão superior que mascara o registro sísmico subjacente gerando múltiplas bem marcadas até o final do perfil. Este padrão é pouco distribuído ocorrendo em três setores de forma quase pontual: na margem NW do canal principal, nas margens SW e NW e extremidade SE da lagoa. Seu comprimento máximo é de 100 m ao longo das linhas de levantamento.

O eco está associado a feições acústicas de gás junto a regiões de sedimentação siltosa com presença de turfa onde a concentração de TOC atinge de 34 a 38%. O gás está sob condições favoráveis para o acúmulo intrassedimentar, nesse caso, por fatores naturais.

Eco 3 – Este padrão ocorre exclusivamente na margem NW, caracterizado por um refletor de geometria bastante irregular de alta amplitude, acarretando em fortes reflexões

subjacentes. Pode apresentar uma primeira reflexão, cuja resposta acústica se confunde com a reflexão secundária impossibilitando distinguir os limites entre as reflexões.

A reflexão primária corresponde a areia muito fina lamosa em meio a uma região com presença de clastos lateríticos e turfas. A taxa de TOC varia entre 30 e 40%.

Eco 4 – Consiste em uma superfície de geometria irregular, contínua e bastante reflexiva gerando fortes múltiplas em subsuperfície. Geralmente, aparece nas áreas rasas e onde o embasamento aflora como nas margens da lagoa. É marcado pela ausência de horizontes após o primeiro refletor.

Este ecocaráter está associado ao afloramento rochoso. Por vezes, assemelha-se às características do eco 3, quando apresenta uma fina camada de lama levemente oxidado, com turfa e grande variação na taxa de TOC (6 a 38%) sobre o embasamento rochoso.

Eco 5 – Refletores primários reflexivos seguidos por refletores de baixa perda de sinal que se estendem até o embasamento.

A primeira reflexão abrange, em sua maioria, sedimentos lamosos em todas as suas variações de fácies sedimentar encontradas. As regiões onde há presença de turfas, a concentração de TOC varia entre 30 a 40%, já as com lama orgânica e/ou levemente oxidada, a taxa de TOC está entre 20 e 25% e 6 e 10%, respectivamente. Areia média a muito fina também está associada a esse eco.

Eco 6 – Refletor primário com baixa reflexão seguido por um refletor secundário subjacente com forte marcação.

Corresponde a uma superfície de sedimentação lamosa com presença de areia, principalmente, entre os limites de uma sedimentação para outra. A lama varia de orgânica a levemente oxidada apresentando, por vezes, clastos lateríticos com turfas. Portanto, a taxa de TOC varia de 6% a 20%, do centro para as extremidades, alcançando as maiores concentrações onde há presença de turfas.

Eco 7 – Inicia com uma reflexão de baixa a média amplitude, seguida de refletores bastante reflexivos, contínuos e espaçados que se estendem até o limite do refletor basal. É o eco de maior distribuição e concentra sua maior parte, na porção centro-SE.

Está associado a sedimentos lamosos oxidados, passando para lama orgânica e clastos com turfas. É o eco com maior concentração de areia que varia de média a muito fina. A taxa de TOC predomina de 6 a 14% na porção central aumentando em até 25% para SE. Maiores taxas são encontradas onde há presença de turfas, porém em menores proporções.

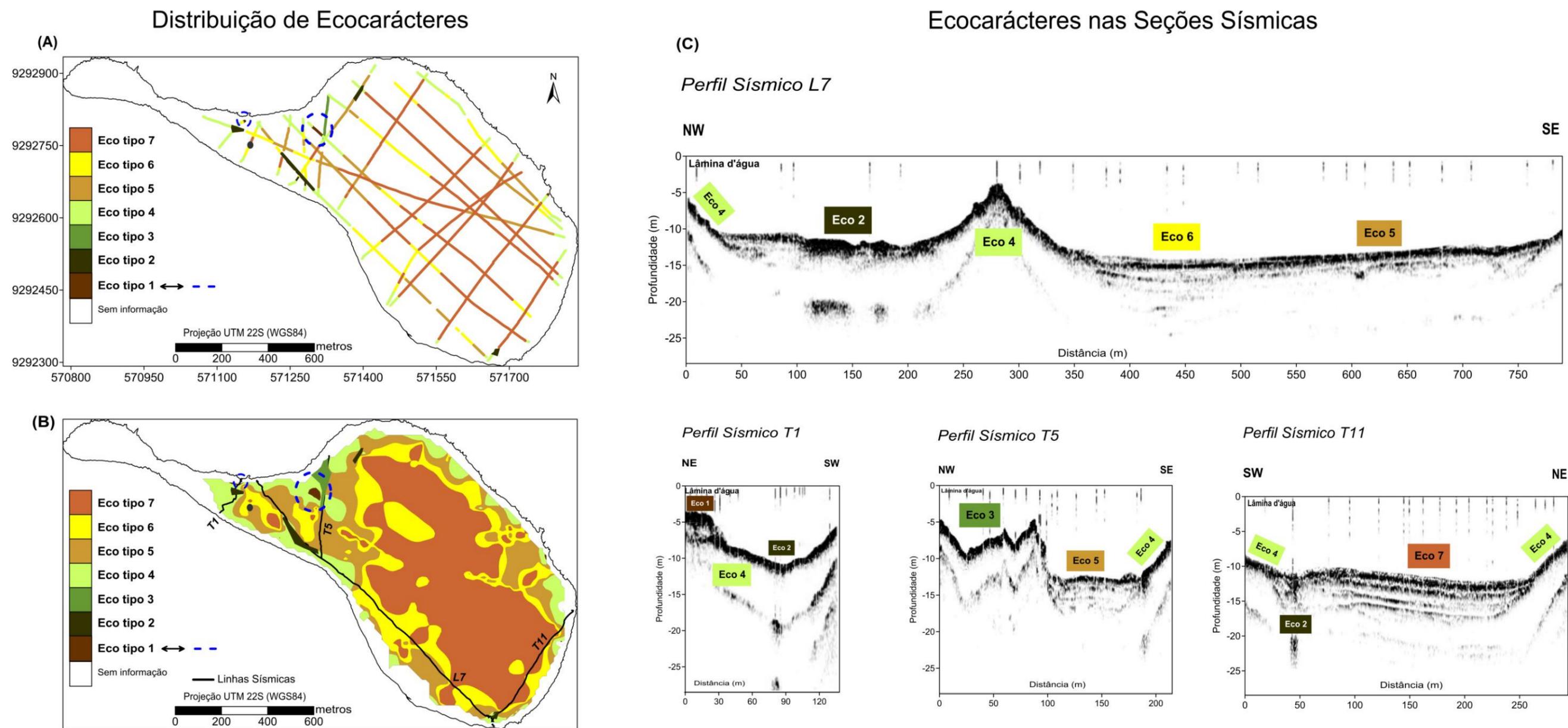


Figura 22 – Em (A), é mostrado o mapa de distribuição dos eco-caracteres reconhecidos em cada perfil levantado, em (B) observa-se o mapa de distribuição geral ao longo da lagoa. E (C), tem-se a classificação dos ecos nas seções mais representativas.

Os ecos 4, 5, 6 e 7 são predominantes e bem distribuídos em ordem crescente de distribuição enquanto que os demais, em menores proporções, se encontram em regiões restritas da lagoa. É comum a transição de um tipo de eco para outro como pode ser observado na figura 23, ocorrendo na totalidade dos perfis.

### Padrões de ecocaráteres com base na descrição dos sedimentos superficiais da Lagoa Violão

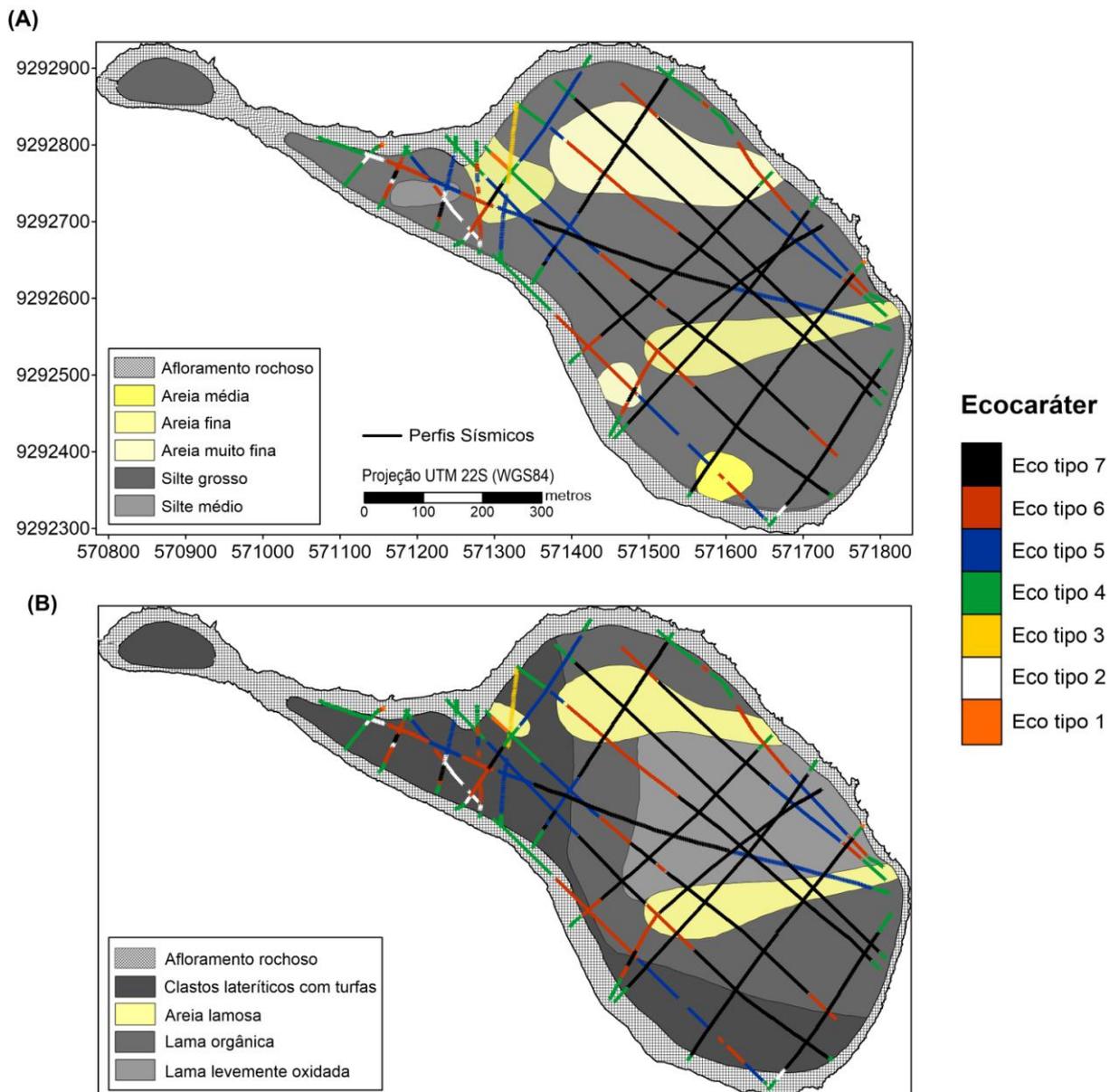


Figura 23 - Descrição sedimentológica superficial da lagoa Violão. Em (A) tem-se a classificação dos sedimentos clásticos com base em Folk & Ward (1957) e (B) mostra a classificação de fácies do depósito sedimentar superior com base em clastos e descrição orgânica (modificado de Souza Filho *et al.* 2016). Em segundo plano, a figura mostra a relação entre os diferentes tipos de ecos encontrados e a distribuição sedimentológica superficial da lagoa.

## 6 DISCUSSÃO

### 6.1 MORFOLOGIA ATUAL DA SUPERFÍCIE DE FUNDO

Para a identificação dos limites das sequências de um sistema deposicional, nesse caso da lagoa do Violão, é importante considerar seus aspectos evolutivos em diferentes níveis estratigráficos como a morfologia superficial de fundo. O primeiro nível estratigráfico investigado é a superfície do atual fundo lacustre, que limita o topo das sismossequências, sujeita a condições vigentes e determinantes no abastecimento sedimentar da lagoa como os parâmetros limnológicos, fluxos de correntes, variação nos níveis de água e a própria morfologia da bacia.

O padrão morfológico da lagoa do Violão é reflexo do processo contínuo de formação de depressões sobre a cobertura laterítica (protopseudocárstico, pseudocarstificação e colapso da crosta). Segundo Maurity, 1993; Maurity & Kotschoubey, 1995, zonas de baixa densidade associadas com fraturas preexistentes durante o processo de laterização, intensificaram a gênese do lago refletindo na sua atual morfologia (*washing basin*). Ainda com base nos autores anteriormente citados, a assimetria do relevo de fundo, evidenciado pelos setores A, B e C, pode ser explicada pela diferença de resistência, permeabilidade e porosidade entre a crosta e os horizontes argilosos sotopostos, principal causa da formação de depressões, o qual facilita a percolação das águas que removem, por eluviação e dissolução, os produtos de alteração supergênica nas porções acarretando na baixa declividade.

A setorização da bacia promove diferentes tipos de preenchimentos juntamente com a entrada e saída de água, seja pelo escoamento das pequenas drenagens envoltas, seja pela mudança sazonal no nível da água (evaporização e precipitação). Os setores de menor profundidade, como o A, são muito afetados pelo regime de precipitação, com redução considerável do nível de água e acesso quase restrito, em períodos menos chuvosos. Tal variação no nível de água, associado a sua morfologia, promovem a deposição de estratos menos espessos, principalmente por suspensão. Durante o período chuvoso, escoamentos das pequenas drenagens sugerem um aumento no aporte, até mesmo de material mais grosseiro. Ambos processos, possivelmente, são controlados por fluxos superficiais influenciados pelo ventos.

Já os setores de maiores profundidades, B e C, podem estar associados, principalmente, por fluxos internos influenciados pela diferença na densidade da água (termoclina) durante as mudanças de clima sazonais. Os fluxos intermediários influenciam em depósitos por

suspensão nas regiões mais uniformes, enquanto que os depósitos de fluxos turbidíticos são causados por processos de fluxos de fundo, por desmoronamentos ou em massa.

## 6.2 MORFOLOGIA DE SUBSUPERFÍCIE

O processo evolutivo tardio das feições formadas sobre as coberturas lateríticas e o alcance do seu imageamento em subsuperfície, permite afirmar que o embasamento rochoso é raso. A configuração transparente, associada à ausência de reflexão (*reflection-free*), corrobora com tal constatação, já que está relacionado à litologias, geralmente, homogêneas para o método sísmico. O refletor segmentado e irregular do embasamento pode ser explicado através da diminuição do sinal acústico com a profundidade em regiões de pacotes mais espessos e/ou com camadas de alta reflexão sobrepostas e, ainda, pela dinâmica de formação das feições dolinoformes, seja por processos geoquímicos de dissolução, em superfície, ou degradação da laterita em subsuperfície. Segundo Maurity, 1993; Maurity & Kotschoubey, 1994, zonas de baixa densidade associadas com fraturas preexistentes durante o processo de laterização, intensificaram a gênese do lago refletindo na sua atual morfologia (*washing basin*).

A geometria das unidades sismo-deposicionais reconhecidas permitiu interpretar diferentes processos a respeito do preenchimento sedimentar da Lagoa do Violão. A USI é caracterizada, principalmente, por uma sucessão progradacional de estratos depositados a partir de fluxos gravitacionais em meio a morfologia íngreme das margens da lagoa. Essa sucessão ocorre nas margens, evidenciada, pelas clinoformas oblíquas tangenciais e, em alguns casos, seguidas ou não pelas sigmoidais de mergulho suave em *downlap* sobre o embasamento, sugerindo uma alternância no aporte sedimentar em detrimento da mudança de energia, em níveis de lago alto ou baixo. Em níveis de lago alto, geralmente, há um aumento no fluxo sedimentar e o processo deposicional pode estar associado a fluxos de fundo (correntes de turbidez) formando frentes deltaicas e, a conseqüente, deposição de lobos turbidíticos. O mesmo ocorre no Lago Molawui (África Oriental) onde Buoniconti & Scholz (2001) afirmam que fases de nível de lago alto estão relacionadas a períodos de maior fluxo de água e aporte sedimentar para a bacia. Já em condições de lago baixo, há um menor escoamento superficial pelas áreas de drenagem, e a sedimentação ocorre num ambiente de menor energia.

Ainda na USI, padrões sub-paralelos e paralelos apresentam-se mais ao centro da lagoa onde a superfície é subsidente e parcialmente plana. Está associada a um preenchimento de baixa energia, que em determinado momento apresenta uma configuração contorcida, como mostra o perfil sísmico *T5*, relacionada a deformações sin deposicionais em conjunto com fluxos de massas em direção ao depocentro.

Os estratos da USII, próximos às margens, refletem o padrão sub-paralelo e a medida que se aproximam do centro, se dispõem mais uniformes sobre a superfície levemente irregular da USI. A distribuição dessa unidade em regiões mais planas é de baixa energia, provavelmente, influenciada pela ação eólica a partir de fluxos superficiais, e ainda, fluxo intermediário através da estratificação térmica da coluna d'água, cuja deposição se dá por suspensão refletida pelo padrão paralelo.

Na figura 14 (perfil *L2*), é observada a diminuição de reflexão nas camadas da USII a SE, podendo associar esse episódio à alta reflectância da camada superior (USIII), que compromete a reflexão das camadas subjacentes, principalmente se forem menos espessas devido ao menor espaço de acomodação em relação a porção NW. Contudo, pode ainda caracterizar uma fase de não deposição dos estratos delimitando a superfície inferior da USII como discordante.

A USIII se apresenta unicamente com o padrão paralelo, originado pelos mesmos processos ocorridos na USII, depositada em forma de *drapes*, na região mais planar (central). No entanto, nas regiões de menor profundidade, “braço” da lagoa, a sedimentação é menos espessa e segue a morfologia do embasamento, chegando a ser a única unidade encontrada. Nesse caso, as características morfológicas da porção em questão é o fator preponderante no controle do fluxo sedimentar para a lagoa, também com influência dos fluxos superficiais e a variação sazonal do nível da água. É possível perceber no topo dessa unidade e nas zonas marginais em direção à bacia, “pequenos” lóbulos identificados por Souza Filho *et al.* (2016) como fluxo de detritos constituídos de turfa com clastos lateríticos, depositados em meio a correntes de fundo ou depósitos como produto do deslizamento de sedimentos (*slumping*) sobre a superfície íngreme da lagoa.

A distribuição dos padrões internos de reflexão reflete os processos de preenchimento lacustre durante as diferentes fases de deposição e está intimamente relacionada à morfologia da bacia. Por ser a primeira unidade de deposição, a disposição das camadas da USI, influenciadas pelas características do meio (fluxos internos, estratificação térmica, variação do nível de água, fluxo sedimentar e entrada e saída de água), seguem a forma inicial da bacia, que diante de margens mais acentuadas, favorece a deposição das clinofomas

progradantes, seguindo para o padrão parcialmente planar do embasamento ao se aproximar do centro. A predominância dos padrões sub-paralelo e paralelo nas USII e USIII, ocorre em um espaço de acomodação mais uniforme, influenciado pela posterior sedimentação da USI, permitindo sua concentração, principalmente, na porção central da lagoa por suspensão.

A disposição das camadas e dos principais depocentros da bacia, revela que há um aumento da profundidade na orientação SE/NW, o qual favoreceu a geração de um maior espaço de acomodação, principalmente à NW, favorável à deposição da maior parte das camadas encontradas e as maiores espessuras. A USI possui a maior espessura, já que acompanhou a morfologia inicial da lagoa, sugerindo um período maior de deposição e/ou maior aporte sedimentar em relação às USII e USIII menos espessas. As camadas C1, C2 e C3 podem ser relacionadas a USI, enquanto que as C4 e C5 com a USII e por último, as C6 e C7 associadas com a USIII.

### 6.3 PADRÕES DE ECOCARÁTER E OCORRÊNCIAS DE ACUMULAÇÕES DE GÁS EM SEDIMENTOS SUPERFICIAIS

A distribuição superficial dos eocaráteres encontrados está relacionada, principalmente, com o tipo de material imageado, teor e presença ou não de componentes orgânicos associados a fragmentos de rochas intrínsecos à área. Tal característica pode ser estendida aos refletores subjacentes, já que possuem padrões semelhantes de reflexão em relação às primeiras camadas sedimentares correlatas.

O Eco 1 é pontual, provavelmente relacionado a resquícos de vegetação em meio a matriz sedimentar sotoposta, já que a lagoa é circundada pela presença abundante da vegetação local, inclusive nas proximidades das áreas de drenagens.

O Eco 2 está associado a feições acústicas de gás junto aos sedimentos da USIII sob condições favoráveis para o acúmulo intrassedimentar, nesse caso, por fatores naturais. Por ser um ambiente de baixa energia, camadas de matéria orgânica são acumuladas principalmente nas superfícies de maiores profundidades produzindo gás entre os sedimentos (Judd & Hovland 1992; Garcia-Garcia *et al.* 1999; Garcia-Gil *et al.* 1999). A maior parte do gás superficial provém da geração de metano formado pela decomposição da matéria orgânica por bactérias metanogênicas (FLOODGATE & JUDD 1992).

O padrão 3 ( Eco 3) possui características que correspondem ao embasamento aflorante próximo a pequenas drenagens locais, que contribuem para o escoamento de um domínio de areias para o interior da lagoa, o qual corresponde a primeira reflexão.

O Eco 4 está intimamente relacionado com o embasamento rochoso, evidenciado pela predominância nas bordas onde afloram. Podem ser observados em condições de lago baixo.

A primeira reflexão do Eco 5 corresponde a uma superfície predominantemente lamosa, porém a alta refletância desse padrão está associada, em maior parte, à presença de turfas com significativo teor de TOC, além das demais fácies mapeadas mas com menor taxa de TOC. A alta reflexão da primeira camada pode ter implicado na diminuição do sinal acústico com a profundidade, assim como a mudança na textura do substrato.

As características do Eco 6 denotam uma superfície lamosa que, mesmo com a presença de sedimentação grosseira, MO (matéria orgânica) e/ou material oxidado, permitiu a penetração. Entretanto, as estruturas internas possuem maior refletância e assim, menor penetração do sinal sísmico (García-García *et al.* 2004). Essa característica sugere uma possível mudança para um material mais grosseiro, influenciados pelo alcance de depósitos arenosos, porém ainda com presença considerável de lama (Quaresma *et al.* 2001).

O Eco 7 se concentra, majoritariamente, na porção central onde há predominância de lama orgânica com baixos níveis TOC, o qual permitiu a boa penetração do sinal acústico até o embasamento. Pode estar relacionada às mesmas características do Eco 6, cuja deposição é pelágica por influência de fluxos intermediários (Souza Filho *et al.* 2016). O sinal dos refletores em subsuperfície é afetado por uma turbidez acústica caracterizada por uma mancha de reflexão irregular, como extensão do efeito de gás presentes entre os sedimentos da USIII.

O fator chave para a correlação entre os ecocaráteres e os depósitos superficiais é o teor dos componentes orgânicos, material oxidado e TOC presentes nos sedimentos. A maior parte da sedimentação superficial é lamosa, principalmente na região central (Souza Filho *et al.* 2016), o qual permite boa penetração. Porém, a presença de turfa, MO e material oxidado oriundo da decomposição laterítica, determinam as maiores refletâncias do sinal, respectivamente, além da mudança de material mais fino para mais grosseiro, como as areias e areia lamosa.

Lagos são, naturalmente, ambientes de baixa energia muitas vezes oferecendo condições favoráveis, natural ou antrópica, para a ocorrência e acúmulo de gases, dentre eles: sedimentos superficiais ricos em matéria orgânica, variações na temperatura do substrato, salinidade variável e intermitência entre condições óxicas e anóxicas (Thieben *et al.* 2006). A lagoa do Violão apresenta características ideais para a formação de gás raso, com exceção da

salinidade, influenciados, principalmente, pelos sedimentos lamosos ricos em MO junto a USIII. Com base na forma, presença ou não de refletores em subsuperfície e textura da reflexão acústica, descritos por Taylor (1992) e Baltzer *et al.* (2005), foi possível identificar e classificar a assinatura de gás raso como Sombra Negra (*Black Shadow* - Baltzer *et al.* 2005) associadas a Turbidez Acústica, cujo acúmulo se dá por fatores naturais. A Sombra Negra caracteriza-se, principalmente, por sinais muito escuros em superfície, estendendo-se de forma brusca tanto lateral quanto em profundidade até o final dos perfis. De acordo com Félix (2012), o processo ocorre porque o pulso sísmico dispersa logo no substrato que reflete os sedimentos superficiais, impedindo a penetração do sinal. Ao mesmo tempo, as reverberações da primeira camada (Ferreira, 2009) ou reverberações de lâmina de água (Kearey *et al.* 2009) geram as múltiplas subjacentes a partir de sedimentos saturados em gás.

A Turbidez Acústica ocorre como fruto também da dispersão do sinal sísmico, porém diferenciadas pela presença de bolhas de gás “*in situ*” que mascaram os refletores subsuperficiais, mas permite seguir os refletores mais fortes (Fannin, 1980). Ocorrem próximo as zonas de Sombra Negra.

## 7 CONCLUSÕES

A Lagoa do Violão é umas das dezenas de lagoas desenvolvidas sobre as superfícies lateríticas descontínuas dos platôs de Carajás, sul do Pará. Constitui como grande registro paleoambiental da região Amazônica, além de um processo de formação peculiar, cuja evolução ainda é pouco desvendada.

A lagoa do Violão possui desníveis morfológicos que são determinantes no preenchimento sedimentar, os quais a caracterizam como uma “*washing basin*”, já que se assemelha a uma bacia de margens íngremes e região central, parcialmente plana. Foi possível identificar três setores morfológicos: o setor A, à NW que é conectado ao setor B e, por último o setor C na porção SE. Os setores fazem referência às porções mais rasas, profundas e intermediárias da lagoa, respectivamente, sujeitas à dinâmica lacustre. O padrão morfológico da lagoa do Violão é reflexo do processo contínuo de formação de depressões sobre a cobertura laterítica que segundo Maurity, 1993; Maurity & Kotschoubey 1994, estão associadas a zonas de fraturas preexistentes durante o processo de laterização.

A geometria das unidades sismo-deposicionais reconhecidas permitiu interpretar diferentes processos a respeito do preenchimento sedimentar da Lagoa do Violão. A USI é caracterizada, principalmente, por uma sucessão progradacional de estratos depositados a partir de fluxos de fundo (correntes de turbidez) e gravitacionais, em meio a morfologia íngreme das margens da lagoa. A sucessão é evidenciada pelas clinofomas oblíquas tangenciais e sigmoidais sugerindo alternâncias no aporte sedimentar, em detrimento da mudança de energia em níveis de lago alto ou baixo. Padrões sub-paralelos a paralelos apresentam-se mais ao centro da lagoa onde a superfície é subsidente e parcialmente plana. Estão presentes em todas as US's, na maior parte, concordantes entre si. A deposição está associada a um preenchimento de baixa energia, provavelmente, influenciada pela ação eólica a partir de fluxos superficiais, e ainda, fluxo intermediário através da estratificação térmica da coluna d'água, cuja deposição se dá por suspensão.

A distribuição dos padrões internos de reflexão reflete os processos de preenchimento lacustre durante as diferentes fases de deposição e está intimamente relacionada à morfologia da bacia. A disposição das camadas e dos principais depocentros da bacia, revela que a USI possui maior espessura, já que acompanhou a morfologia inicial da lagoa, sugerindo um período maior de deposição e/ou maior aporte sedimentar em relação às USII e USIII menos espessas.

O reconhecimento de 7 ecofácies permitiu a relação entre as assinaturas acústicas e os dados de distribuição de sedimentos superficiais de fundo realizados por Souza Filho *et al.* (2016), o qual possibilitou uma visão geral da deposição superficial da Lagoa do Violão, sendo os ecos de alta reflexão relacionados, predominantemente, a sedimentos lamosos com presença de turfas e, em alguns momentos, à lama orgânica ou oxidada, que favorecem a ocorrência de gases nos interstícios sedimentares, oriundos da decomposição de matéria orgânica. Em contrapartida, reflexões de médio a baixo contraste de impedância se remetem a areia muito fina com teor de lama considerável e boa propagação.

A investigação sismoestratigráfica, a partir de registros sísmicos rasos garantiu bons resultados no reconhecimento e mapeamento dos elementos sismo-deposicionais, tal como a morfologia atual de fundo da lagoa. Por apresentarem alta resolução e grande precisão, esses dados permitiram interpretações satisfatórias, contribuindo na integralização do contexto geológico regional. Partindo dessa visão, a continuação do estudo sobre a região em questão, através da sísmica de alta resolução pode continuar a proporcionar uma análise complementar sobre a geologia, geomorfologia e estratigrafia da região do topo de platô da Serra Sul de Carajás.

## REFERÊNCIAS

- Absy M.L., Cleef M., Fournier A., Martin L., Servant M., Sifeddine A., Silva M.F., Soubies F., Suguio K., Turcq B., Van der Hammen T. 1991. Mise en évidence de quatre phases d'ouverture de la forêt dense dans le sud-est de l'Amazonie au cours des 60.000 dernières années. Première comparaison avec d'autres régions tropicales. *In: Cmpte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris. Paléoclimatologie/Paleoclimatology. Paris II.* Disponível em: <[http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_5/b\\_fdi\\_30-30/31917.pdf](http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_30-30/31917.pdf)>. Acesso em 13 out. 2015.
- Araújo O.J. & Maia R.G.N. 1991. (Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil), Serra dos Carajás. *Folha SB22-Z-A Pará*, escala 1:250.000: texto explicativo. Brasília, DF, DNPM/CPRM. 164p.
- Ayres Neto, A. 2001. Uso da sísmica de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. *Brazilian Journal of Geophysics*, **18**(3):242-256. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbg/v18n3/a04v18n3>. Acesso em: 05 dez. 2001.
- Baltzer A., Tessier B., Nouzé H., Bates, R., Moore C., Menier D. 2005. Seistec seismic profiles: a toll to differentiate gas signatures. *Marine Geophysical Researches*, **26**(2-4):235-245.
- Bridge J. & Demicco R. 2008. Lakes. *In: Bridge J. E P. Demicco (eds.). Earth surface processes, landforms and sediment deposits.* Cambridge University Press, 835, New York. p. 462-472.
- Brown Jr, L.F. & Fisher W.L. 1980. *Seismic stratigraphic interpretation and petroleum exploration.* Texas, American Association of Petroleum Geologists. Department of Education University of Texas at Austin. Bureau of Economic Geology, 56p. (Continuing education course note series, 16).
- Buoniconti M.R. & Scholz C.A. 2001. The role of lake level dynamics in lacustrine stratal architecture and sequence development: evidence from the Songwe Delta, Lake Malawi, East Africa. *In: AAPG, Annual Convention of the American Association of Petroleum Geologists, Denver (Colorado, EUA). Abstract.* p. A-29.
- Bush M.B., Miller M.C., de Oliveira P.E., Colinvaux P.A. 2002. Orbital forcing signal in sediments of two Amazonian lakes. *Journal of Paleolimnology*, **27**(1):341-352.
- Carvalho A.T. 2010. *Sedimentologia, mineralogia e geoquímica dos sedimentos do pântano Mauritia na serra sul, Carajás (Pará).* MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 131 p.
- Colinvaux P.A., Oliveira P.E. de, Bush M.B. 2000. Amazonian and neotropical plant communities on glacial time-scales: The failure of the aridity and refuge hypotheses. *Quaternary Sciences Reviews*, **19**(1):141-169.
- Corrêa S.L.A. 1996. *Evolução geoquímica das crostas lateríticas e dos sedimentos sobrepostos na estrutura de Seis Lagos (Amazonas).* PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 160p.

- Costa M.L., Carmo M.S., Behling H. 2005. Mineralogia e geoquímica de sedimentos lacustres com substrato laterítico na amazônia brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, **35**(2):165-176.
- Costa M.L., Menezes M.E.N.S., Carvalho L.C.F., Costa J.A.V. 2007. Produção bibliográfica sobre ambientes lacustres no Brasil. *Revista Acta Geográfica*, **1**(1):113-122. Disponível em: <http://revista.ufr.br/actageo/article/view/135/350>. Acesso em: 13 out. 2015.
- Damuth Jr. 1975. Echo character of the western equatorial Atlantic floor and its relationship to the dispersal and distribution of terrigenous sediments. *Marine Geology*, **18**(2):17-45.
- Damuth Jr. & Hayes. 1977. Echo character of the east Brazilian continental margin and its relationship to sedimentary processes. *Marine Geology*. **24**(2):73-95.
- Dietze E., Wünnemann B., Diekmann B., Aichner B., Hartmann K., Herzsuh U., Ijmker J., Jin H., Kopsch C., Lehmkuhl F., Li S., Mischke S., Niessen F., Opitz S., Stauch G. e Yang S. 2010. Basin morphology and seismic stratigraphy of Lake Donggi Cona, north-eastern Tibetan Plateau, China. *Quaternary International* **218**(2):131-142.
- Docegeo. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, 32º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. *Anais*. p. 11-56.
- Elias V.O., Simoneit B.R.T., Cordeiro R.C., Turcq B. 2001. Evaluating levoglucosan as an indicator of biomass burning in Carajás, Amazônia: A comparison to the charcoal Record. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **65**(2):267-272.
- Fannin N.G.T. 1980. The use of regional geological surveys in the North Sea and adjacent areas in recognition of offshore hazards. In: Ardu D.A. (ed.). *Offshore site investigation*. London, Graham & Trotman, p. 5-21.
- Félix C.A. 2012. *Evolução quaternária superior e formação de gás raso em ambiente estuarino tropical: o caso do Canal de Bertioga, São Paulo*. MS Dissertation, Instituto de Oceanografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 111 p.
- Ferreira P.P. 2009. *Características da atenuação das reflexões múltiplas da superfície livre utilizando a extrapolação do campo de onda*. MS Dissertation, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 161 p.
- Floodgate G.D. & Judd A.G. 1992. The origins of shallow gas. *Continental Shelf Research*, **12**(10):1145-1156.
- Folk R.L., Ward W.C. 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentology and Petrology*. **27**(1):3-27.
- Garcia-Garcia A., Vilas F., Garcia-Gil S. 1999. A seeping seafloor in Ria environment: Ria de Vigo (Spain). *Environment Geology*, **38**(4):296-300.
- Garcia-Garcia A., Garcia-Gil, S., Villas F. 2004. Echo characters and recent sediment processes as indicated by high-resolution sub-bottom profiling in Ría de Vigo (NW Spain). *Geo-Marine Letters*. **24**(1):32-45.
- Garcia-Gil S., Garcia-Garcia A., Vilas F. 1999. Identificación sísmico-acústica de las diferentes formas de aparición de gas en la Ría de Vigo. *Rev. Soc. Geol. España*. **12**(2):301-307.

Gibbs A.K., Wirth K.R. 1990. Geological setting of the Serra dos Carajás iron deposits, Brazil. In: Chauvel, J.J. (ed.). *Ancient Banded Iron Formations*. Athens, Regional Presentations, p. 83–102.

Golder A.B. 2010. Geologia. In: Projeto Ferro Carajás S11D. Pará: Vale. 563p. (Estudo de Impacto Ambiental – EIA, volume II- A).

Gomes M.P. 2009. *Aquisição, processamento e análise de dados de sísmica de alta resolução na plataforma continental norte do Rio Grande do Norte: vale inciso do rio Açú*. MS Dissertation, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 125 p.

Hooghiemstra H. & Van Der Hammen T. 1998. Neogene and Quaternary development of the neotropical rain forest: the forest refugia hypothesis, and a literature overview. *Earth-Science Reviews*, **44**(3-4):147-183.

Judd A.G. & Hovland M. 1992. The evidence of shallow gas in marine sediments. *Continental Shelf Research*. **12**(10):1081-1095.

Kearey P., Brooks M., Hill I. 2009. *Geofísica de exploração* [S.I]. Oficina de Textos, 440p.

Lee G. Kim H. Jou H., Lee Y. 2005. Shallow gas in the central part of the Korea Strait shelf mud of the southeastern coast of Korea. *Continental Shelf Research*. **25**(16):2036-2052.

Lobato L.M., Figueiredo e Silva R.C., Rosière C.A., Zucchetti M., Baars F.J., Pimentel M., Rios F.J., Seoane J.C., Monteiro A.M. 2005. Hydrothermal origin for the iron mineralisation, Carajás province, Pará State, Brazil. In: SEG Reviews. *Proceeding of Iron Ore Publication Series*. **8**:99-110.

Macambira J.B., Ramos J.F.F., Assis J.F.P., Filgueiras A.J.M. 1990. *Projeto Serra Norte e Projeto Pojuca: relatório final*. Belém, UFPA, DOCEGEO, SEPLAN, DNPM, 150p.

Macambira M. J. B. & Lancelot J. 1991. Em busca do embasamento Arqueano da região do rio Maria, estado do Pará. In: SBG, 3º Simpósio de Geologia, Belém. *Anais*. p. 49-58.

Machado N., Lindemayer Z.G, Krogh T.E., Lindemayer D.H. 1991. U-Pb Geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*. **49**(3-4):329-354.

Maurity C.W. 1993. *Evolução recente da cobertura de alteração no platô N1 – Serra dos Carajás*. MS Dissertation, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 95 p.

Maurity C. W., Kotschoubey B. 1995. Evolução recente da cobertura da alteração no Platô N1 – Serra dos Carajás-PA. Degradação, Pseudocarstificação, Espeleotemas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. Série Ciências da Terra **7**:331-362.

Mayle F.E., Burbidge R., Killeen T.J. 2000. Millennial-scale Dynamics of southern Amazonian rain forests. *Science*. **290**:2291-2294.

Mdgeo. 2006. *Caracterização hidrogeológica do corpo S-11 do depósito ferrífero de serra sul*. Belém, CVRD. Relatório interno.

- Meirelles M.R. & Dardenne M. 1991. Vulcanismo basáltico de afinidade shoshonítica em ambientes de arco arqueano, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás – Pará. *Revista Brasileira de Geociências*. **21**(1):41-50.
- Mougeot R., Respaut J.P., Briquet L., Ledru. 1996. Isotope geochemistry constrains for Cu, Au mineralizations and evolution of the Carajás province – Pará, Brazil. *In: SBG, 39° Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador. Anais*. p. 321-324.
- Myrbo A. & Wright H.E., Jr. 2008. *Limnological research center core facility*. SOP Series. livingstone-bolivia. Draft **3**(1):12.
- Nunes J.A., 2009. *Florística, estrutura e relações solo-vegetação em gradiente fitofisionômico sobre canga, na Serra Sul, Flona de Carajás – Pará*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Botânica, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 101p.
- Nogueira A.C.R. & Soares E.A.A. 1996. Fácies sedimentares da formação prosperança, proterozóico superior da bacia do Amazonas, ao norte da cidade de Manaus. *In: SBG, 4° Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém. Resumos*. v. 5, p. 214-216.
- Olszewski W.J., Wirth K.R., Gibbs A.K., Gaudette H. E. 1989. The Age, origin and tectonics of the Grão Pará Group and associated rocks, Serra dos Carajás, Brazil: Archean continental volcanism and rifting. *Precambrian Research*. **42**(3-4):229-254.
- Pinheiro R.V.L. 1997. *Reactivation history of the Carajás and Cizento Strike-Slip systems, Amazon, Brazil*. PhD Thesis, University of Durham, England, 408 p.
- Quaresma V.S., Dias G.T.M., Baptista Neto J.A. 2001. Caracterização da ocorrência 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. *Brazilian Journal of Geophysics*. **18**(2):201-214.
- Resende N.P., Barbosa A.L.M. 1972. *Relatório de pesquisa de minério de ferro, distrito ferrífero da serra dos Carajás, Estado do Pará*. Belém: AMZA. p. 248. (Relatório final, 1).
- Ribeiro H.J.P. (ed.). 2000. *Estratigrafia de sequência – fundamentos e aplicações*. São Leopoldo, 428p.
- Rosière C.A., Baars F.J., Seoane J.C.S., Lobato L.M., Silva L.L. da Souza S.R.C., Mendes G. E. 2005. Structure and Iron mineralisation of the Carajás province. *In: SEG Reviews. Proceedings of Iron Ore Publication Series*. **8**:143-150.
- Sahoo P.K., Souza-Filho P.W.M., Guimarães J.T.F., Silva M.S., Costa F.R., Manes C.O., Oti D., Silva Júnior R.O., Dall’Agnol R. 2013. *A multi-proxy geochemical study of surface sediments in a plateau lake of Carajás in the southeastern Amazon region: implication for provenance and post depositional processes*. Belém: ITV/UFPA. 54p. Relatório técnico.
- Schnurrenberger D., Russell J., Kelts K. 2003. Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. *Journal of Paleolimnology* **29**:141–154.
- Sifeddine A., Martin L., Turcq B., Volkmer-Ribeiro C., Soubiès F., Cordeiro R.C., Suguio K. 2001. Variations of the Amazonian rainforest environment: a sedimentological record covering 30,000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. **168**(3-4):221-23.

- Sifeddine A., Wirrmann D., Albuquerque A.L.S., Turcq B., Cordeiro R.C., Gurgel M.H.C., Abrão J.J. 2004. Bulk composition of sedimentary organic matter used in palaeoenvironmental reconstructions: examples from the tropical belt of South America and Africa. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **214**(1-2):41-53. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031018204003220>. Acesso em: 13 out. 2015.
- Soubiés F., Suguio K., Martin L., Leprun J.C., Servant M., Turcq B., Fournier M., Delaune M., Sifeddine A. 1991. The quaternary lacustrine deposits of the Serra dos Carajás (state of Pará, Brazil)-ages and other preliminary results. *Bol. IG-USP, Publ. Esp.*, **8**:223-243. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/bigsp/article/view/54732/58382>. Acesso em 13 out. 2015.
- Souza L.A.P. 2006. *Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas*. MS Dissertation, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 311 p.
- Souza-Filho P.W.M., Guimarães J.T.F., Silva M.S., Costa F.R., Sahoo P.K., Maurity, C.W., Dall'Agnol R. 2016. Basin morphology, sedimentology and seismic stratigraphy of an upland lake from Serra dos Carajás, southeastern Amazon, Brazil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, **11**(1):71-83.
- Suguio K. 1999. *Geologia do quaternário e mudanças ambientais: Passado + presente = futuro ?*. São Paulo: Paulo's Comunicação e Artes Gráficas, 366p.
- Talbot M.R. & Allen P.A. 1996. Lakes. In: Reading, H.G. (ed.). *Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy*. New York, Wiley-Blackwell, p. 83-124.
- Taylor D.I. 1992. Nearshore shallow gas around the U.K. coast. *Continental Shelf Research*. **12**(10):1135-1144.
- Teixeira J.B.T. & Eggler D.H. 1994. Petrology, geochemistry and tectonic setting of archaean basaltic and dioritic rocks from the N4 iron deposit, serra dos Carajás, Pará, Brazil. *Acta Geológica Leopoldensia*, **40**:71-114.
- Thieben O., Schmidt M., Theilen F., Schmitt M., Klein G. 2006. Methane formation and distribution of acoustic turbidity in organic-rich surface sediments in the Arkona Basin Sea. *Continental Shelf Research*, **26**(19):2469-2483.
- Tóth T.R., Vida & Horváth F. 1997. Shallow-water single and multichannel seismic profiling in a riverine environment. *The Lead. Edge*, **16**(11):1691-1695.
- Turcq B., Albuquerque A.L.S., Cordeiro R.C., Sifeddine A., Simões Filho F.F.L., Souza A.G., Abrão J.J., Oliveira F.B.L., Silva A.O., Capitâneo J. 2002. Accumulation of organic carbon in five Brazilian lakes during the Holocene. *Sedimentary Geology*, **148**(1-2):319-342.
- Posamentier H.W., Jervey M.T., Vail P.R. 2012. Eustatic controls on clastic deposition I: conceptual framework. In: *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*. Texas, 16p. (Special Publication, 42).

Vail P.R., Mitchum R.M. JR, Sangree J.B. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 6: Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. *In: Payton C.E. (ed.). Seismic stratigraphy--applications to hydrocarbon exploration.* American Association of Petroleum Geologists, 516, Tulsa, AAPG Memoir 26. p. 117-133.

Van der Hammen T. & Absy M.L. 1994. Amazonia during the last glacial. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology.* **109**(1-2):247-261.

Wetzel R.G. 1983. Opening remarks. *In: Wetzel, R.G. (ed.). Periphyton of freshwater ecosystems.* Netherlands, W. Junk publishers p. 339-346. (Developments in hydrobiology, 17).