



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

RELATÓRIO DO TRABALHO FINAL

Estudo geofísico do Rio Solimões na Região da Ilha da Marchantaria – AM

Discente: 17/0014070 – João Vitor Bonifácio Duarte

Coordenador: Prof. Marco Ianniruberto

Banca avaliadora:
Prof.: Marcelo Rocha
Prof.: Diogo Olivetti

BRASÍLIA
Outubro de 2022

RESUMO

O trabalho se baseia na aplicação, no processamento e na interpretação dos métodos de geofísica aquática de sonografia, batimetria e sísmica, sistemas de aquisição os quais funcionam segundo o mesmo princípio: a emissão, transmissão, reflexão e difusão de ondas acústicas entre dois ou mais meios físicos de propriedades elásticas distintas (coluna d'água, camadas sedimentares etc.). A difusão se dá em função da textura e morfologia do fundo, que determinam o ângulo de incidência dos pulsos. A granulometria do sedimento o grau de compactação e a impedância acústica do meio também são fatores que influenciam no comportamento dos pulsos. Foram obtidas informações do fundo e subfundo (Sísmica de Reflexão), da morfologia (Sonografia), e da topografia (Batimetria) da região estudada, que combinados, permitiram a visualização de contatos litológicos, afloramentos, dunas de diferentes classificações, do curso principal do rio em algumas partes e cursos antigos, bem como suas localizações. Tudo isso facilita o entendimento do funcionamento do rio, conseqüentemente trazendo uma maior segurança na navegabilidade dele. É importante também no aspecto exploratório, uma vez que o estudo e monitoramento são necessários para uma maior assertividade e redução de custos e impactos de projetos, sejam eles econômicos ou civis.

Palavras-chave:

Sísmica de reflexão, sonografia, batimetria, geofísica aquática, morfologia, difusão, afloramento, navegação.

ABSTRACT

The geophysical methods applied here, brought information from the bottom and sub-bottom (Reflection Seismic), from the morphology (Sonography), and from the topography (Bathymetry) of the studied region, which combined, allowed the visualization of lithological contacts, outcrops, dunes of different classifications, of the main course of the river in some parts, and old courses, as well as their locations.

These acquisition systems work according to the same principle: the emission, transmission, reflection, and diffusion of acoustic waves between two or more physical layers with different elastic properties (water column, sedimentary layers, etc.). Diffusion is given by the texture and morphology of the background, which determines the angle of incidence of the pulses. The granulometry of the sediment, the degree of compaction and the acoustic impedance of the layers are also factors that influence the behavior of the pulses.

This study is extremely important for understanding the operations of the river, consequently, making it safer to navigate. It is also important in the exploratory aspect, since the study and monitoring are necessary for a greater assertiveness and a reduction of costs and impacts on projects, whether economic or civil projects.

Key words:

Reflection seismic, sonography, bathymetry, aquatic geophysics, morphology, diffusion, outcrop, navigation.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de primeiramente agradecer aos meus pais, José e Kênia, à minha irmã Vitória, à minha namorada Gabriela, e à toda minha família, que sempre estiveram presentes e me deram todo apoio, amor e conselhos para dar cada passo dessa caminhada. Agradeço ao prof. Marco, meu orientador, por todos os ensinamentos passados ao longo do curso, por toda disponibilidade e paciência comigo como aluno, como diretor e membro da Phygeo e especialmente como formando, nesta etapa final da Graduação.

Aos meus amigos de longa data, em especial meu compadre Lallamand, o Guilherme, Menezes, Aguiar, e todos os outros que foram minha “válvula de escape” durante os momentos difíceis, bem como os primeiros a comemorarem comigo pelas vitórias.

Aos professores e toda equipe do IG e do Obsis, pela dedicação e carinho que tiveram durante toda a minha jornada, para passar seus ensinamentos e conselhos. Em especial aqueles que tiveram muita paciência comigo nas saídas de campo como a prof. Natalia Hauser, Adalene, Elder e Tati; a prof. Rejane, que me incentivou na minha primeira publicação, ao Welitom, Marcelo, Sand, Roberta, Monica, Maria Emília, Lucas, Soares, Adriana, Abreu, Cesar, Péricles e todos os outros que fizeram parte da construção da minha jornada acadêmica até aqui.

Aos amigos e colegas que a UnB me trouxe, Andrew, Vinicius, Ana Livia, Ana Luiza, Duda, Genesson, Aline, Marcos, Gabriel, Erick, Malu, Natan, Guilherme, Heitor, Ueldson, Celso, Yuri, Amanda, Gabigol, Moara, Fellipe, Zaka, Gustavo, Bibias, Luísa, Portela, Brayner, Thiago, e todos os outros que estiveram comigo de alguma forma durante essa árdua caminhada, compartilhando desesperos, experiências, pernilongos, filas do RU, apanhando no ping-pong, e todos os momentos de companheirismo e vitórias dentro dessa faculdade.

Por fim, a todos que fazem ou já fizeram parte da família Phygeo, uma empresa que me trouxe um conhecimento e crescimento absurdo nessa graduação, momentos únicos e muito especiais, além de um contato com o mercado Geofísico que só ela poderia trazer.

“Uma das maiores qualidades do ser humano, é a de poder se adaptar.”

Duarte, João Vitor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bacia hidrográfica amazônica em território brasileiro. (Fonte: Turquetti, 2019).....	11
Figura 2 – a) Mapa de localização dos estados brasileiros, destacado de verde o estado do Amazonas; b) Mapa de localização das microrregiões do estado do Amazonas, destacado de amarelo a microrregião de Manaus; c) Mapa de localização da região de estudo, demarcada de azul a zona onde foram realizados os levantamentos, na qual ao centro se encontra a ilha da Marchantaria.....	12
Figura 3 – Mapa geológico simplificado do Estado do Amazonas. Fonte: adaptado de CPRM (2005a)	13
Figura 4 – Localização e limites das bacias do Estado do Amazonas, dos principais arcos estruturais e das formações aflorantes. (Fonte: Souza et al., 2013)	14
Figura 5 – Ilustração da erosão fluvial nas margens côncavas do canal. (Fonte: Press et al., 2006)	16
Figura 6 – Mapa de potencial de agressividade climática na Amazônia legal. (Fonte: IBGE).....	18
Figura 7 – Transmissão e reflexão do sinal sísmico de acordo com a variação da impedância acústica das camadas sedimentares abaixo do fundo. (BUCHANAN, 2005).....	24
Figura 8 - Ilustração de uma aquisição com o Sonar de Varredura Lateral. Fonte: www.ga.gov.au/scientific-topics/marine/	25
Figura 9 - Ilustração de diferentes exemplos do retroespalhamento acústico. a) Superfície lisa e baixo contraste de impedância acústica, pouco reflexão, pouco retorno de sinal, alta refração; b) superfície rochosa, alto contraste de impedância acústica, alta reflexão, bastante retorno de sinal, pouca energia refratada; c) superfície rugosa, médio contraste de impedância acústica, média reflexão, bom retorno de sinal, moderada energia refratada; d) superfície extremamente lisa e homogênea, alto contraste de impedância acústica, reflexão quase total da energia incidente, nenhum retorno de sinal, pequena energia refratada.	26
Figura 10 – Ilustração de um levantamento batimétrico multifeixe.	27
Figura 11 - Movimentos de uma embarcação. (Fonte: KONGSBERG MARITIME, 2016)	28
Figura 12 - Fluxograma do Trabalho	29
Figura 13 – a) Mapa de localização dos estados brasileiros, destacado de verde o estado do Amazonas; b) Mapa de localização das microrregiões do estado do Amazonas, destacado de amarelo a microrregião de Manaus; c) Mapa de localização da região de estudo, com a localização das linhas de aquisição sísmicas e de sonografia e das malhas de batimetria.	33
Figura 14 - Perfil sísmico da linha 3 com marcações destacadas de marrom, identificando contatos interpretados como rocha-sedimento.....	34
Figura 15 - Perfil sísmico da linha 10 com marcações destacadas de marrom, identificando contatos interpretados como rocha-sedimento.....	35
Figura 16 - Perfil sísmico da linha 19.....	36
Figura 17 - Perfil sísmico da linha 23 com marcações destacadas de marrom, identificando contatos interpretados como rocha-sedimento.....	37
Figura 18 - Perfil sísmico da linha 23 com marcações destacadas de marrom, identificando contatos interpretados como rocha-sedimento.....	38
Figura 19 - Perfil sísmico da linha 31 com marcações destacadas de marrom, identificando contatos interpretados como rocha-sedimento.....	39
Figura 20 - Perfil sísmico da linha 54 com marcação destacada de marrom, identificando contato interpretado como rocha-sedimento.....	40

Figura 21 - Seção da linha L3009 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.	42
Figura 22 - Seção da linha L10000 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado	43
Figura 23 - Seção da linha L14012 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.	44
Figura 24 - Seção da linha L14016 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.	45
Figura 25 - Seção da linha L14018 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.	46
Figura 26 - Seção da linha L14018 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.	47
Figura 27 - Seção da linha L14018 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.	48
Figura 28 - Seção da linha L16029 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.	49
Figura 29 - Seção da linha L19041 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.	50
Figura 30 - Mosaico que une o mapa de localização das linhas de aquisição, recorte da linha 10 do SBP (figura 15), seções da linha L14018 (figuras 25 e 27) e seção da linha L3009 (figura 21) do Sidescan, para facilitar a visualização das considerações finais.	52
Figura 31 - Mosaico que une o mapa de localização das linhas de aquisição à direita, recorte da linha 10 do SBP (figura 15), e um recorte da linha L14018 (figura 26) do Sidescan, para facilitar a visualização das considerações finais.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de análises físico-químicas em águas de poços de abastecimento público de diversas cidades, não contaminados, perfurados nos principais aquíferos que ocorrem no estado do Amazonas. (Fonte: CPRM, 2010).....	20
Tabela 2 – Resultado do monitoramento hidrológico no estado do Amazonas. (Fonte: BRASIL, 1994)	21
Tabela 3 - Resultados médios das medições líquidas com perfilador acústico Doppler em alguns rios da bacia Amazônica no período de 2007 a 2009. (Fonte: CPRM, 2009)	21
Tabela 4 — Sensores utilizados.....	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Objetivos	11
1.1.1. Objetivo geral do trabalho	11
1.1.2. Objetivos específicos.....	11
2. ÁREA DE ESTUDO	12
2.1. Contexto geológico-estrutural	13
2.2. Uso e ocupação do solo	15
2.3. Climatologia.....	16
2.4. Hidrologia	19
2.4.1. Águas Subterrâneas.....	19
2.4.2. Águas Superficiais.....	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
3.1. Sísmica de Reflexão	23
3.2. Sonografia	24
3.3. Batimetria Multifeixe	26
3.4. Navegação	27
4. METODOLOGIA E MATERIAIS.....	29
4.1. Aquisição dos dados geofísicos de batimetria	30
4.1.1. Processamento dos dados geofísicos de batimetria.....	30
4.2. Aquisição dos dados geofísicos com Perfilador de Sub-fundo.....	31
4.2.1. Processamento dos dados geofísicos do perfilador de sub-fundo	31
4.3. Aquisição de dados de Geofísica com Sonar de Varredura Lateral	32
4.3.1. Processamento dos dados Geofísicos do Sonar de Varredura Lateral	32
5. RESULTADOS	33
5.1. Perfis sísmicos do Perfilador de Sub-fundo.....	34
5.2. Perfis do Sonar de Varredura Lateral.....	42
5.3. Considerações finais.....	51
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

Desde o seu início, a geofísica trouxe soluções em diversas áreas, inclusive para o meio ambiente, utilizando das diferentes propriedades físicas dos materiais, ela possibilita a investigação de anomalias em diferentes ambientes, sendo desnecessário o contato direto com o objeto de estudo. Devido à qualidade de seus resultados e a facilidade de aplicação de seus métodos, ela se torna uma importante ferramenta para exploração indireta do fundo e subfundo de ambientes aquáticos (Neto, 2000; Quaresma et al., 2000).

A bacia amazônica, segundo Wohl, 2007; é a maior do mundo com uma área total de sete milhões de km² e uma área de captação total de mais de seis milhões de km². De acordo com Ana, 2015; ela é responsável por 60% do abastecimento de água do país, com uma contribuição média de cerca de 132.15 m³/s. E cerca de 63% de sua área está localizada no Brasil e inclui os estados do Acre, Amazonas, Amapá, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima (Figura 1).

Alguns estudos dos rios mais importantes da bacia amazônica revelam a complexidade e variedade de formas de leitos, afloramentos e substratos, além de suas características hidrodinâmicas, como podemos ver nas pesquisas de Almeida et al, 2018; Ianniruberto et al, 2018 e de Gualtieri et al, 2018. Neste trabalho serão utilizados dados coletados com vários sensores acústicos (batimetria multifeixe, sonar de varredura lateral e perfilador de subfundo para caracterizar as estruturas sedimentares e o embasamento do baixo curso do Rio Solimões.

Esses estudos são de extrema importância para o entendimento do funcionamento do rio, conseqüentemente trazendo uma maior segurança na navegabilidade dele. É importante também no aspecto exploratório, uma vez que o estudo e monitoramento são necessários para uma maior assertividade e redução de custos e impactos de projetos, sejam eles econômicos ou civis.

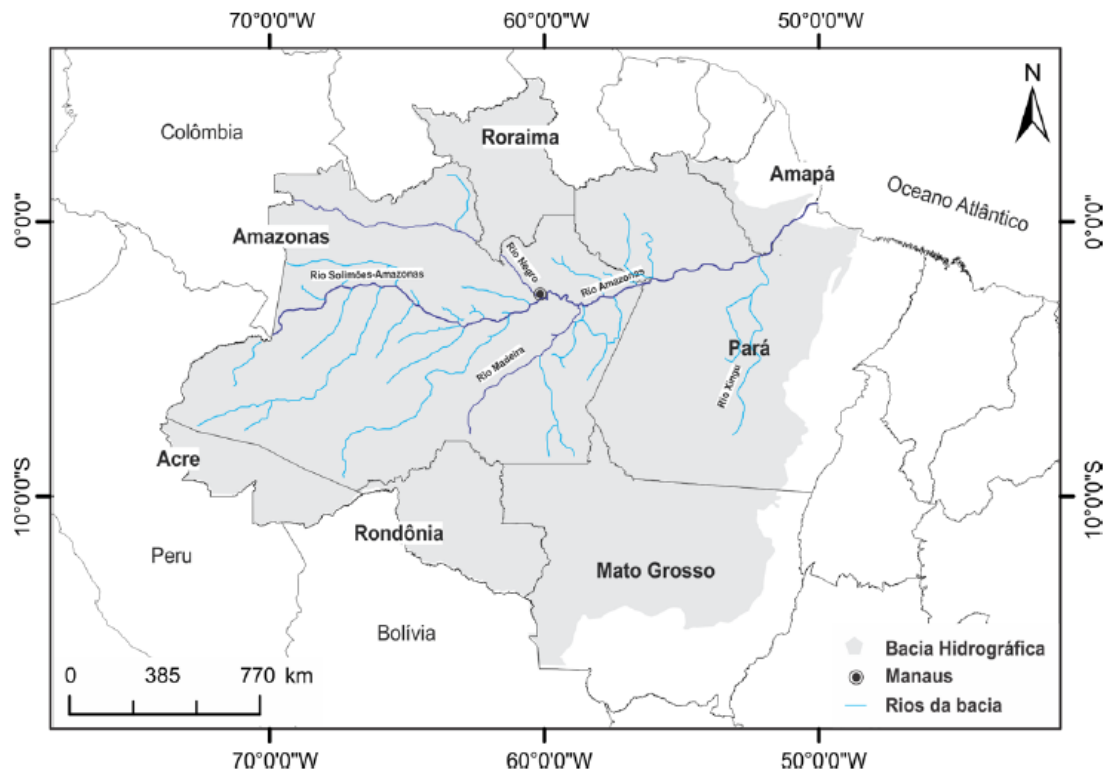


Figura 1 - Bacia hidrográfica amazônica em território brasileiro. (Fonte: Turquetti, 2019)

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar e monitorar o fundo e subfundo do Rio Solimões, na altura da Ilha da Marchantaria, através de aquisições geofísicas de Sísmica de Reflexão, Sonografia e Batimetria.

1.1.2. Objetivos específicos

- Elaborar mapas batimétricos;
- Individualizar feições sedimentares a partir da análise de perfís sísmicos;
- Caracterização morfológica do assoalho do rio;

2. ÁREA DE ESTUDO

Situada na bacia hidrográfica do rio Amazonas, a região de estudo está compreendida ao redor da área da Ilha da Marchantaria, no município de Iranduba, no estado do Amazonas, (Figura 2), e é composto em sua maioria, por depósitos arenosos e dunas. (Figura 3)

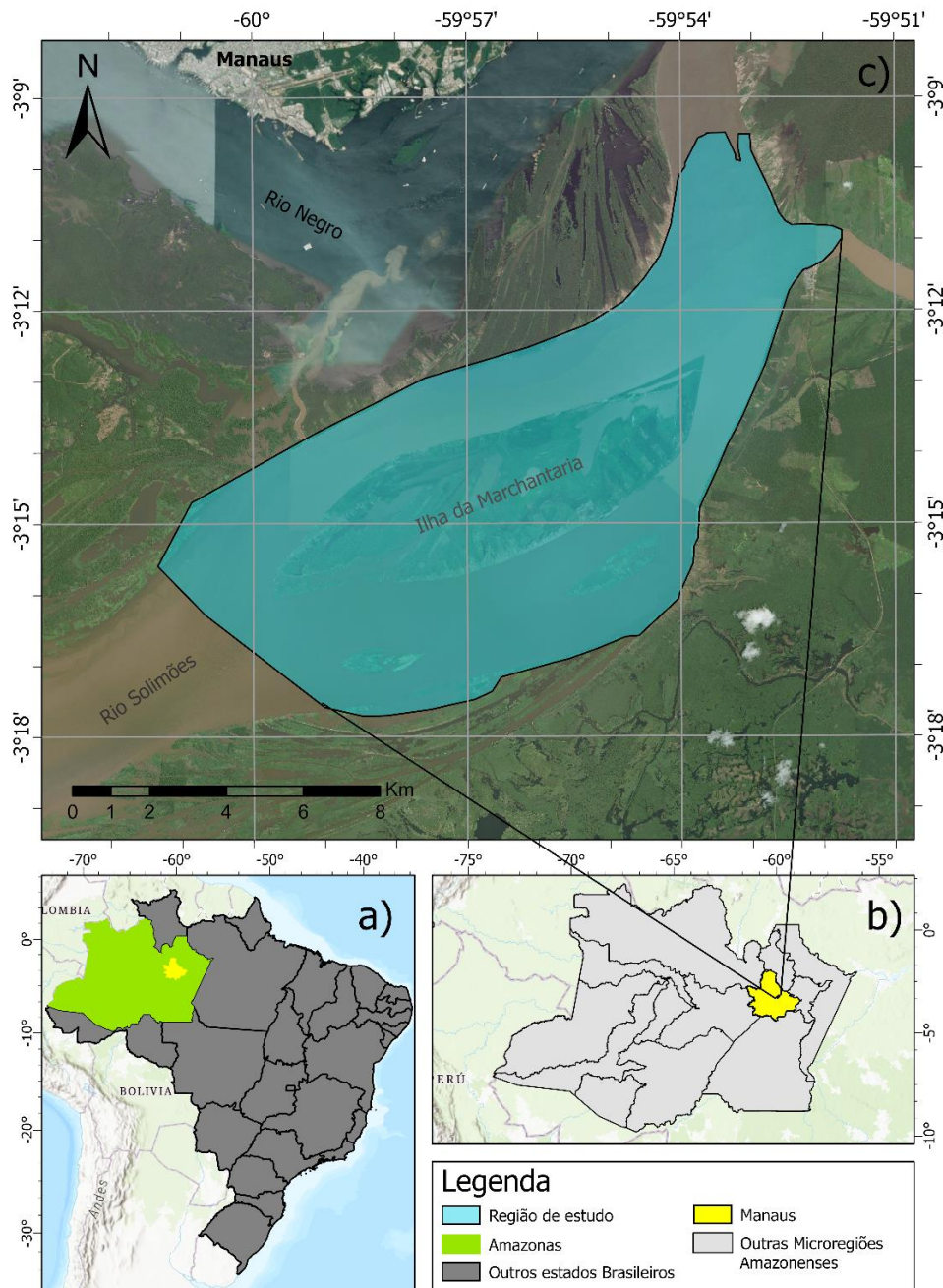


Figura 2 – a) Mapa de localização dos estados brasileiros, destacado de verde o estado do Amazonas; b) Mapa de localização das microrregiões do estado do Amazonas, destacado de amarelo a microrregião de Manaus; c) Mapa de localização da região de estudo, demarcada de azul a zona onde foram realizados os levantamentos, na qual ao centro se encontra a ilha da Marchantaria.

2.1. Contexto geológico-estrutural

O estado do Amazonas é caracterizado por uma extensa camada sedimentar fanerozóica, representando as bacias do Acre, Solimões, Amazonas e Alto Tapajós, as quais se situam sobre uma camada de rochas pré-cambrianas que são recobertas por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares (CPRM, 2010).

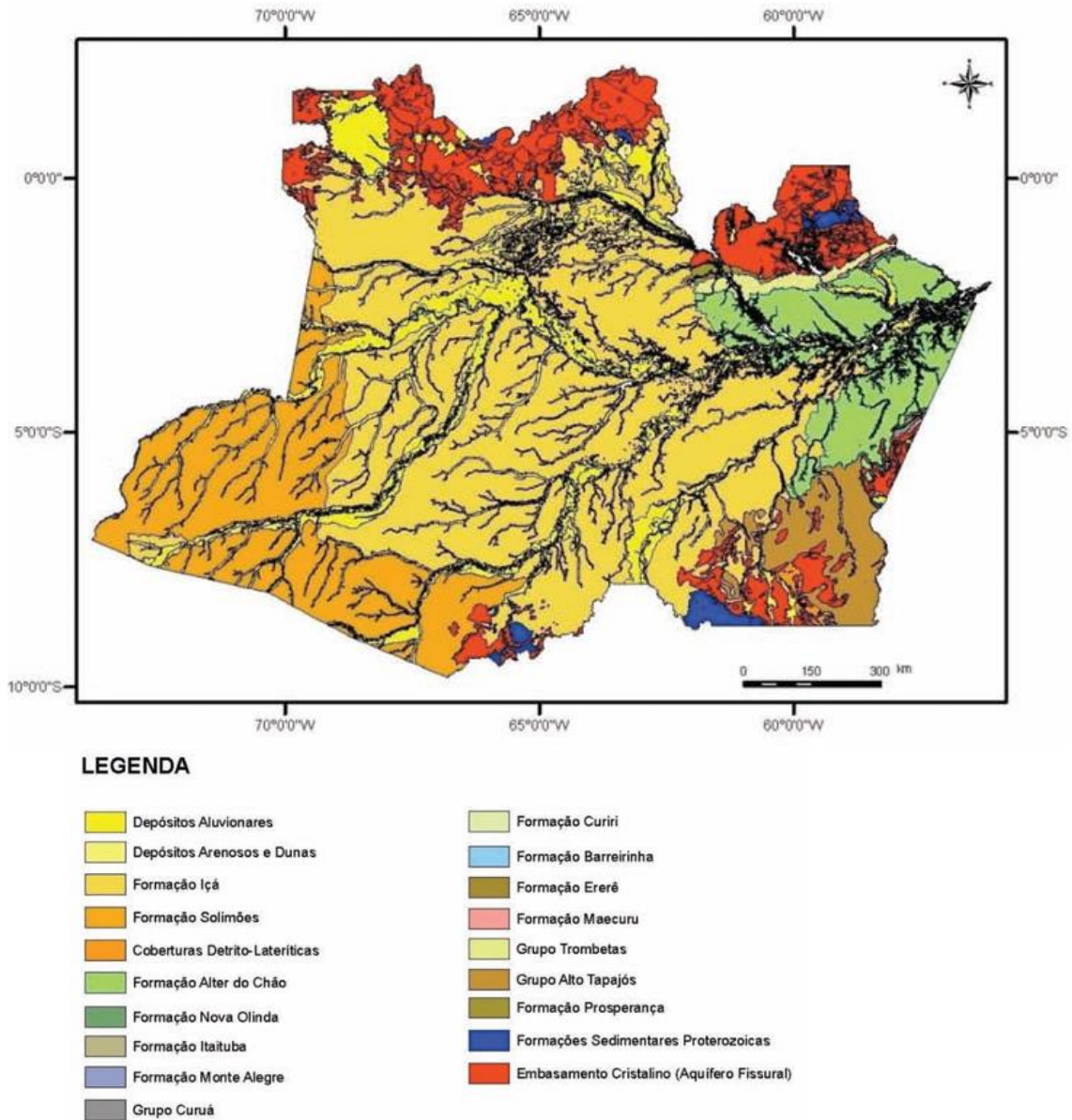


Figura 3 – Mapa geológico simplificado do Estado do Amazonas. Fonte: adaptado de CPRM (2005a)

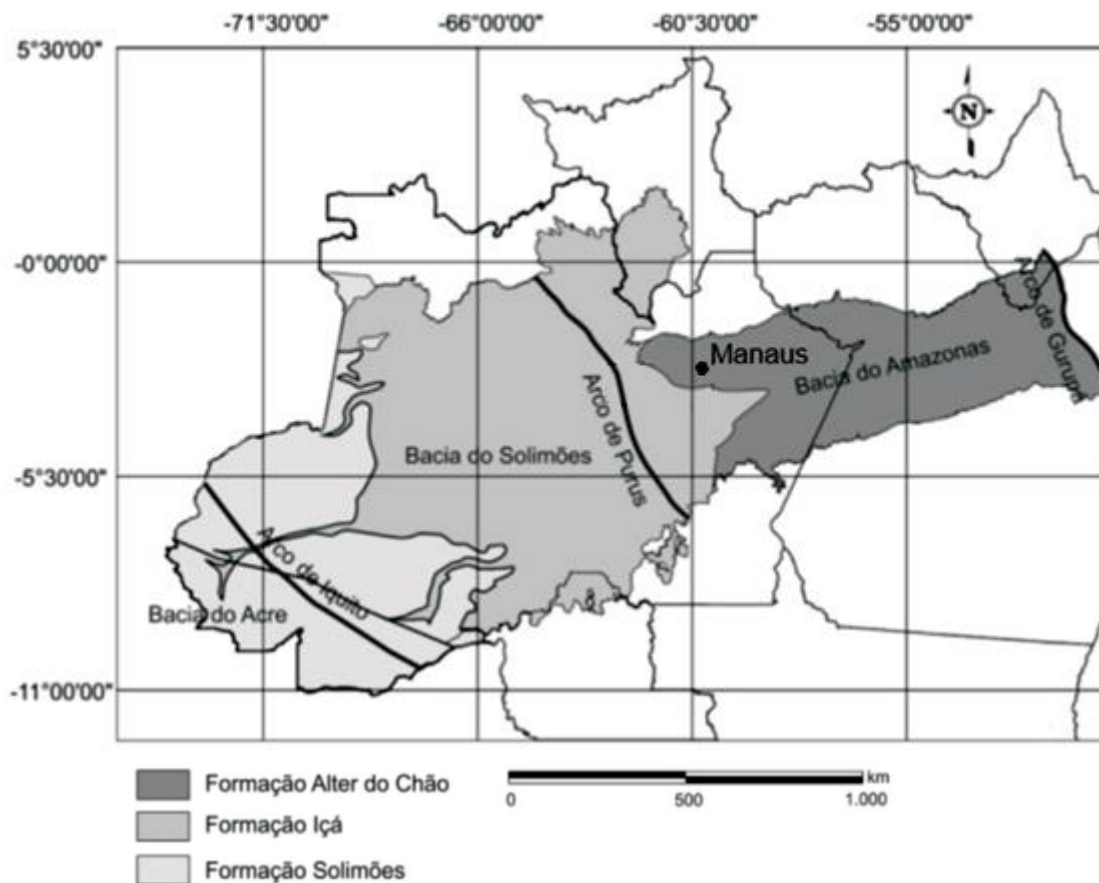


Figura 4 – Localização e limites das bacias do Estado do Amazonas, dos principais arcos estruturais e das formações aflorantes. (Fonte: Souza et al., 2013)

As regiões com cobertura sedimentar mais representativas, em termos de extensão, correspondem às formações Solimões, Içá e Alter do Chão (Figura 4). Formações as quais constituem um grande corredor no sentido oeste-leste da Amazônia, recobrem respectivamente a bacia do Acre (terciário), a sub-bacia do Alto Amazonas (quaternário) e as sub-bacias do Médio e Baixo Amazonas (cretáceo), como observa-se na figura 4, e compreendem ainda a bacia de Marajó que, em sua porção emersa, abrange uma faixa que se estende da porção leste do Amapá até o litoral do Pará (Rodrigues et al., 1996)

A sedimentação, no Cretáceo (>66 milhões de anos) e início do Terciário (<65,5 milhões de anos), foi predominantemente continental, sendo que somente após o Oligoceno (entre 36 e 23 milhões de anos) ocorreu a contribuição sedimentar proveniente do rio Amazonas. Os sedimentos Holocênicos (desde 11,6 mil anos atrás) e Pleistocênicos-Holocênicos (desde 2,5 milhões de anos atrás) são constituídos de aluviões

fluviais, flúvio-marinhas e marinhas, além de coluviões, os quais predominantemente se encontram acompanhando os cursos d'água que formam a rede de drenagem da região. É importante assinalar aqui a ocorrência de rochas máficas, predominantemente diabásios, encontradas em Roraima e na bacia do Amazonas, principalmente. (Rodrigues et al., 1996)

2.2. Uso e ocupação do solo

À medida que a população impermeabiliza o solo e aumenta o fluxo de água através de condutos e canais ou na superfície do solo, a quantidade de água que chega ao mesmo tempo no sistema de drenagem passa a aumentar. Como resultado, provoca inundações com mais frequência do que antes, quando o solo possuía uma superfície mais permeável e capaz de escoar parte desse fluxo de água naturalmente (Tucci e Bertoni, 2003).

Segundo Suguio (2003), a erosão é um fenômeno natural que engloba diversos processos, dentre eles o desgaste, o transporte e a acumulação de sedimentos, que modificam e transformam a superfície terrestre, por meio de seus agentes naturais, como chuvas, rios, ventos, geleiras e mares. Os processos erosivos que mais atuam no estado do Amazonas, além dos movimentos de massa, são os de erosão pluvial e erosão fluvial, que estão ligados principalmente à ação das chuvas e dos rios respectivamente.

O assoreamento dos cursos d'água causa desequilíbrios ecológicos, pois causa o aniquilamento da mata ciliar e reduz a capacidade natural de armazenamento dos cursos d'água, o que pode levar a inundações (CPRM, 2010). O impacto antrópico da exploração madeireira, agricultura, construção, urbanização etc., juntamente com o impacto natural, determinam a intensidade de tais processos.

A erosão fluvial está relacionada à dinâmica natural dos rios e ocorre como resultado da força do fluxo das águas fluviais, que retira detritos do fundo e principalmente das margens do rio, contribuindo para a erosão da base das encostas e, como resultado, o colapso dos barrancos. São observados trechos nos rios amazônicos, onde a erosão fluvial é mais intensa, eventos chamados de “terras caídas” os fenômenos de deslizamentos de barrancos. Nesses fenômenos, é possível observar a grande influência curso do rio, que está relacionado principalmente à erosão das bordas côncavas do canal e contribui para o seu solapamento (Figura 5), conforme descrito por Cristofolletti, 1981 (*apud* CPRM, 2010).

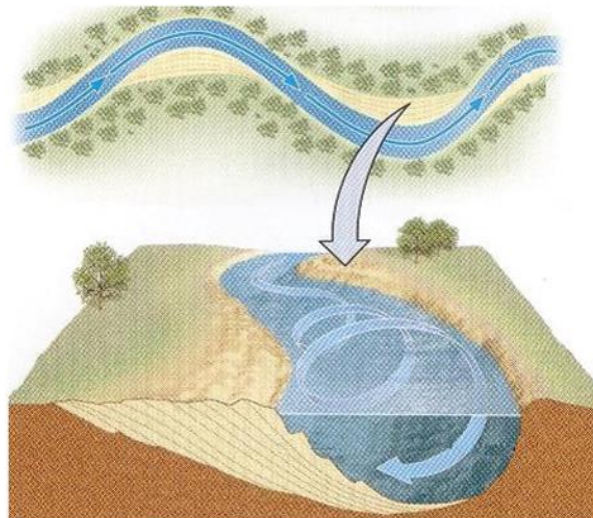


Figura 5 – Ilustração da erosão fluvial nas margens côncavas do canal. (Fonte: Press et al., 2006)

De acordo com o levantamento de 2011 realizado pela Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais - CPRM, a cidade de Parintins e outros dezessete municípios localizados ao longo do rio Amazonas e seus principais afluentes, estão sob constante ameaça pelas transformações do canal promovidos pela erosão lateral dos taludes marginais, entre as quais Parintins se enquadra em uma situação de alto risco. O que reforça a importância do estudo deste trabalho principalmente para as cidades ripárias, como Iranduba.

2.3. Climatologia

A Amazônia brasileira possui um clima quente e úmido que é dividido em três zonas climáticas distintas, Afi, Ami e Avi, segundo a classificação de Köppen. A descrição dos tipos climáticos é derivada da análise de parâmetros meteorológicos e apoiada em pesquisas sobre o clima da Amazônia. (Bastos, 1972; Nimer, 1989; Bastos, 1982; SUDAM, 1984).

Em seu trabalho, Bastos (1972) apresenta que o regime térmico na região é bastante diversificado, a temperatura média anual varia entre 22° e 28°C, média anual de temperaturas máximas entre 29° e 34°C, e média anual de temperaturas mínimas entre 16° e 24°C. A umidade relativa do ar costuma ser superior a 64%, com média anual de cerca de 80%. A luminosidade varia de 35 a 65% da energia potencial radiante, com alta cobertura de nuvens. O padrão pluviométrico na região apresenta uma alta variação, com

precipitação média anual variando de 1.300 a 3.500 mm, distribuídos de modo a caracterizar uma época mais chuvosa e outra menos chuvosa.

O IBGE (2014) apresenta o mapa do Potencial de Agressividade Climática na Amazônia Legal (figura 6), que é um indicador da vulnerabilidade de um sistema natural aos efeitos climáticos, e da forma como seus elementos interagem e se relacionam com o subsistema socioeconômico. O mapa integrou os estudos produzidos pelo Diagnóstico Ambiental da região para representar um dos indicadores necessários à compreensão da dinâmica do subsistema natural, voltada à avaliação da vulnerabilidade do mesmo. Foram analisados dados provenientes de 326 estações climatológicas e pluviométricas do banco de dados do antigo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) e da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), coletados entre 1960 e 1990, além de informações do Atlas Climatológico da Amazônia Brasileira (SUDAM, 1984) e do acervo do IBGE.

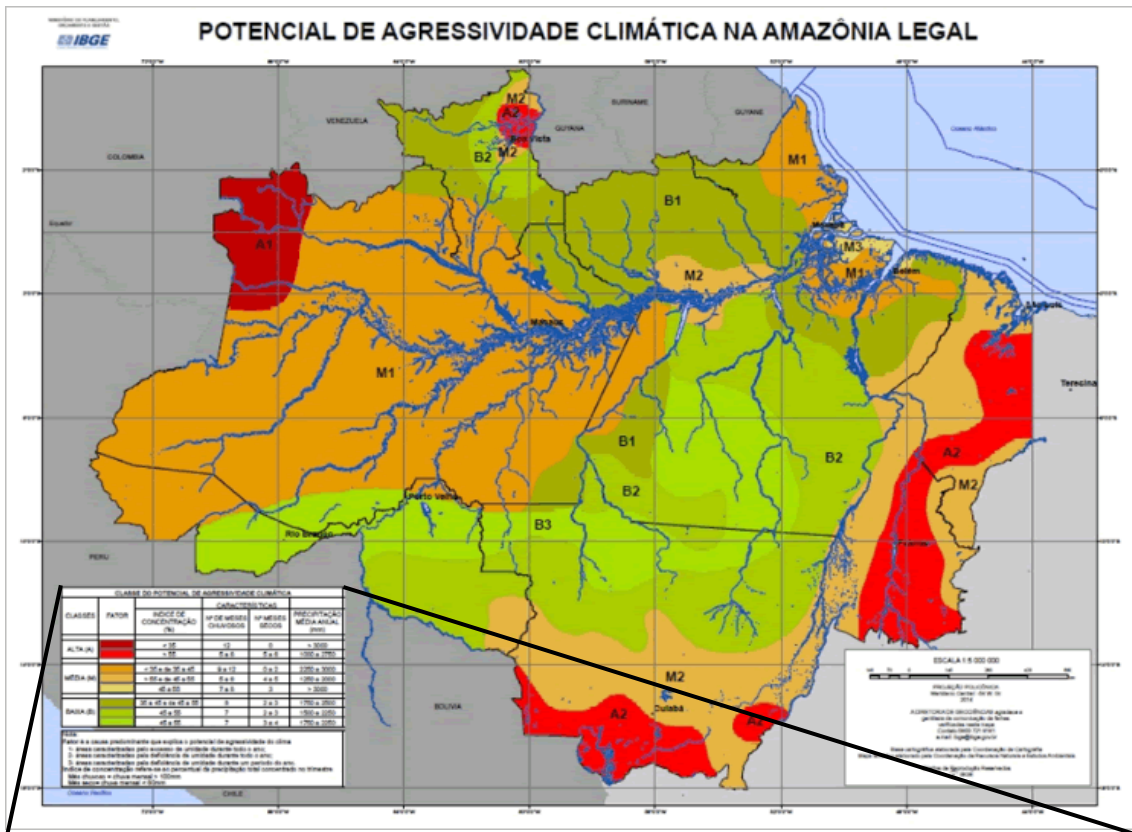


Figura 6 – Mapa de potencial de agressividade climática na Amazônia legal. (Fonte: IBGE)

2.4. Hidrologia

2.4.1. Águas Subterrâneas

As águas subterrâneas do estado do Amazonas são geralmente de boa qualidade, com baixo teor de minerais e levemente ácidas. Apesar de uma densa rede de drenagem superficial com muitos rios de vazão rápida, cerca de 80% das 62 cidades da região são abastecidas apenas com água subterrânea devido ao baixo custo de produção. A água subterrânea, além de estar mais protegida da contaminação, pode ser coletada no local e para consumo é necessário apenas a adição de cloro para matar qualquer bactéria coliforme que possa estar presente (CPRM, 2010).

As águas subterrâneas do estado do Amazonas são encontradas em grandes quantidades; porém, sua magnitude ainda não é totalmente conhecida. A título de exemplo, o Aquífero Alter do Chão que é o maior e principal reservatório de água subterrânea do estado, no subdomínio da bacia amazônica, abrange cerca de 12 km³ apenas abaixo da cidade de Manaus (CPRM, 2002). Ocorre desde as proximidades de Belém (Pará) até o extremo oeste da Amazônia e estende-se até as repúblicas vizinhas do Peru e da Colômbia. Ele aflora na porção oriental do estado do Amazonas até a margem direita do baixo curso do rio Negro com uma largura de cerca de 380 km, e é atualmente recoberto pelas formações Solimões e Içá em suas porções ocidental e central (CPRM, 2010).

Quando não contaminadas, as águas do Aquífero possuem uma boa qualidade, sendo pouco ácidas, com pH entre 4,3 e 5,5, com SDT (sólidos totais dissolvidos) de até 30mg/L e pouco salinizadas, como podemos observar nos dados da Tabela 1, que foram coletados em estudos realizados pela CPRM/SGB em diversas regiões (CPRM, 2005b, 2006a, 2008a, 2008b, 2008c sendo caracterizadas, quimicamente, como águas sódicas, preferencialmente sulfatadas a cloretadas).

* Poço particular, pois não há poços de abastecimento público que explore a Formação Solimões CE = Condutividade Elétrica; NA = Não analisado.

Aquífero/Cidade	Prof. do Poço (m)	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Alcalinidade ($\text{mgHCO}_3^-/\text{L}$)	Cl^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)
Alter do Chão/Manaus	60	4,5	14,0	< 0,02	0,60	2,00	0,12	0,53	0,21	0,03	0,02	0,01	0,01
Alter do Chão/Parintins	80	4,3	26,4	< 0,02	1,26	< 1,0	0,66	0,21	0,20	< 0,02	0,06	< 0,01	0,01
Alter do Chão/Rio Preto da Eva	150	4,4	14,0	< 0,02	1,60	2,19	0,14	1,02	0,39	< 0,02	0,10	0,10	< 0,01
Alter do Chão/Silves	110	5,6	43,9	14,0	1,98	1,56	0,71	1,40	6,24	0,80	2,04	0,10	NA
Içá/Barcelos	40	5,0	28,4	3,7	1,64	2,43	0,69	2,41	2,31	< 0,02	0,68	0,10	NA
Içá/Tefé	60	5,8	41,0	19,5	0,27	2,01	0,07	3,33	3,68	0,80	1,01	1,04	0,05
Içá/Santo Antônio do Içá	36	4,4	19,0	1,2	0,19	0,10	1,25	0,22	0,04	0,02	0,02	0,01	< 0,01
Içá/Fonte Boa	60	4,8	23,6	5,5	1,80	1,90	0,11	1,75	3,01	0,13	0,17	0,02	0,02
Alter do Chão e Nova Olinda/Manacapuru	220	6,8	319,0	117,1	6,19	11,62	0,09	3,59	20,26	24,35	10,87	0,03	0,17
Trombetas/Presidente Figueiredo	Fonte	4,4	17,2	< 0,02	1,33	1,43	0,14	0,83	0,10	< 0,02	< 0,02	0,10	NA
Terraços Fluviais/Tabatinga	30	5,2	22,6	7,3	0,60	1,50	0,54	1,46	1,91	0,26	0,78	0,03	0,02
Depósitos Aluvionares/Anamá	50	6,4	286,0	139,1	5,40	6,20	0,06	26,40	2,70	18,60	10,20	2,12	0,26
Dep. Aluvionares/Zona rural de Manacapuru	45	6,6	455,0	131,8	2,55	1,20	0,02	38,26	5,01	22,10	16,48	10,31	0,95
Fissural (Granitos)/S. Gabriel da Cachoeira	80	6,2	160,0	78,1	0,48	2,59	0,58	8,97	6,17	18,72	2,24	0,13	NA
Fissural (Granitos)/S. Gabriel da Cachoeira	80	6,0	122,3	30,5	5,20	2,51	4,75	10,31	2,16	9,60	1,17	0,10	NA
Solimões/Benjamin Constant*	36	7,7	490,0	411,1	4,25	29,28	0,18	81,84	2,04	16,20	4,43	0,01	0,02

Tabela 1 - Resultados de análises físico-químicas em águas de poços de abastecimento público de diversas cidades, não contaminados, perfurados nos principais aquíferos que ocorrem no estado do Amazonas. (Fonte: CPRM, 2010)

2.4.2. Águas Superficiais

A coleta de informações hidrometeorológicas com a formação de uma longa série histórica de dados básicos permite que as pesquisas sejam direcionadas para a gestão adequada dos recursos hídricos. O Brasil tem cerca de 12% da água doce do mundo, enquanto a disponibilidade de água superficial da Amazônia brasileira corresponde cerca de 74% da disponibilidade de água superficial no Brasil. No estado do Amazonas, essa disponibilidade se deve principalmente aos afluentes da margem direita do sistema Solimões-Amazonas, neste caso os rios Javari, Jutaí, Juruá, Purus e Madeira, cuja vazão média combinada é de 58.205 m³/s (CPRM, 2010), como podemos observar na tabela 2.

*Rio Solimões em Manacapuru/AM.

Cursos d'Água	Área de Drenagem (km ²)	Precipitação (mm/ano)	Vazão Média	
			m ³ /s	l/s/km ²
Javari	105.700	2.400	4.545	43,0
Jutaí	77.280	2.781	3020	39,1
Juruá	185.000	2.452	8440	45,6
Içá	143.760	3.160	8.800	61,2
Japurá	248.000	3.000	18.620	75,1
Purus	370.000	2.336	11.000	29,7
Negro	686.810	2.566	28.400	40,8
Solimões*	2.147.740	2.880	103.000	48,0
Madeira	1.420.000	1.940	31.200	22,0

Tabela 2 – Resultado do monitoramento hidrológico no estado do Amazonas. (Fonte: BRASIL, 1994)

O Perfilador Acústico Doppler é um equipamento que transmite ondas sonoras através da água com frequência estabelecida (300 a 1.200 kHz) e recebe, por sensores, o retorno das ondas provocado pelas partículas existentes na água. Com o conhecimento da velocidade da corrente, da área e da profundidade da seção de medição, um programa computacional calcula a vazão total nessa seção (GUYOT et al., 1995). Tais medições possibilitam a obtenção de dados de vazão, velocidade, profundidade e largura dos rios, o que permite realizar estudos hidrológicos importantes, como avaliação da disponibilidade hídrica de uma região, gestão do uso dos recursos hídricos, evitando que uma área seja prejudicada por uma extração maior que a possível em uma região de montante em detrimento de uma região de jusante; e potencial do aproveitamento hidroenergético, devido ao precário e/ou inexistente suprimento de energia elétrica em alguns pontos da região (Adaptado de CPRM, 2010)

Na tabela 3 apresenta-se a média das vazões calculadas com o uso do Perfilador Acústico Doppler no período de 2007 a 2009 em algumas estações monitoradas pela CPRM/ SGB no estado do Amazonas. Nota-se que a soma das vazões dos rios Negro (Estação Paricatuba, município de Iranduba), Madeira (foz do rio Madeira) e Solimões (município de Manacapuru) é 160.495 m³/s, valor muito próximo da vazão no rio Amazonas em Itacoatiara, que é da ordem de 161.847 m³/s.

Locais	Rio	Vazão Média (m ³ /s)
Estação Paricatuba	Negro	35.703
Foz do Rio Madeira	Madeira	23.732
Manacapuru	Solimões	101.060
Itacoatiara	Amazonas	161.847

Tabela 3 - Resultados médios das medições líquidas com perfilador acústico Doppler em alguns rios da bacia Amazônica no período de 2007 a 2009. (Fonte: CPRM, 2009)

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Devido à boa qualidade de seus resultados e à facilidade de aplicação de seus métodos, a geofísica é uma importante ferramenta para o estudo indireto do fundo aquático (Quaresma et al., 2000).

Ayres Neto (2000) mostra que os principais meios geofísicos de estudo do fundo dos oceanos e rios baseiam-se na propagação de ondas acústicas. Os principais métodos de estudo do fundo e subfundo aquático, que utilizam a propagação de ondas acústicas, são a sísmica, a ultrassonografia e a batimetria. Esses sistemas detectores funcionam com o mesmo princípio: a emissão, transmissão, reflexão e difusão de ondas acústicas entre dois ou mais ambientes físicos com diferentes propriedades elásticas (coluna d'água, camadas sedimentares etc.).

Segundo Schön (1996), a velocidade de propagação das ondas acústicas em qualquer ambiente é função de suas constantes elásticas: módulo de rigidez (μ) e módulo de compressão (k). Essas constantes variam de acordo com o material e referem-se à quantidade de deformação sofrida por um material em função da força exercida nele. A velocidade de propagação das ondas P (ondas longitudinais) e ondas S (ondas transversais) são determinadas pelas equações 1 e 2.

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

Equação 1

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

Equação 2

onde ρ (rho) é a densidade do meio em que a onda se propaga. Como o módulo de rigidez (μ) da água é igual a zero, as ondas do tipo S não conseguem se propagar neste meio.

3.1. Sísmica de Reflexão

O método sísmico apresentado por Sharma (1997), usa o fato de que as ondas elásticas (também chamadas de ondas sísmicas) viajam em diferentes velocidades em diferentes tipos de rochas. Ao se gerar ondas sísmicas e observar os tempos de chegada dessas ondas em diferentes pontos, é possível determinar a distribuição de velocidade e localizar as interfaces onde as ondas são refletidas e refratadas. O sinal é refletido cada vez que o sinal sísmico encontra um material com uma impedância acústica diferente da impedância acústica do material no qual está se propagando (figura 7). A amplitude do sinal refletido é uma função da interação complexa entre vários fatores. No entanto, uma simplificação desta relação é determinada para os ângulos de incidência normais à superfície refletora. Neste caso, o coeficiente de reflexão (R), que é definido como a razão entre a amplitude do sinal refletido e a amplitude da onda incidente, é dado pela Equação 3.

$$R_c = \frac{A_r}{A_i} = \frac{(\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1)}{(\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1)}$$

Equação 3

onde ρ e V representam a densidade e a velocidade de propagação da onda em cada meio, respectivamente, e o resultado deste produto é chamado de impedância acústica (Z).

Os métodos sísmicos, quando aplicados em ambientes aquáticos, utilizam dispositivos geradores de ondas sonoras como instrumento emissor de energia no meio, enquanto se mede amplitude e tempo de chegada das ondas que retornam refletidas e/ou refratadas.

A utilização de uma fonte de alta frequência é capaz de gerar um imageamento com alta resolução, porém está sujeita a maiores perdas transmissivas que impedem mapear estratos mais profundos. Por outro lado, os equipamentos de baixa frequência possuem uma boa penetração, porém uma baixa resolução, devido a esse fato a aplicação de equipamentos de alta (Sub Bottom Profiler - SBP), média (Boomer) e baixa (Sparker) frequência, em conjunto, permite identificar diferentes estruturas nas camadas mais rasas (Boomer e Chirp), integrado com interfaces de camadas mais profundas, obtidas através da boa penetração do Sparker.

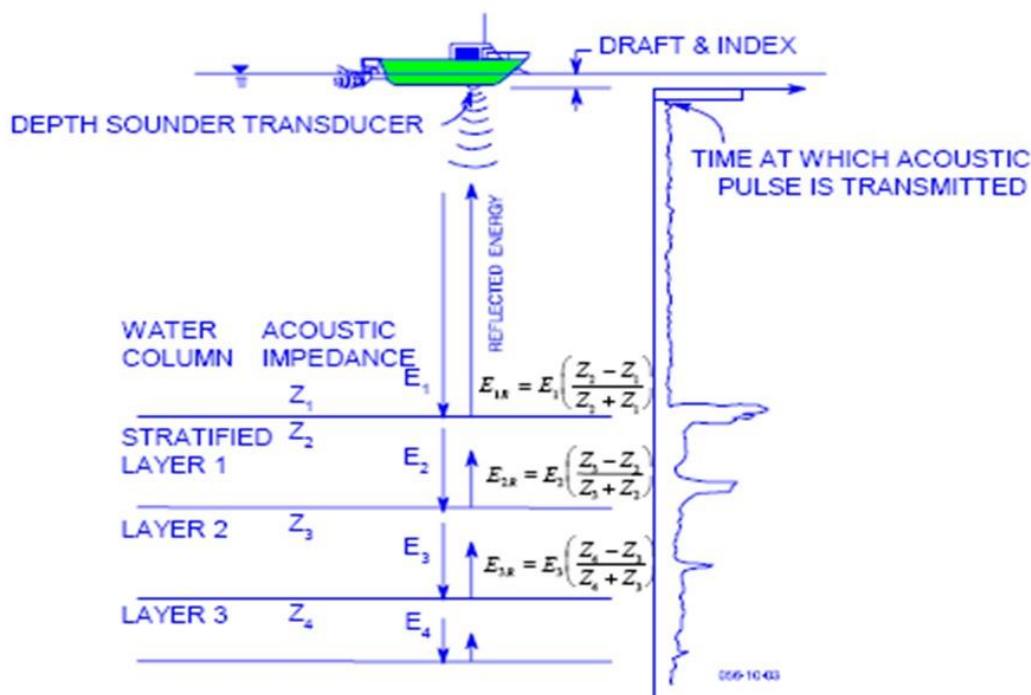


Figura 7 – Transmissão e reflexão do sinal sísmico de acordo com a variação da impedância acústica das camadas sedimentares abaixo do fundo. (BUCHANAN, 2005)

3.2. Sonografia

O sonar de varredura lateral usa pulsos sonoros de alta frequência que são refletidos e difundidos no fundo criando uma imagem acústica da morfologia do fundo em função de diferenças na textura e nos tipos de substrato (figura 9). Normalmente, um sonar de varredura lateral consiste em dois transdutores montados em um corpo rebocado ou 'peixe'. Cada transdutor gera um pulso sonoro em forma de leque perpendicular ao trajeto da embarcação (figura 8). Quando o pulso de som atinge o fundo do rio, parte do som é refletida de volta para o transdutor e parte é refletida para longe (espalhada). O som retornado é conhecido como retroespalhamento. (adaptado de www.ga.gov.au/scientific-topics/marine)

A difusão se dá em função da textura e morfologia do fundo, que determinam o ângulo de incidência dos pulsos. A granulometria do sedimento o grau de compactação e a impedância acústica do meio também são fatores que influenciam no comportamento dos pulsos. Quanto maior o contraste de impedância acústica do meio, maior é a energia refletida, uma vez que pouca energia será refratada, vide figura 9. E através dessa reflexão é possível inferir sobre a textura e morfologia do meio, tendo em vista a energia que foi perdida no retroespalhamento, pois o sinal proveniente de um fundo mais heterogêneo e

rugoso irá mostrar uma dispersão muito maior (figura 9c) do que o sinal de um fundo liso e homogêneo (figura 9a). Por outro lado, uma superfície extremamente lisa e homogênea fará com que toda a energia seja refletida para longe (figura 9d), conseqüentemente haverá ausência de leitura no equipamento.

Reflexões de maior amplitude (alto retroespalhamento) normalmente ocorrem quando o som é refletido em superfícies duras e rochosas (figura 9b), já os sinais de menor amplitude (baixo retroespalhamento) ocorrem quando o sinal é refletido em sedimentos mais macios (por exemplo, areia) que possuem um coeficiente de reflexão menor em relação ao anterior, portanto boa parte do sinal é transmitido ou refratado, como ilustrado na figura 9c. Devido à geometria do pulso sonoro emitido, qualquer obstáculo que se encontra acima do assoalho, como uma rocha ou objetos naufragados, pode gerar sombras (locais sem retorno) na imagem do sonar. O tamanho da sombra pode ser usado para determinar o tamanho do objeto (Figura 8).

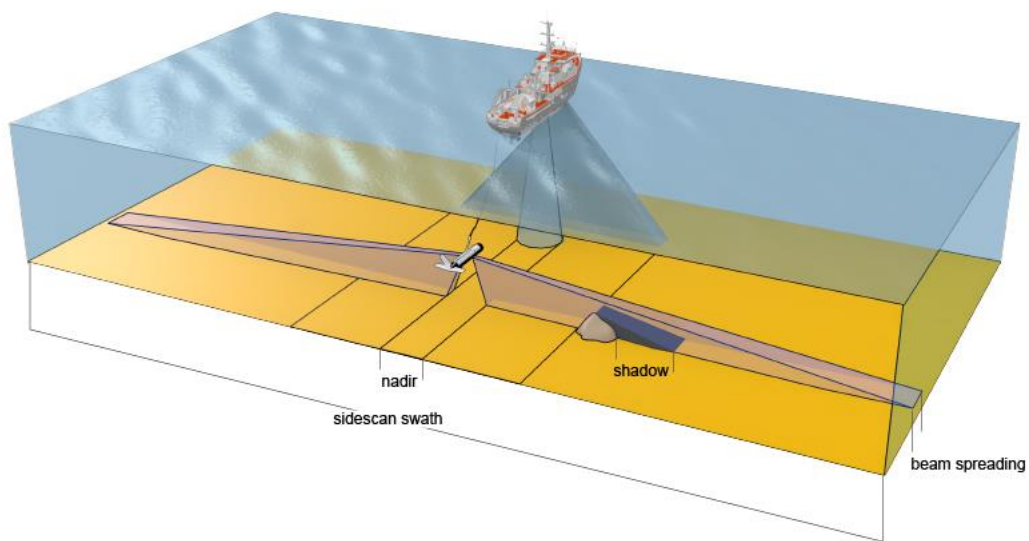


Figura 8 - Ilustração de uma aquisição com o Sonar de Varredura Lateral. Fonte: www.ga.gov.au/scientific-topics/marine/

A aquisição é realizada a partir de um plano de trabalho definido de acordo com a morfologia da região, combinando seções longitudinais e transversais para observar a continuidade das camadas sedimentares. Em geral, a penetração das ondas sonoras e a reflexão das interfaces dependem da natureza das camadas sedimentares: sistemas de alta frequência são indicados para solos não consolidados e onde uma alta resolução é

necessária para camadas mais superficiais. A acurácia do sistema de posicionamento é muito importante para aplicações que visam detectar objetos no subfundo.

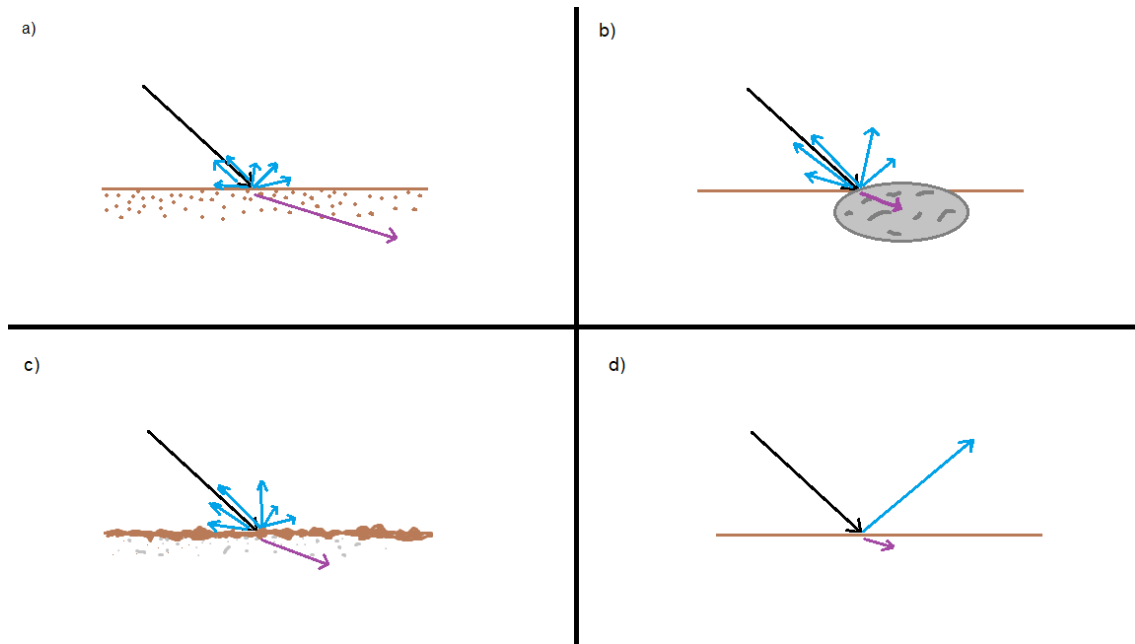


Figura 9 - Ilustração de diferentes exemplos do retroespalhamento acústico. **a)** Superfície lisa e baixo contraste de impedância acústica, pouca reflexão, pouco retorno de sinal, alta refração; **b)** superfície rochosa, alto contraste de impedância acústica, alta reflexão, bastante retorno de sinal, pouca energia refratada; **c)** superfície rugosa, médio contraste de impedância acústica, média reflexão, bom retorno de sinal, moderada energia refratada; **d)** superfície extremamente lisa e homogênea, alto contraste de impedância acústica, reflexão quase total da energia incidente, nenhum retorno de sinal, pequena energia refratada.

3.3. Batimetria Multifeixe

A batimetria multifeixe é o método mais avançado para estudar as profundidades dos meios aquáticos (Figura 10), método pelo qual a espessura da coluna de água pode ser medida com alta precisão. A densidade dos dados obtidos de um ecobatímetro multifeixe é muito maior do que a dos dados de um monofeixe, e a sua grande vantagem é a capacidade de fornecer uma visualização em tempo real do mapa topográfico da área em estudo.

O ecobatímetro é um equipamento que gera um feixe de ondas sonoras (frequência inferior a 18 kHz) ou ultrassônicas (frequência superior a 18 kHz) transmitido verticalmente por um emissor instalado na embarcação de sondagem chamado de transdutor, que atravessa o meio líquido até atingir o fundo submerso, onde é refletido. O sinal retorna à superfície, onde é detectado pelo receptor. É feita a conversão do tempo que é decorrido desde a emissão do sinal até a recepção do eco refletido do fundo

submerso em profundidade, uma vez que a velocidade do som na água é conhecida (aproximadamente 1500 m/s) (MIGUENS, 1996; KRUEGER, 2005 *apud* GAGG, 2016). Assim como na sonografia, esse sinal refletido pode ser influenciado pelas características físicas do fundo. A grande diferença é que na batimetria, além do imageamento do fundo, identifica-se principalmente a profundidade ao longo do seu leque de varredura.

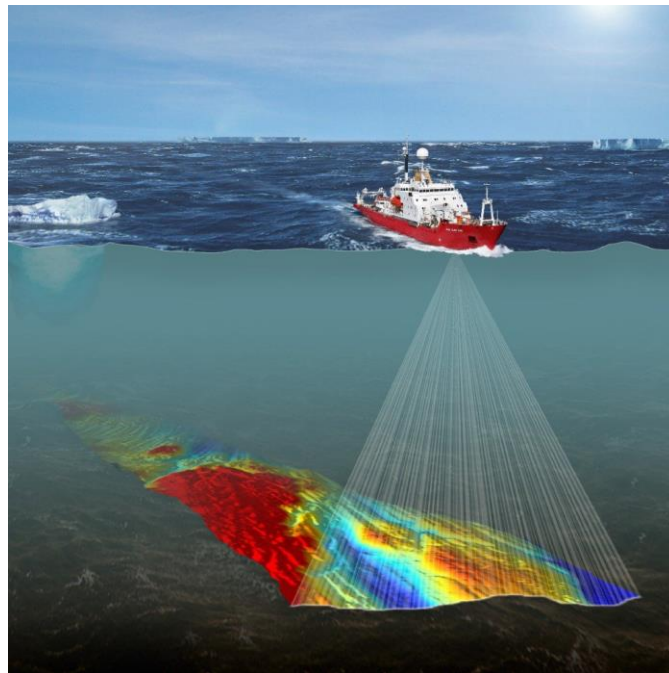


Figura 10 – Ilustração de um levantamento batimétrico multifeixe.

Segundo Silveira, 2004, os ecobatímetros multifeixe (*multibeam*) fazem várias medidas de profundidade com um mesmo *ping*, que é recebido por múltiplos feixes, que são arranjados angularmente para mapear áreas na direção perpendicular à de navegação, possibilitando a aquisição de faixas extensas (variando com a profundidade) do fundo, com uma alta resolução de imageamento.

3.4. Navegação

De acordo com Gagg (2016), devido à complexidade do processo de aquisição de dados, é necessário o uso de diversos dispositivos auxiliares para localização e medição da velocidade do som na água, resultando em maiores custos de processamento e equipamentos, em contrapartida temos resultados com alta resolução e precisão. Com a

ação da água (ondas e correntezas), um barco sofre movimentos translacionais e rotacionais. A embarcação move sobre uma superfície que também se move, o que torna necessário medir e calcular seu movimento para obter sua posição e posterior transporte de coordenadas para o subfundo.

Estes movimentos da embarcação são descritos de acordo com um sistema tridimensional local de coordenadas cartesianas com origem no centro de massa da embarcação (ponto sobre o qual o peso da mesma é igualmente distribuído e em torno do qual ocorre a rotação), na altura da lâmina d'água. Seus eixos são definidos por:

Eixo X: eixo ao longo da embarcação, sendo positivo no sentido de sua navegação;

Eixo Y: eixo transversal à embarcação, sendo positivo no sentido de estibordo (a direita do sentido de navegação);

Eixo Z: eixo vertical, positivo para o alto da embarcação.

O comportamento dinâmico da embarcação que é ilustrado na figura 11, é verificado pelos movimentos de translação, longitudinais no eixo X (*surge*), transversais no eixo Y (*sway*) e no eixo Z (*heave*). Já os movimentos de rotação na direção dos eixos x, y, e z são respectivamente balanço (*roll*), caturro (*pitch*) e cabeceio ou guinada (*yaw*) (Gagg, 2016).

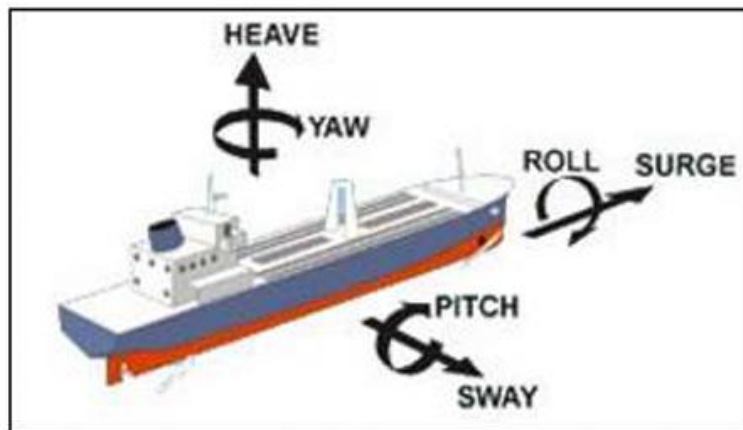


Figura 11 - Movimentos de uma embarcação. (Fonte: KONGSBERG MARITIME, 2016)

4. METODOLOGIA E MATERIAIS

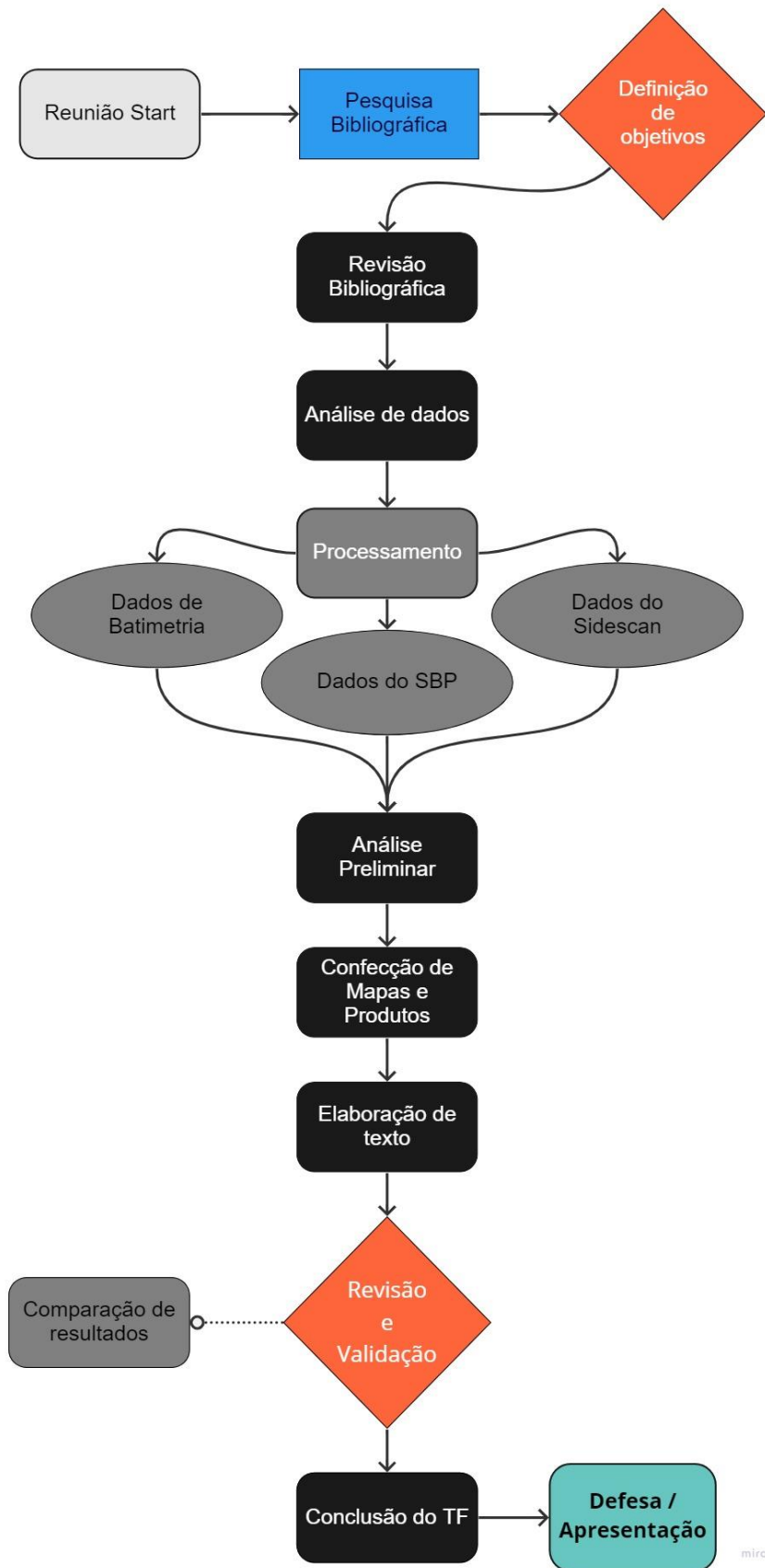


Figura 12 - Fluxograma do Trabalho

	<p>CM2 Sidescan Sonar System</p>
	<p>SBP EdgeTech 3100P (Chirp)</p>
	<p>Multibeam Echosounder Teledyne Reson 7101P</p>

Tabela 4 — Sensores utilizados

Através da ilustração da figura 12, pode-se observar a organização do fluxograma de trabalho deste. Bem como imagem e modelo dos sensores utilizados presentes na tabela 4.

4.1. Aquisição dos dados geofísicos de batimetria

A primeira campanha ocorreu entre os dias 15 a 28 de julho de 2016 e o ecobatímetro usado foi o *Multibeam Echosounder Teledyne Reson 7101P*, operando em uma frequência de 240 kHz, com ângulo máximo de abertura de 210° com 511 feixes de varredura atingindo uma resolução de 12,5 mm. (Turquetti, 2019).

4.1.1. Processamento dos dados geofísicos de batimetria

O processamento dos dados batimétricos foi realizado usando a versão do *software PDS2000 Teledyne Control Center 3.9.1*. (Turquetti *et al*, 2017)

4.2. Aquisição dos dados geofísicos com Perfilador de Sub-fundo

Os dados de sísmica foram adquiridos entre os dias 26 e 28 de maio de 2020 com o equipamento SBP *EdgeTech* 3100P (Chirp) que trabalha com frequências entre 2kHz e 15kHz.

4.2.1. Processamento dos dados geofísicos do perfilador de sub-fundo

O processamento dos dados do SBP foi realizado através do *software* Geosuite2020S, e de forma geral é um processamento bem simples. Após se realizar alguns testes de filtros e ganhos, observou-se um processamento padrão para as linhas, o qual se dava por um filtro passa-banda de 2kHz a 15kHz, ou seja, todos os ruídos de frequência fora dessa banda seriam eliminados, uma vez que se sabe que essa foi a banda de frequência utilizada na aquisição com o SBP, não faria sentido utilizar dados fora desse *range*.

Em seguida um TVG é aplicado (*Time Varying Gain*) entre os tempos de 10s e 20s, que é utilizado para compensar o decaimento da amplitude com a profundidade, o qual é dado pela equação 4. Em seguida aplicou-se novamente um ganho, mas dessa vez constante, em aproximadamente 20ms.

$$TL = 20 \log(R + 1) + \alpha(R) + b \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

R é o alcance em metros

α é o coeficiente de atenuação em dB/m

b é um deslocamento estático em dB

Após essa sequência de processamento, temos contraste suficiente das linhas do fundo do rio, para então realizar o “*seabed-multiple finder*”, que dentro de alguns parâmetros, busca de forma automática demarcar o fundo do rio. Após algumas correções manuais, aplica-se o “*mute*”, ferramenta a qual limpa todo o ruído acima da linha de fundo.

Para a exportação das linhas, foram adicionados *grids* padronizados com traços verticais a cada 500 *shots*, ou seja, a cada 1km, e traços horizontais a cada 20ms, ou seja, aproximadamente a cada 30m de profundidade.

4.3. Aquisição de dados de Geofísica com Sonar de Varredura Lateral

Os dados de Sonar, assim como os de SBP, foram adquiridos entre os dias 26 e 28 de maio de 2020 com o equipamento CM2 *Sidescan Sonar System* (SSS) o qual possui dupla frequência de operação, mas a configuração utilizada na campanha em questão foi de 100kHz a 325kHz.

Vale ressaltar que a aquisição realizada em um rio como o Solimões, causa certa dificuldade na navegação em linha reta, e pode gerar ruído hidrodinâmico por baixo do transdutor. Além disso, também é um local de alto risco para equipamentos rebocados, portanto optou-se também em utilizar o SSS fixado na lateral bombordo da embarcação.

4.3.1. Processamento dos dados Geofísicos do Sonar de Varredura Lateral

O processamento dos dados foi realizado através do software SonarWiz7 e se resume basicamente na utilização da ferramenta de *bottom tracking*, através do algoritmo de *threshold*, que trabalha com um *ping* de cada vez para encontrar o fundo, identificando a primeira amostra que excede a intensidade média de *ping* especificada. Este algoritmo é sensível ao ruído na coluna de água, mas funciona melhor do que a Detecção de Borda quando o fundo tem muita topografia, onde os parâmetros de *blanking zone* (define a profundidade mínima de busca a partir do sensor), *threshold* (determina o qual alto é o contraste entre os dados de coluna d'água e do fundo) e *duration* (utilizado para definir a quantidade de ruído presente na coluna d'água para que o rastreador pule *pixels* relativamente pequenos) foram definidos de acordo com a necessidade de cada linha; e em seguida foi realizada uma edição manual da linha de fundo para corrigir locais onde a detecção automática não foi eficaz.

Possivelmente essas linhas já foram adquiridas com ganhos aplicados, o que tornou desnecessária a aplicação dos mesmos durante o processamento, tendo em vista que a imagem já estava realçada o suficiente para identificar a coluna d'água.

Por fim, foram salvas imagens de certos trechos das linhas adquiridas, onde é possível identificar algumas estruturas de interesse.

5. RESULTADOS

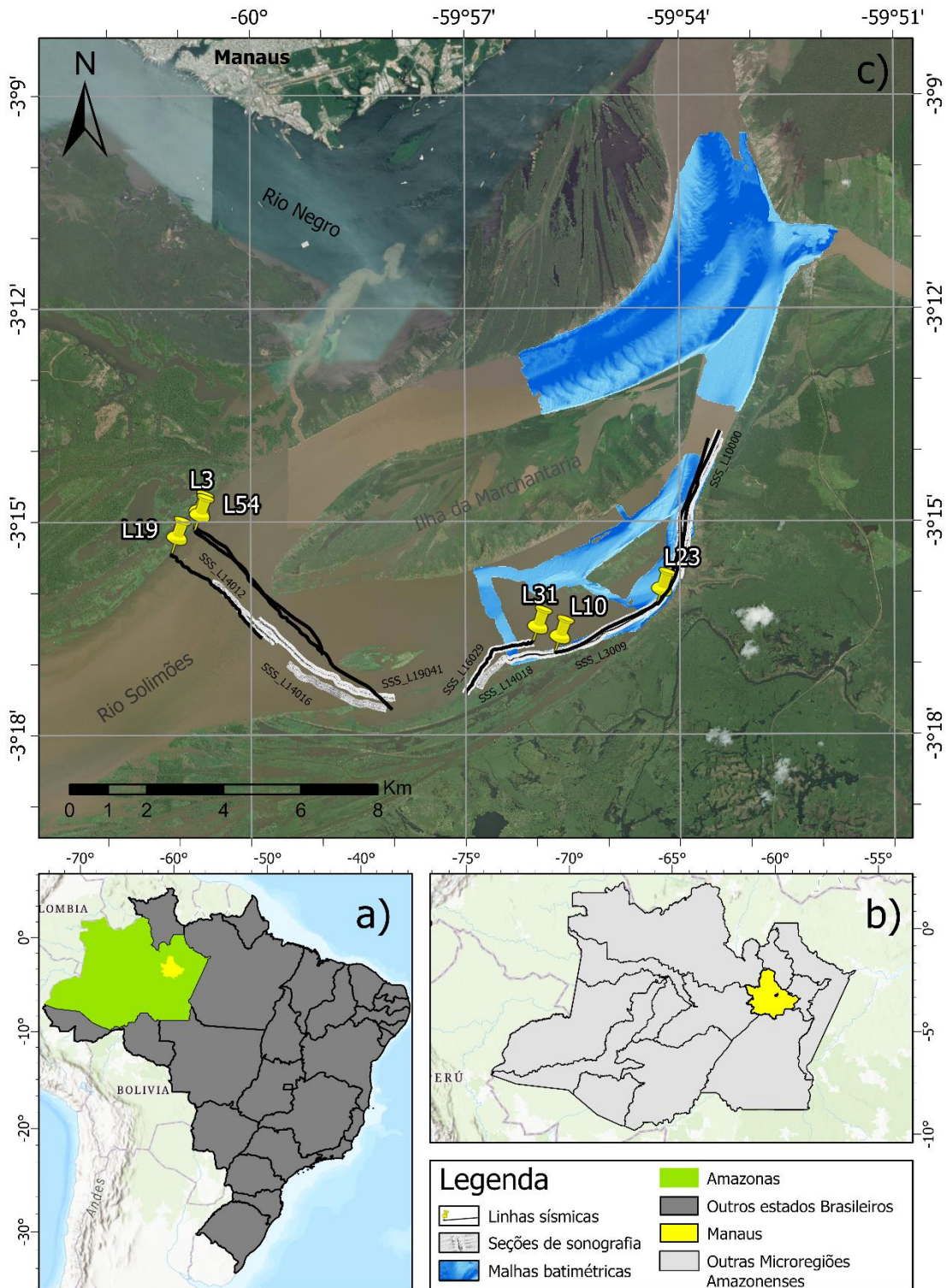


Figura 13 – a) Mapa de localização dos estados brasileiros, destacado de verde o estado do Amazonas; b) Mapa de localização das microrregiões do estado do Amazonas, destacado de amarelo a microrregião de Manaus; c) Mapa de localização da região de estudo, com a localização das linhas de aquisição sísmicas e de sonografia e das malhas de batimetria.

5.1. Perfis sísmicos do Perfilador de Sub-fundo

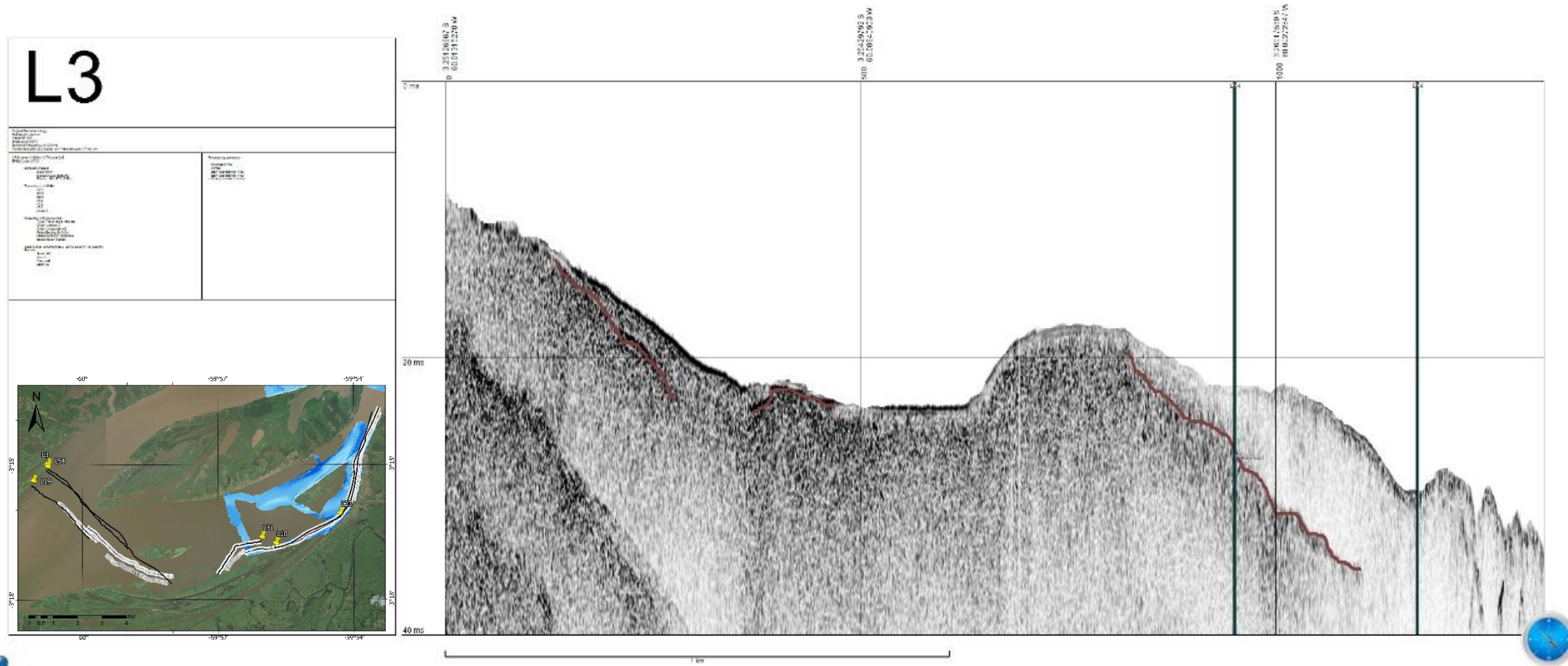


Figura 14 - Perfil sísmico da linha 3 com marcações destacadas de marrom, identificando contatos interpretados como rocha-sedimento.

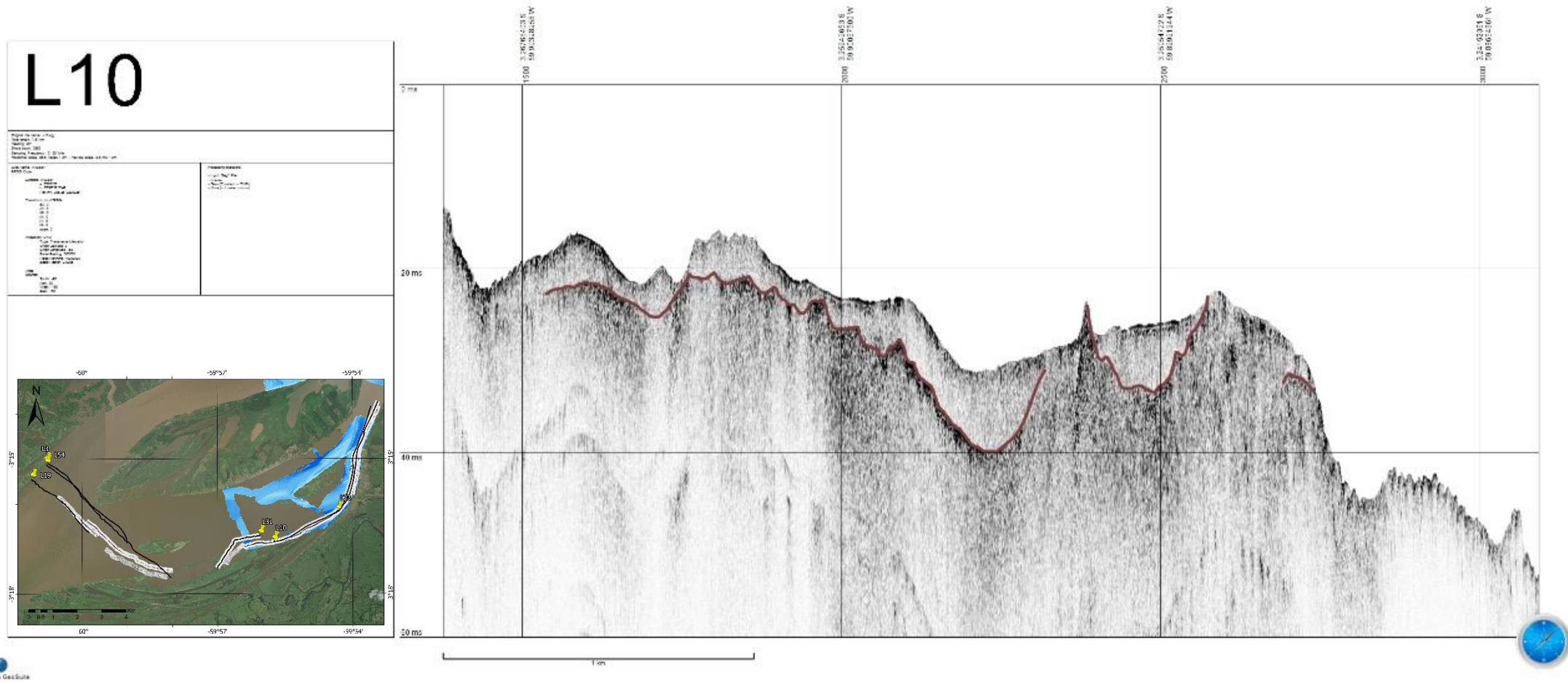


Figura 15 - Perfil sísmico da linha 10 com marcações destacadas de marrom, identificando contatos interpretados como rocha-sedimento.

L19

Projeto: L19 - Perfil Sísmico
Data: 10/05/2017
Hora: 10:00:00
Local: L19 - Perfil Sísmico
Projeto: L19 - Perfil Sísmico
Data: 10/05/2017
Hora: 10:00:00
Local: L19 - Perfil Sísmico

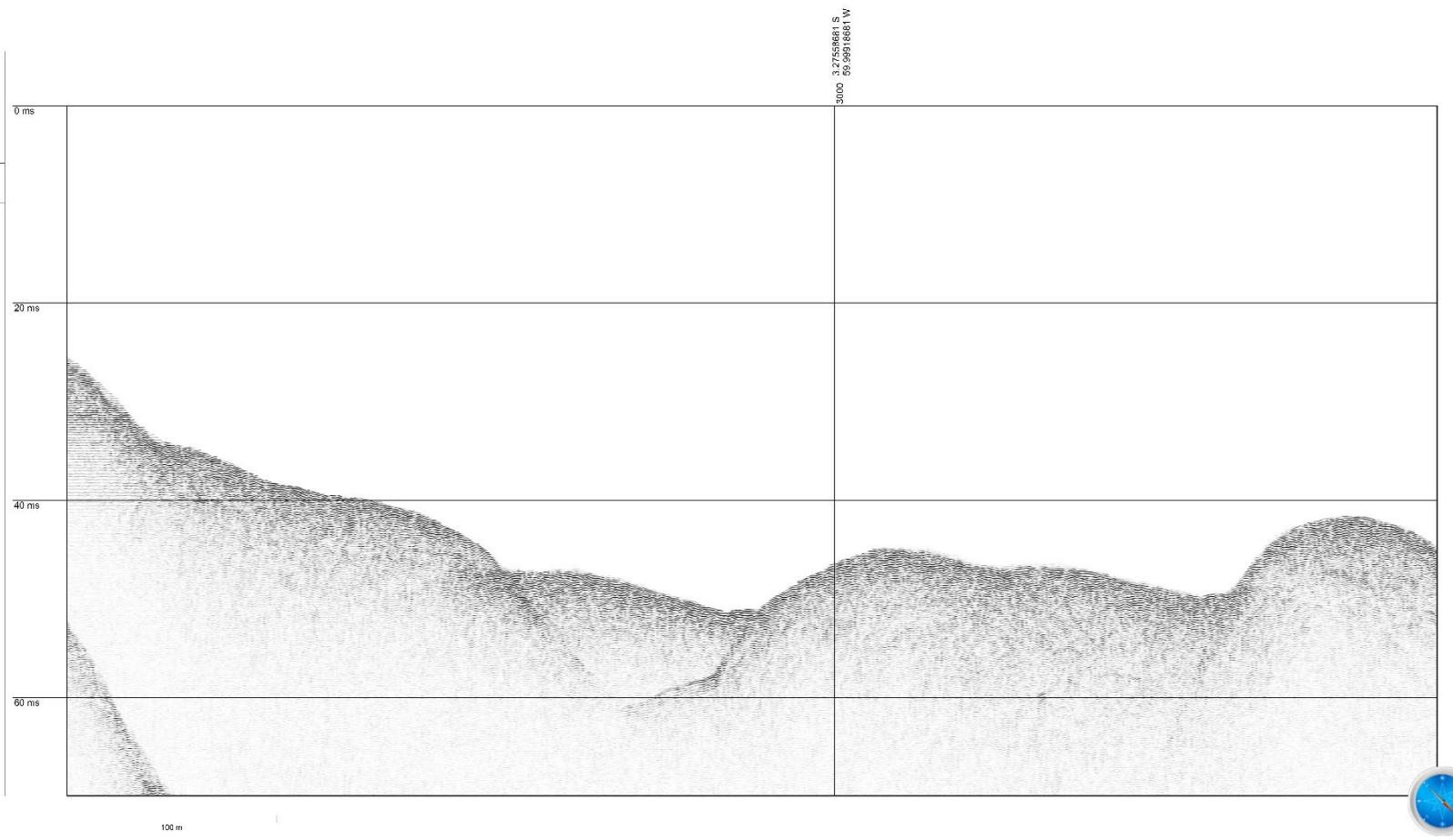
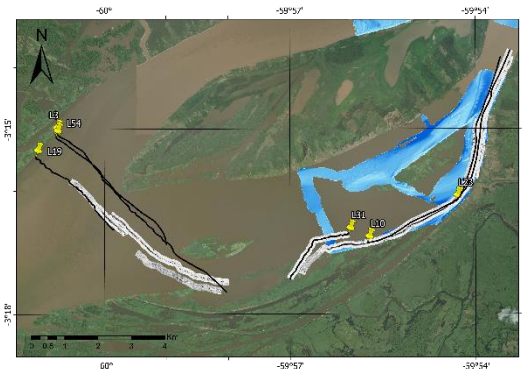


Figura 16 - Perfil sísmico da linha 19

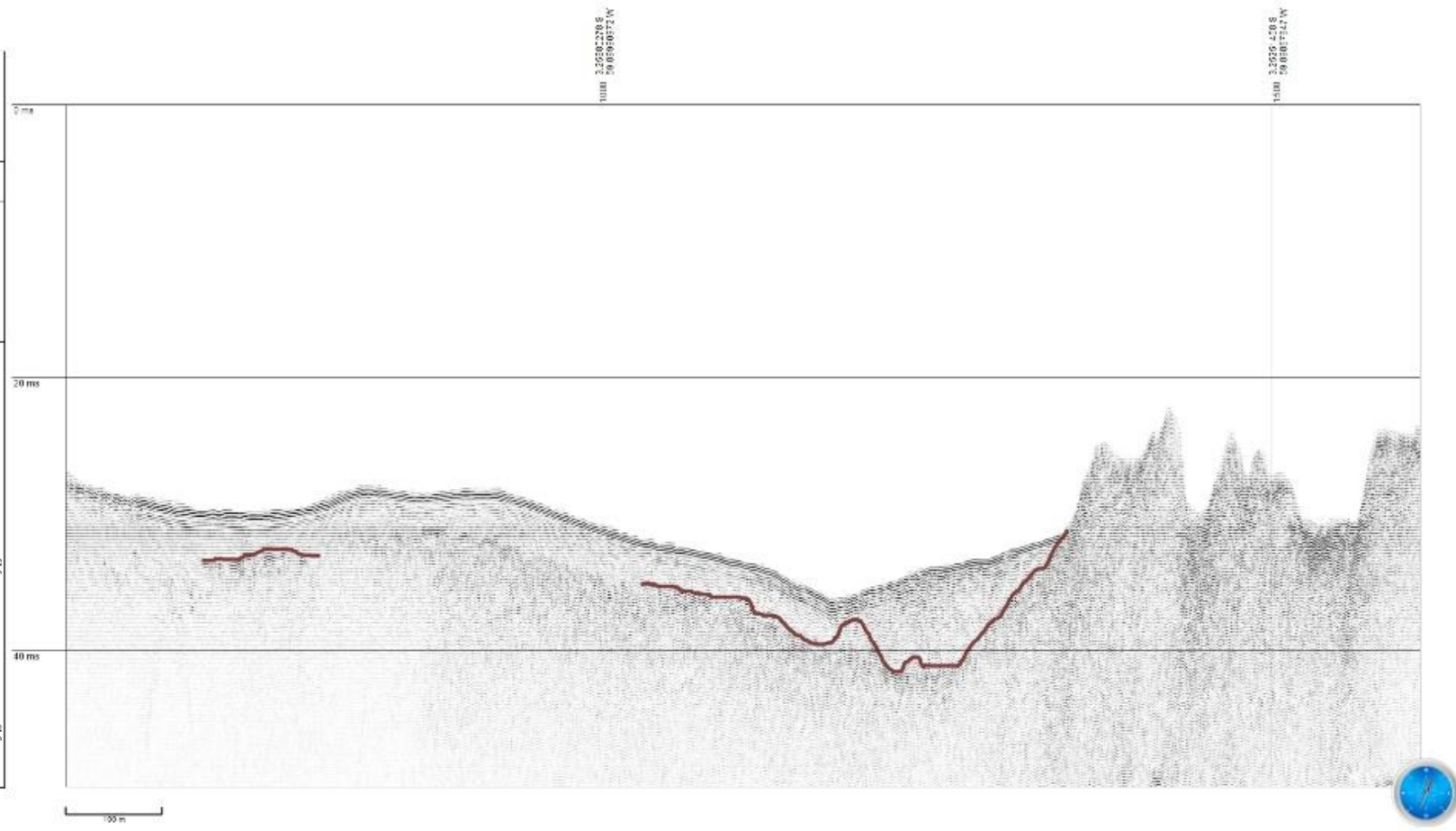
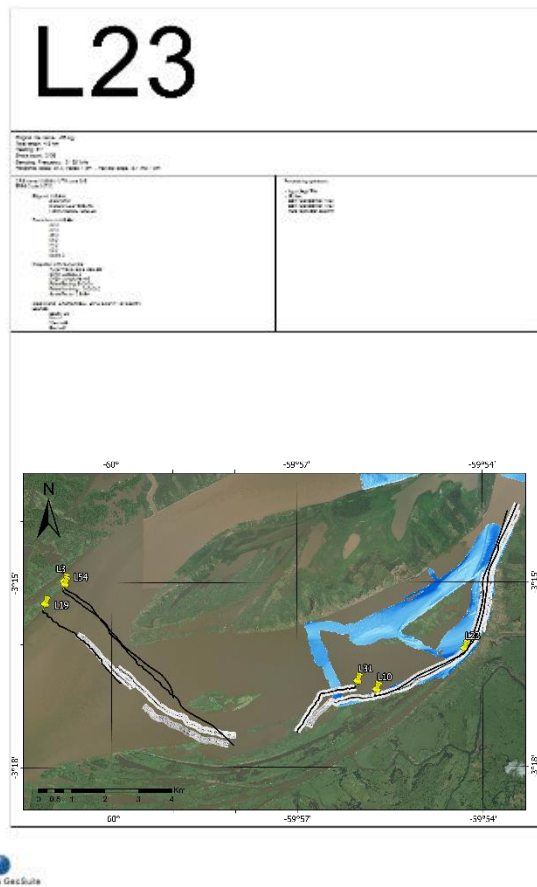


Figura 17 - Perfil sísmico da linha 23 com marcações destacadas de marrom, identificando contatos interpretados como rocha-sedimento.

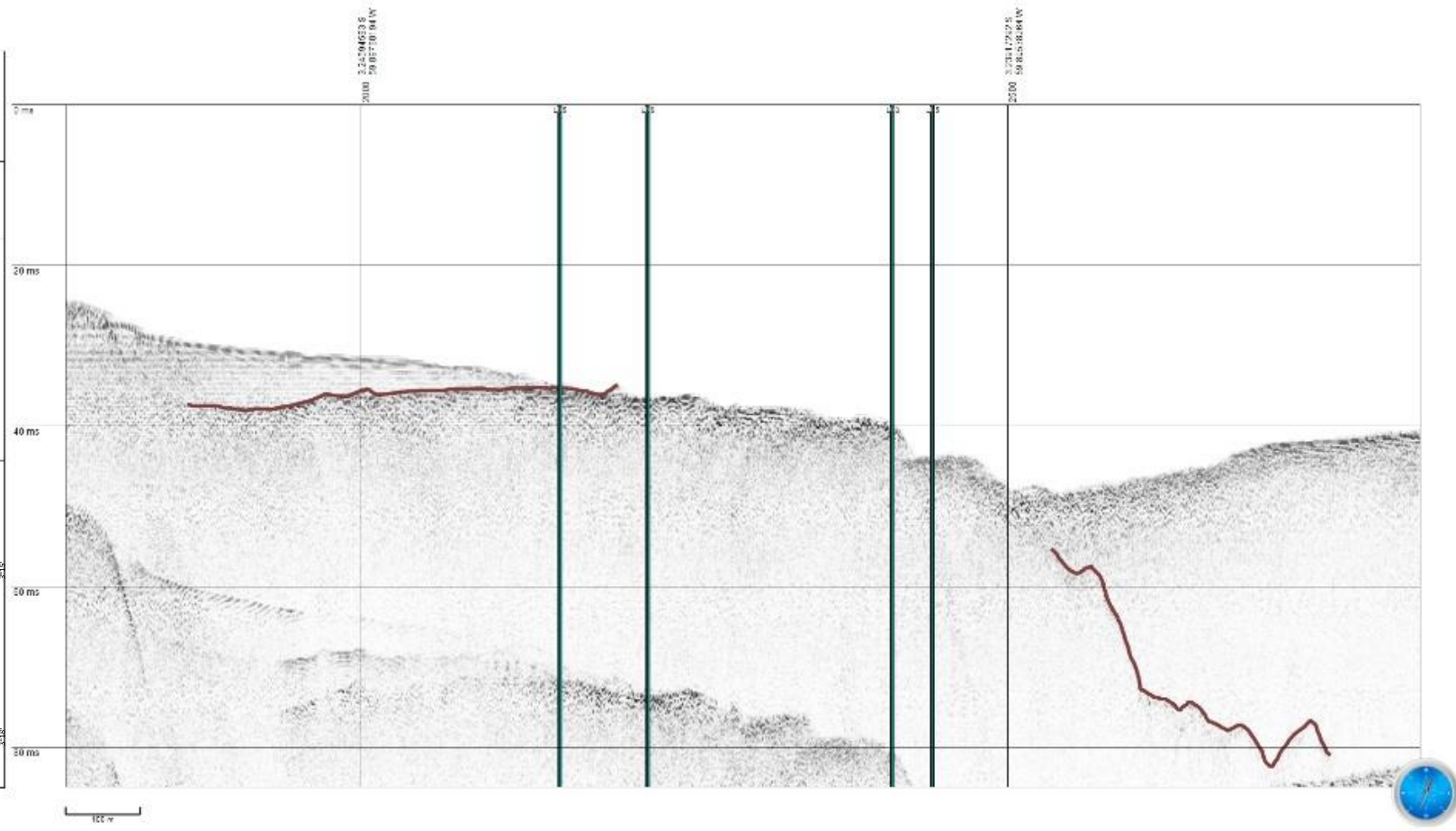
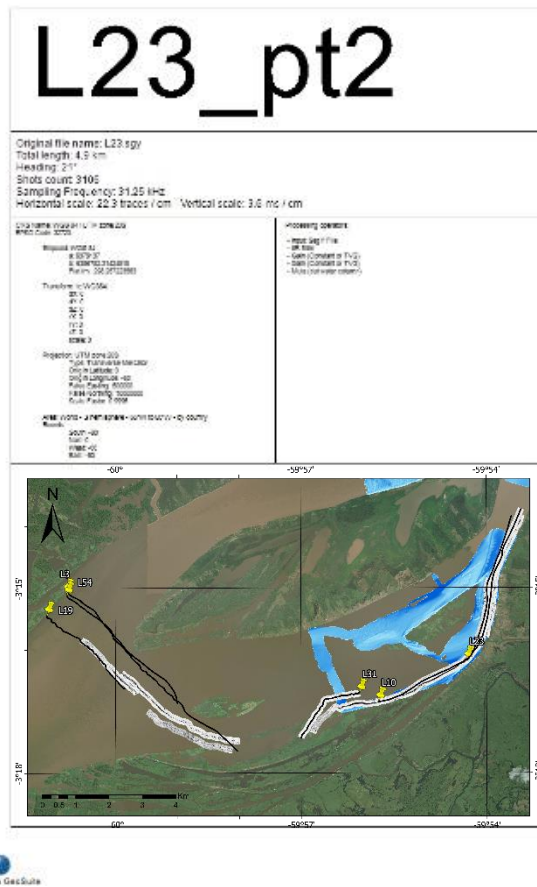


Figura 18 - Perfil sísmico da linha 23 com marcações destacadas de marrom, identificando contatos interpretados como rocha-sedimento.

L31

Projeto: L31 - 2010
Data: 08/05/2010
Hora: 10:00
Local: L31 - 2010
Tipo: Perfil Sísmico
Escala: 1:1000
Projeto: L31 - 2010
Data: 08/05/2010
Hora: 10:00
Local: L31 - 2010
Tipo: Perfil Sísmico
Escala: 1:1000

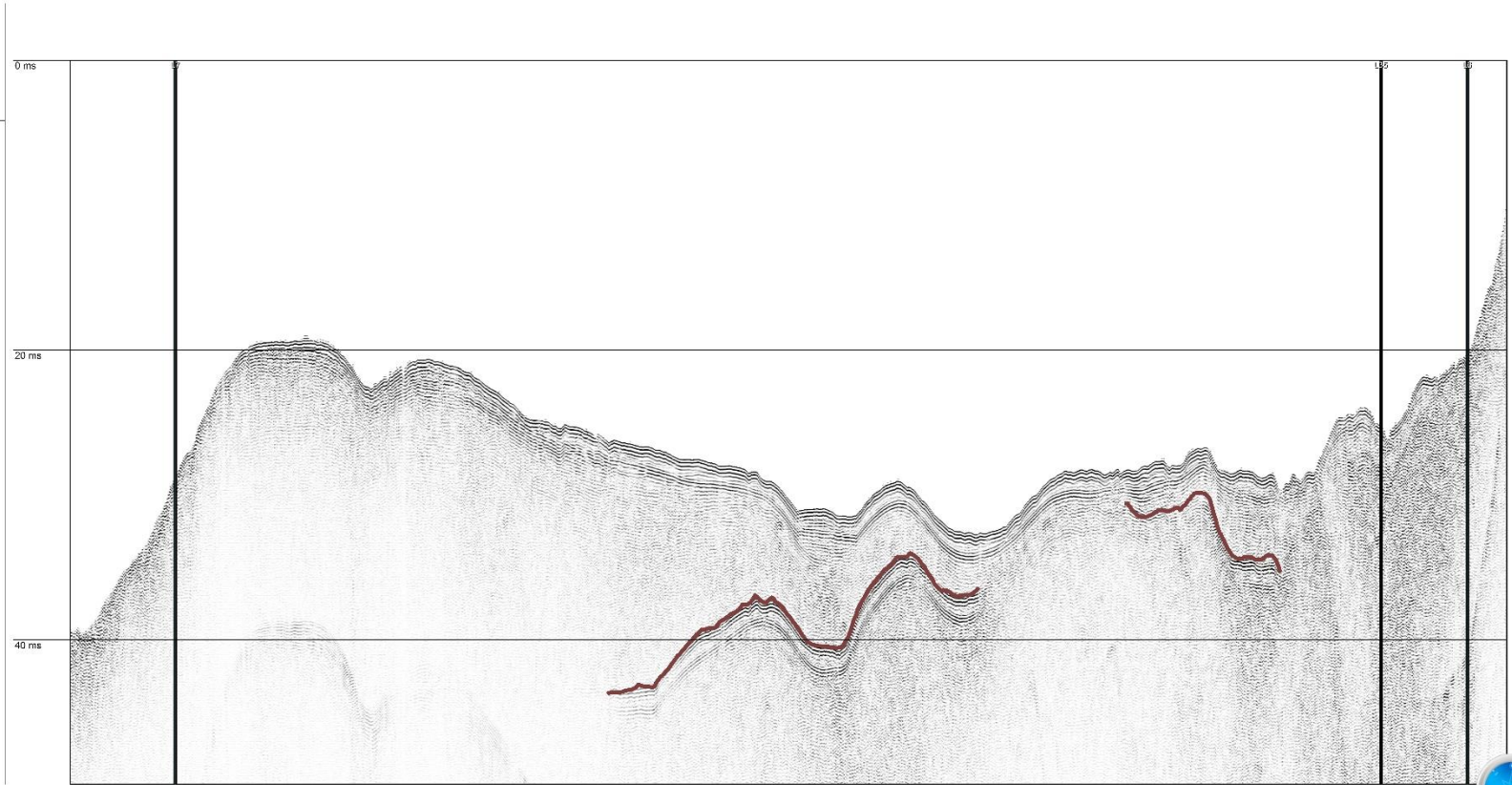
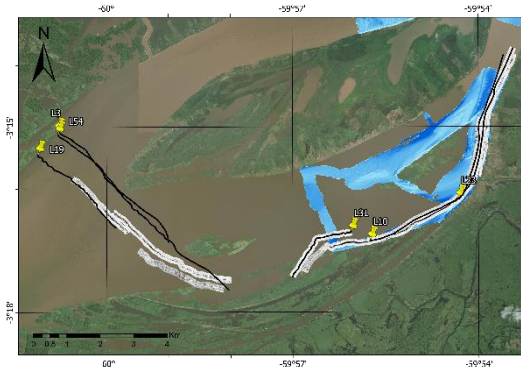


Figura 19 - Perfil sísmico da linha 31 com marcações destacadas de marrom, identificando contatos interpretados como rocha-sedimento.

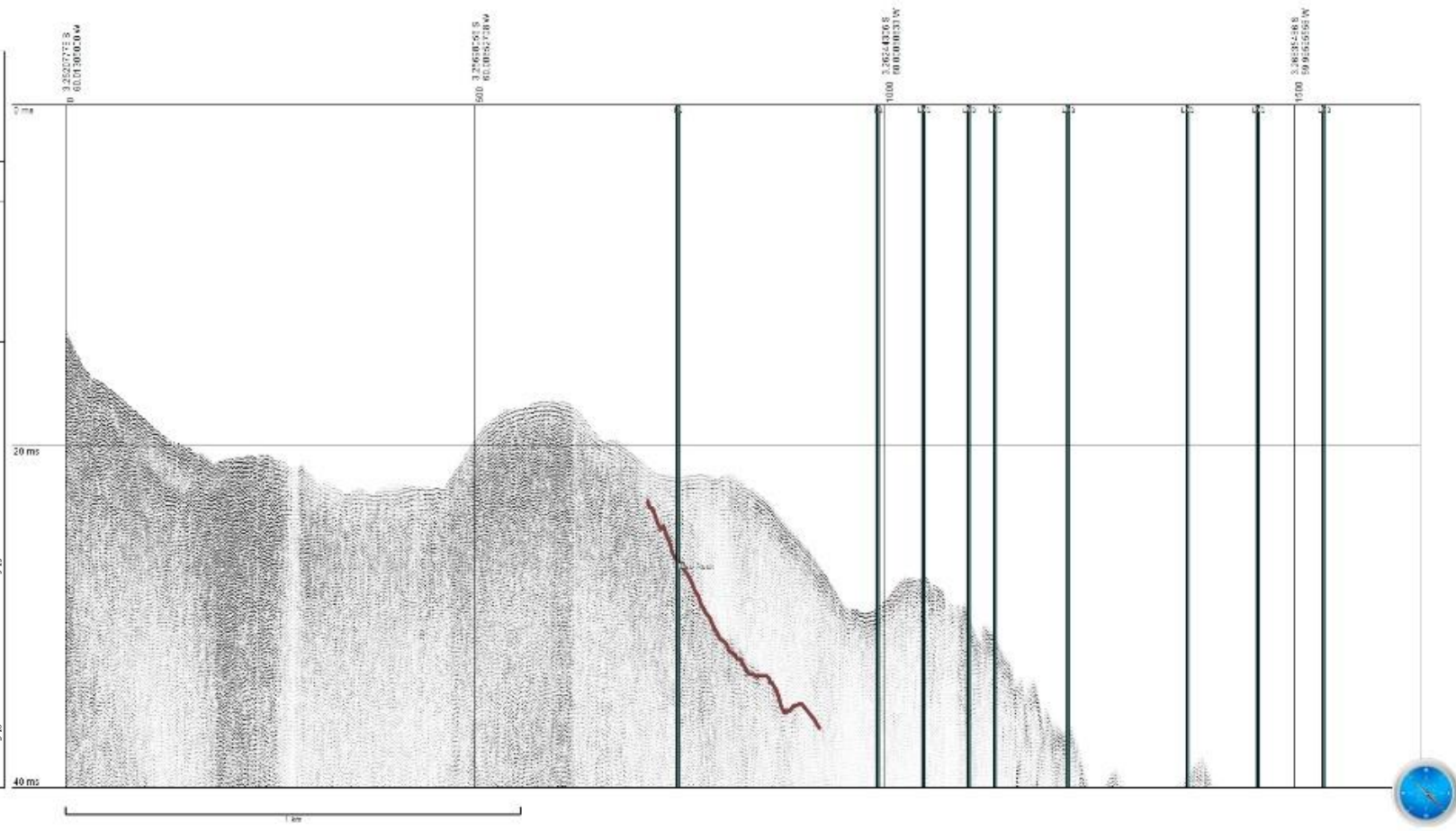
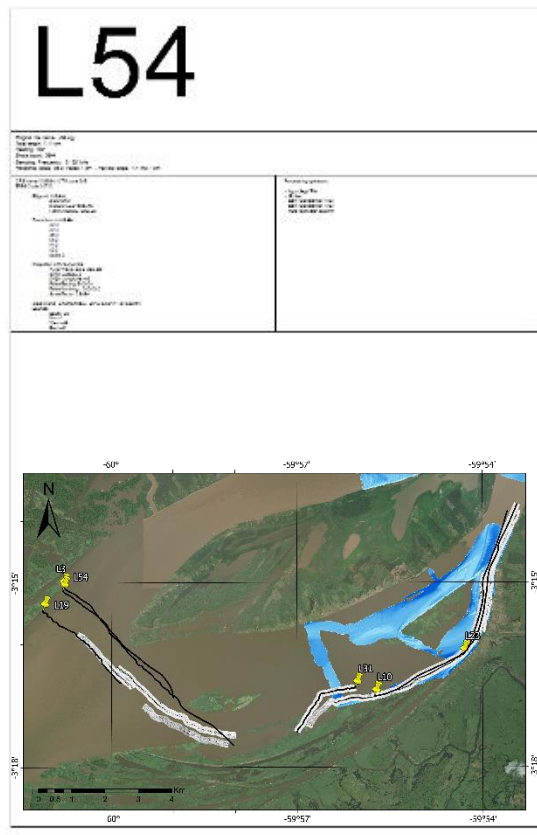


Figura 20 - Perfil sísmico da linha 54 com marcação destacada de marrom, identificando contato interpretado como rocha-sedimento.

Nos perfis acima podemos observar feições típicas de dunas, como nas seções à direita dos perfis das linhas 3, 10 e 54, figuras 14, 15 e 20, respectivamente, além das regiões que podem ser classificadas como o curso principal do rio ou até mesmo canais que foram encobertos por sedimentos, como observa-se no centro do perfil da linha 19 presente na figura 16. Os refletores destacados de marrom indicam um possível contato entre sedimento e rocha que podem ser observados em todas as linhas, com exceção do recorte da linha de número 19. Vale ressaltar que a maioria das imagens possuem um exagero vertical, já que para enquadrar as feições as vezes foi necessário recortar regiões com mais de 2km que ficam limitados pelo espaço da folha.

A grade dos perfis possui linhas verticais com espaçamento de 1km e linhas horizontais com espaçamento de aproximadamente 30m de profundidade. Também é possível observar um pequeno mapa de localização dos perfis no canto inferior esquerdo das imagens, no qual observa-se que as linhas 10, 23 e 31 sobrepõem parte da malha de batimetria.

5.2. Perfis do Sonar de Varredura Lateral

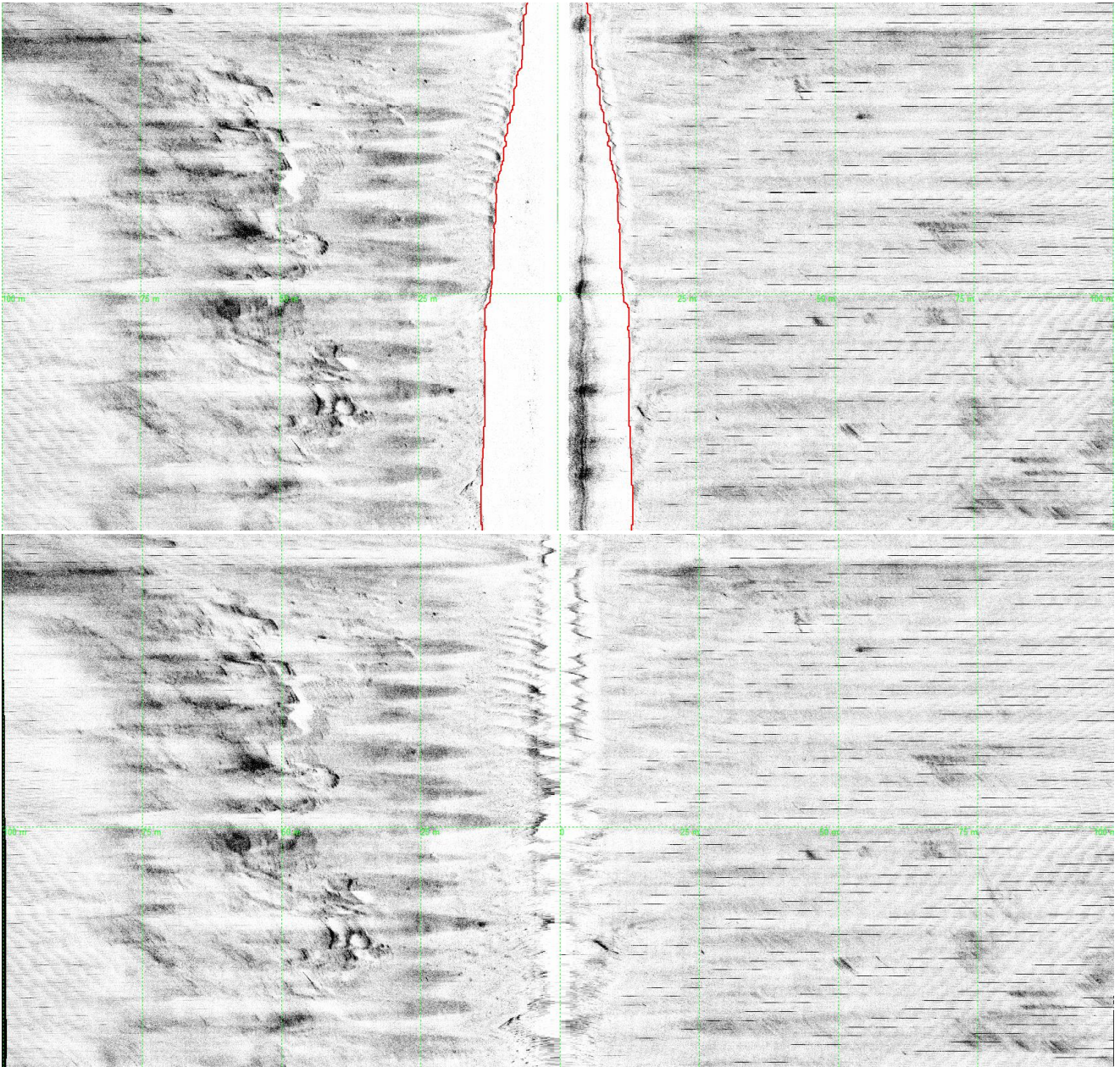


Figura 21 - Seção da linha L3009 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.

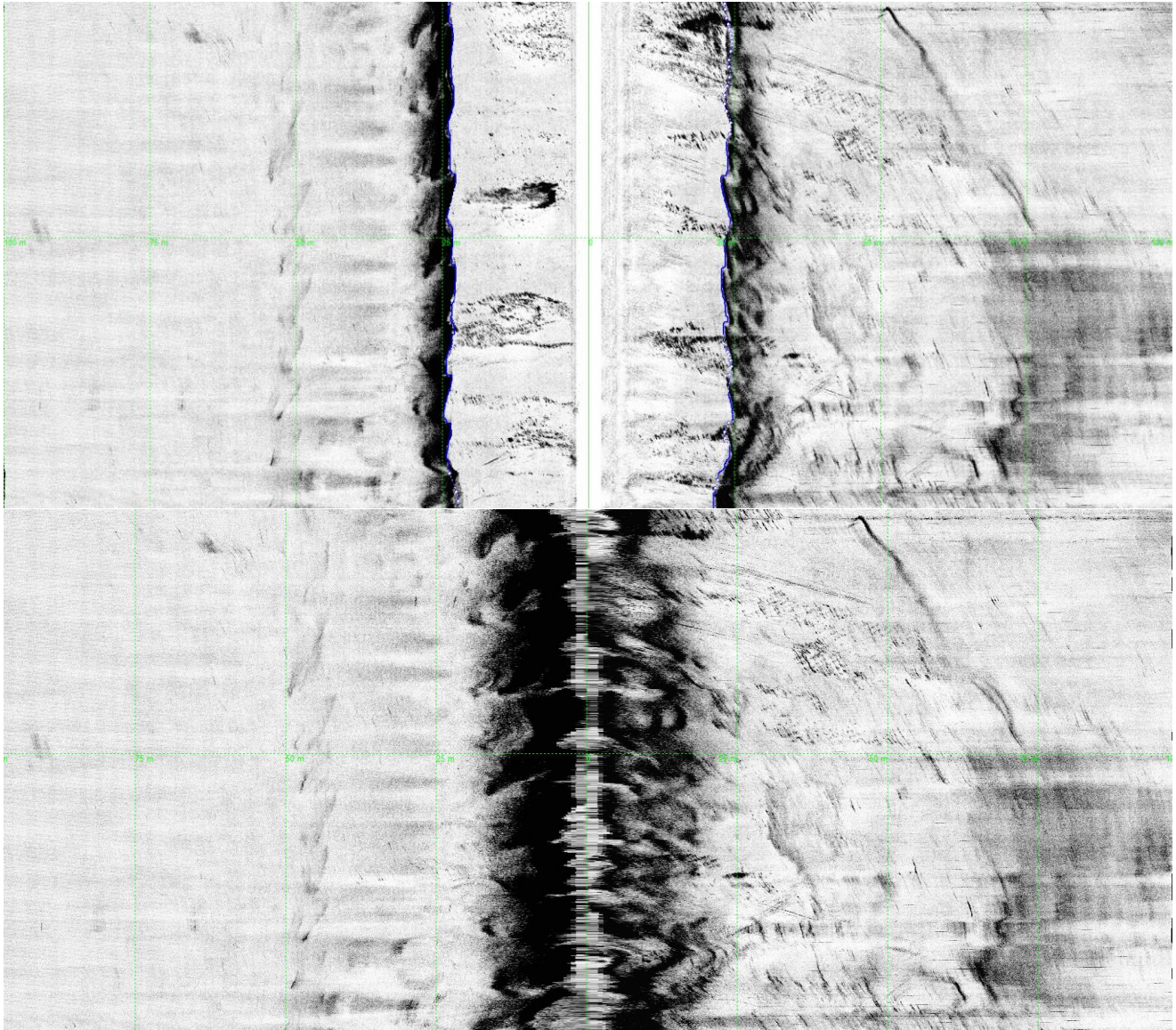


Figura 22 - Seção da linha L10000 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado



Figura 23 - Seção da linha L14012 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.

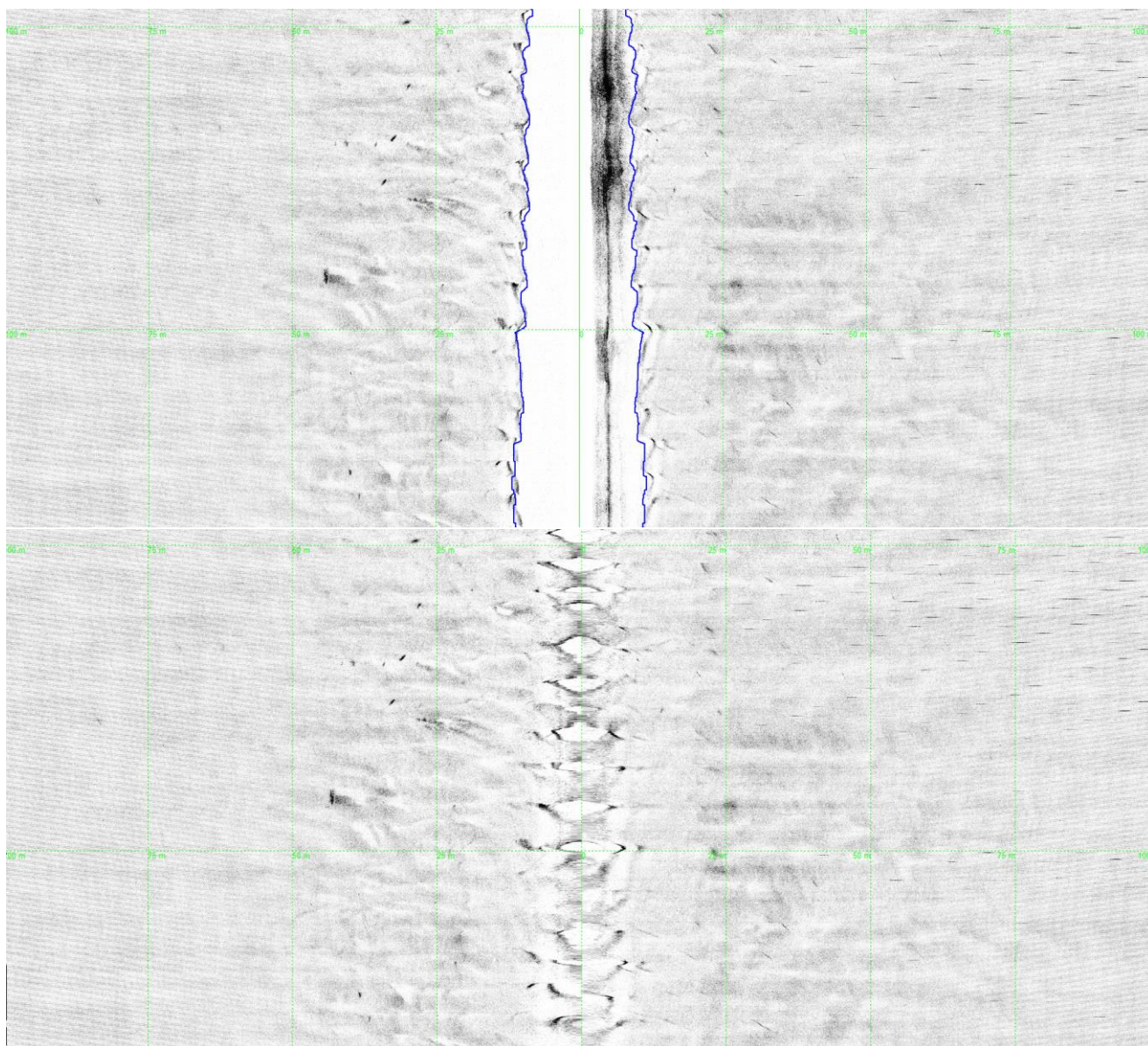


Figura 24 - Seção da linha L14016 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.

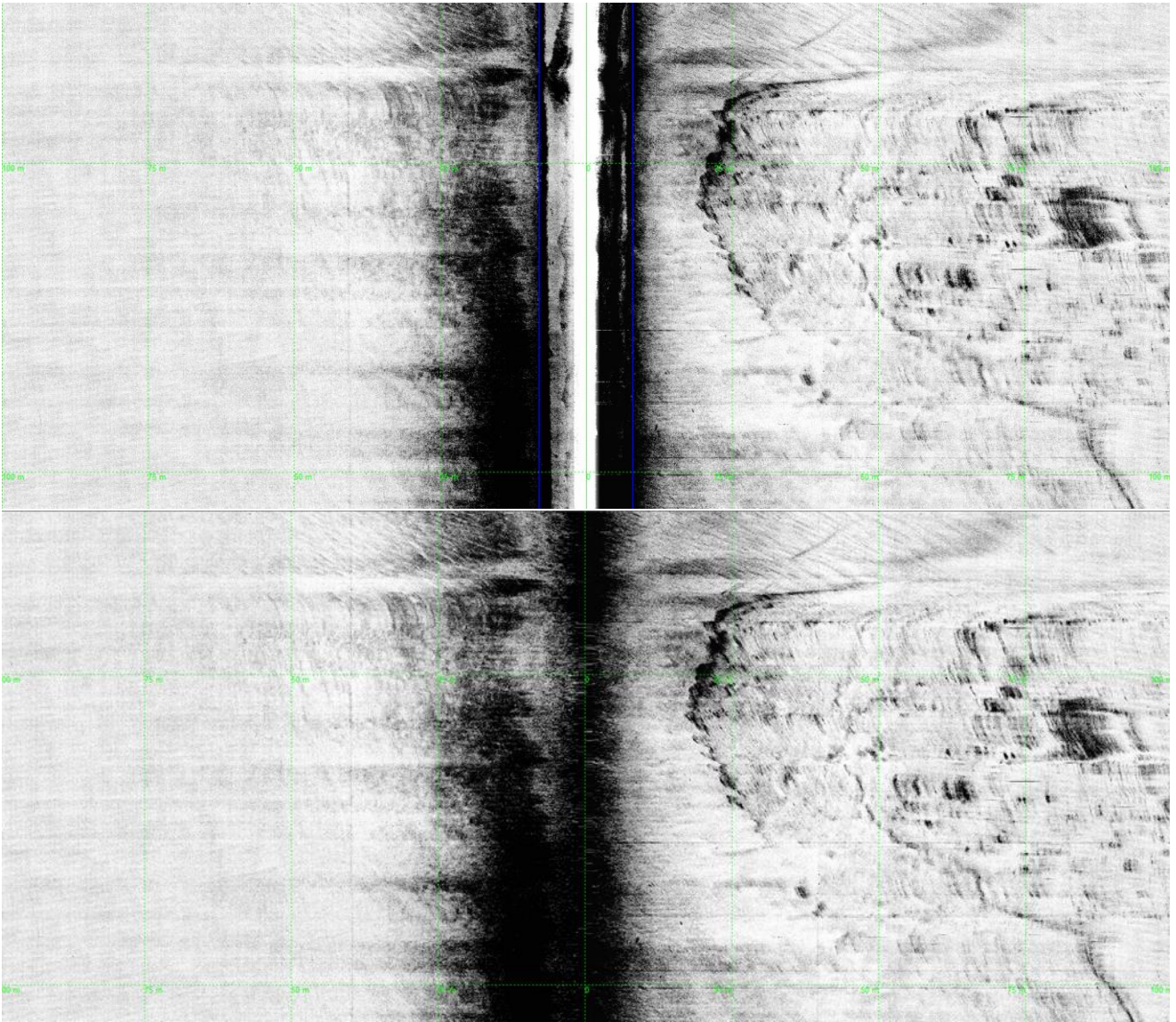


Figura 25 - Seção da linha L14018 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.

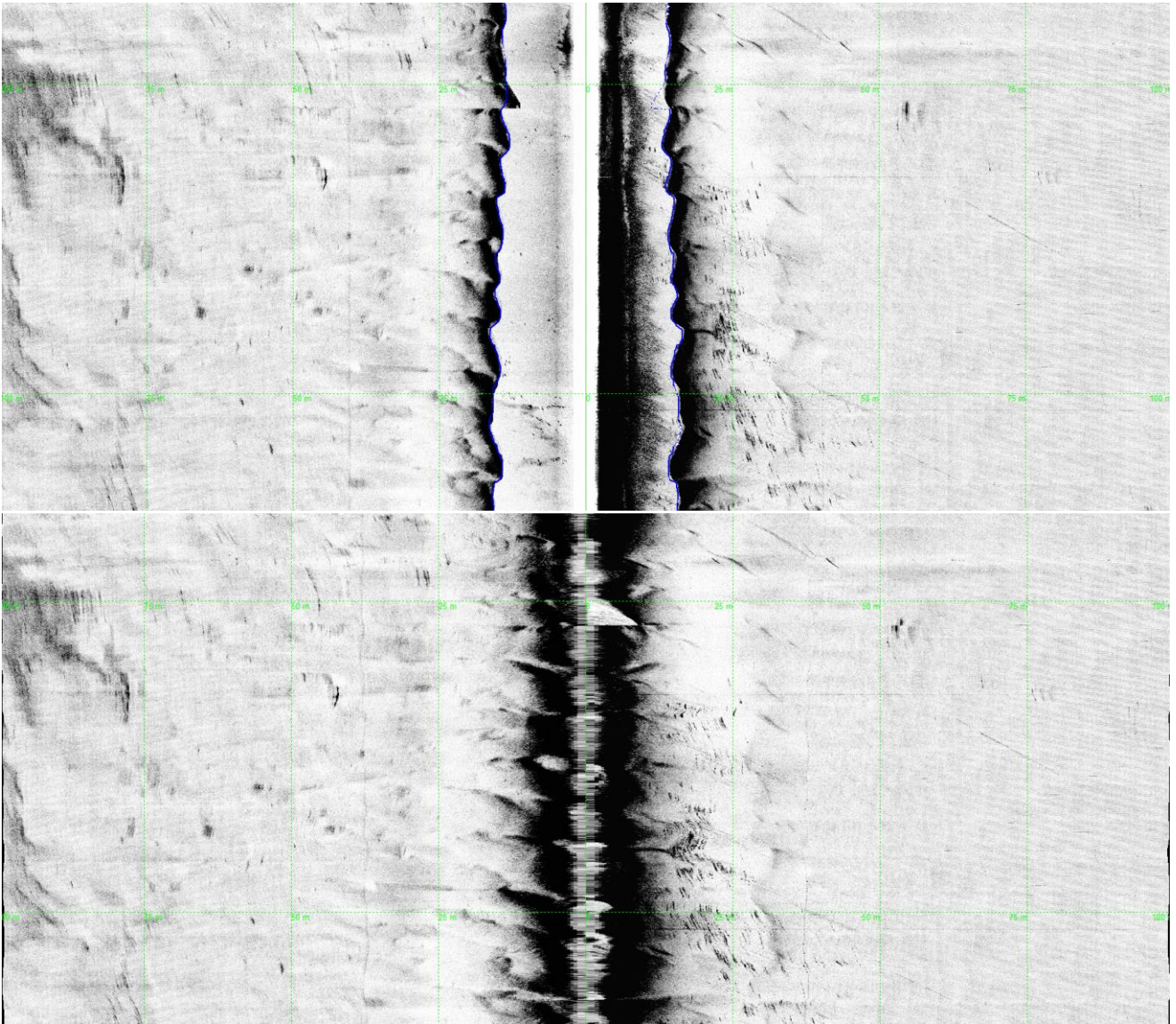


Figura 26 - Seção da linha L14018 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.

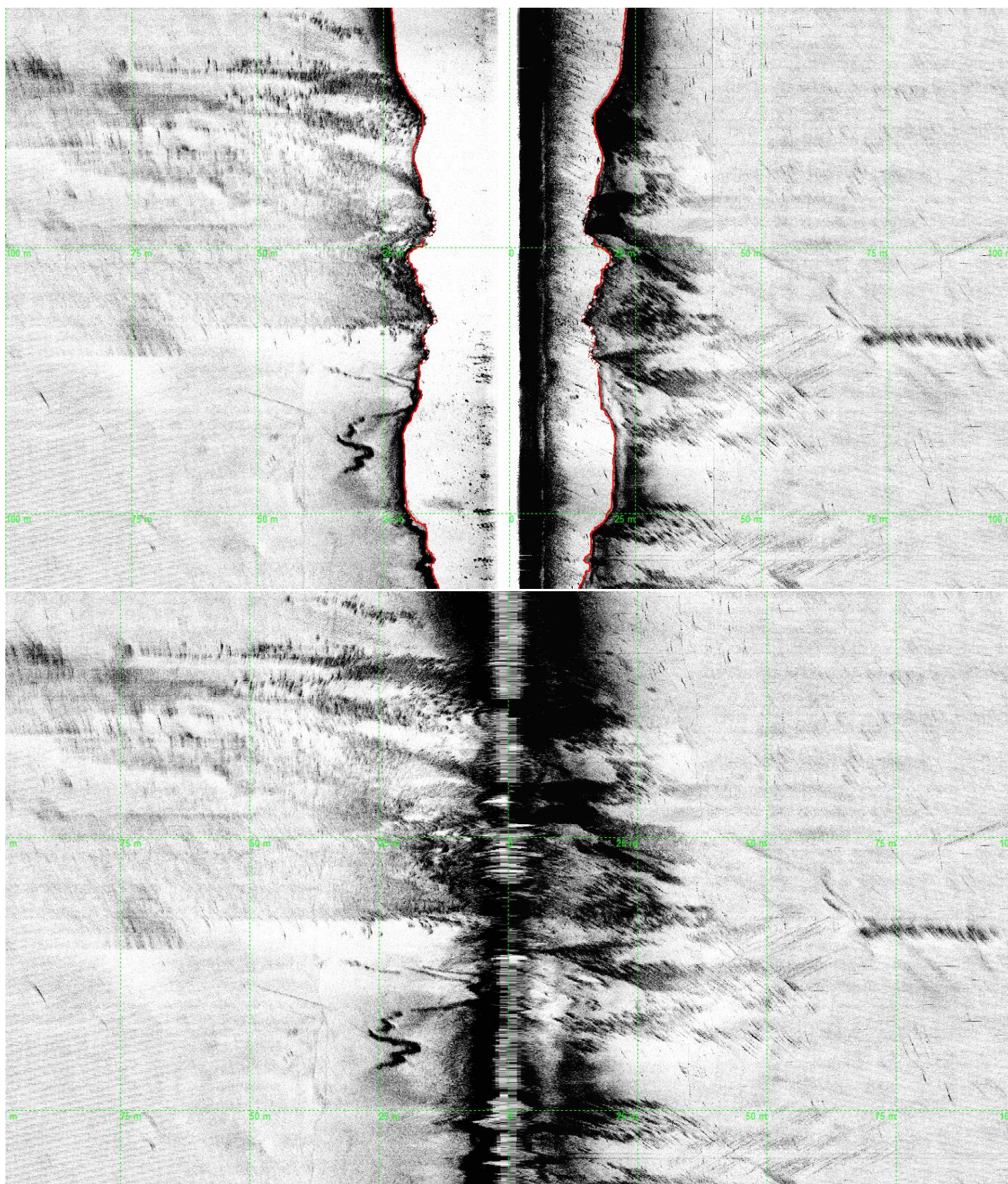


Figura 27 - Seção da linha L14018 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.

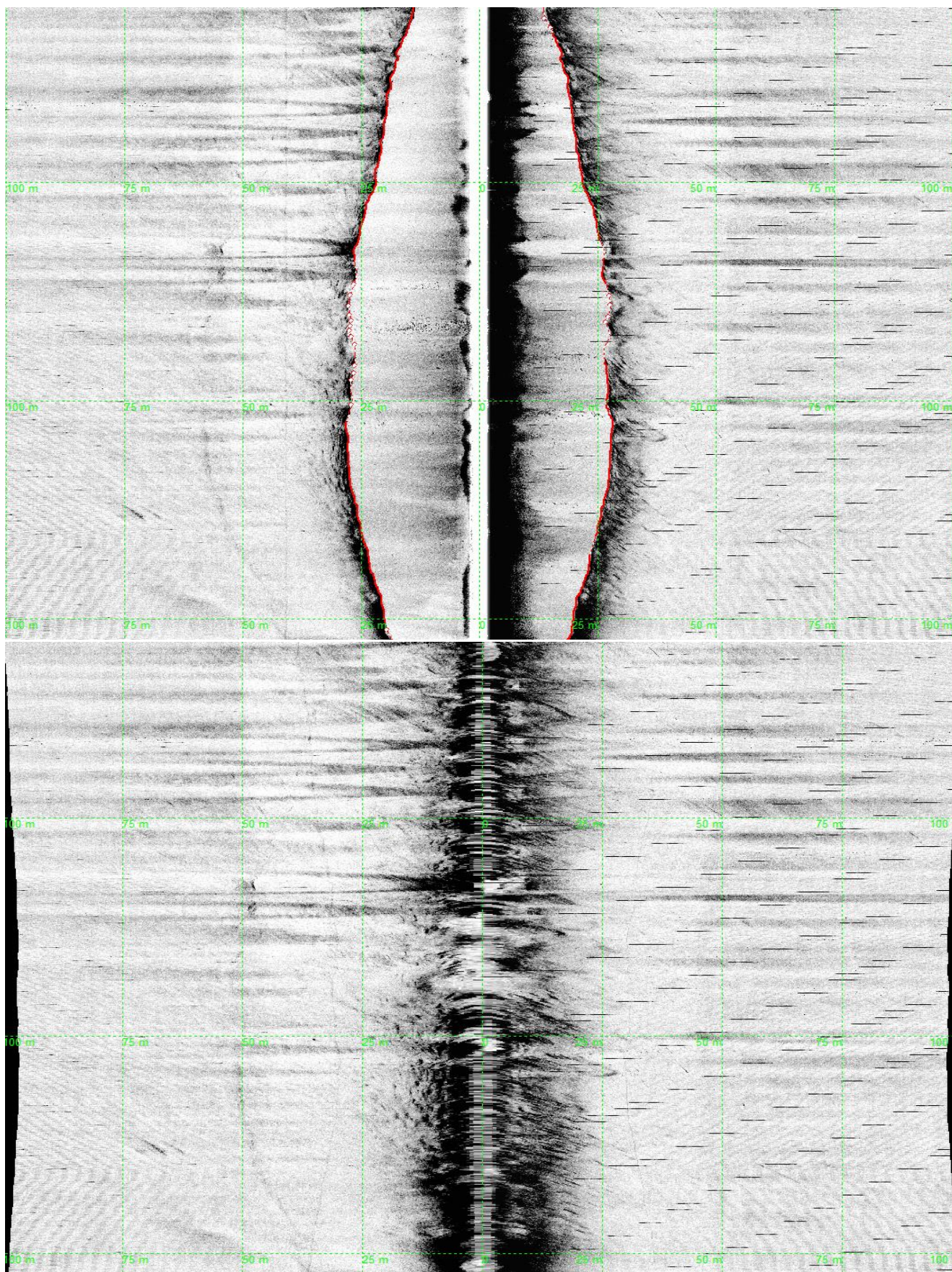


Figura 28 - Seção da linha L16029 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.

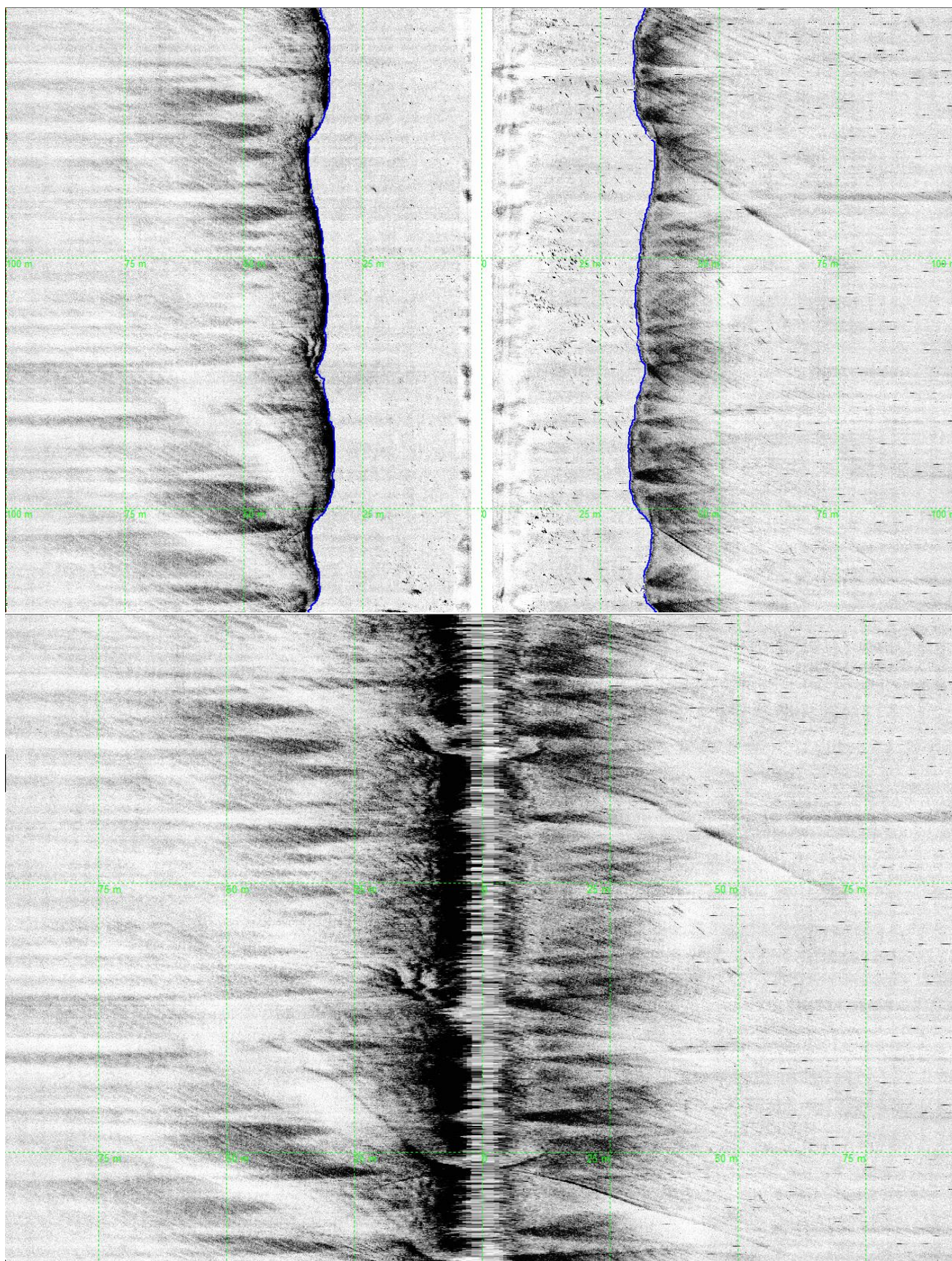


Figura 29 - Seção da linha L19041 do Sonar de Varredura Lateral. a) slant correct desativado, b) slant correct ativado.

Nos registros de *sidescan* acima é possível observar feições morfológicas semelhantes às identificadas nos perfis sísmicos. Como no caso de dunas de grande porte, presentes nas figuras 23 e 29, de médio porte, observadas na figura 26 e de pequeno porte, também chamadas de *ripple*, que são observadas na figura 24. Além de regiões que são possivelmente o curso principal do rio, como por exemplo o recorte na imagem 28. Observa-se principalmente estruturas interpretadas como afloramentos rochosos, presentes à boreste das seções nas imagens 22 e 25, e à bombordo da imagem 21, e no final da coluna d'água da varredura, como se observa na figura 27.

Observa-se ainda, nas seções "a)" da maioria das figuras, ou seja, com o *slant correct* desativado, que existe a presença de uma reverberação constante na coluna d'água, isso se dá pelo fato de o equipamento ter sido acoplado à embarcação ao invés de rebocado, portanto, é possivelmente provocada pelo casco do barco.

5.3. Considerações finais

Este trabalho trouxe de forma geral a importância do estudo e monitoramento de redes fluviais, em especial o trecho do baixo curso do rio Solimões, próximo à ilha da Marchantaria, que com a combinação de três métodos geofísicos distintos, permitiu identificar estruturas do fundo e sub-fundo da região, além de mapear parte do mesmo.

Apesar das aquisições terem sido realizadas em diferentes épocas, e por equipes diferentes, percebe-se a eficácia da combinação de dados geofísicos aquáticos para caracterização do fundo da região em questão. A utilização de mais de um método, diminui a ambiguidade e confirma interpretações prévias. Pela forte correnteza do Rio Solimões e pela não ideal instalação dos equipamentos de medição, tanto o registro do perfilador quanto o do *sidescan* (sonar de varredura lateral) mostraram ruídos e reverberações que dificultaram a interpretação e limitaram a penetração do sinal.

Ainda assim, ao se comparar os dados sobrepostos, pode-se confirmar por exemplo a existência do afloramento da linha 10 do SBP (figura 15) que também é observada na seção L14018 do Sidescan (figuras 25 e 27) e à bombordo da seção L3009 na figura 21 (vide figura 30). Bem como as feições típicas de dunas no canto direito da linha do perfil do SBP que são observadas no recorte da linha L14018 do Sidescan na figura 26 (vide figura 31). No trecho analisado do Rio Solimões é possível observar a presença de embasamento rochoso, que as vezes aflora no leito do rio (figura 17), e que

controla, em parte, a formação de camadas sedimentares por preenchimento de canais (figura 15).

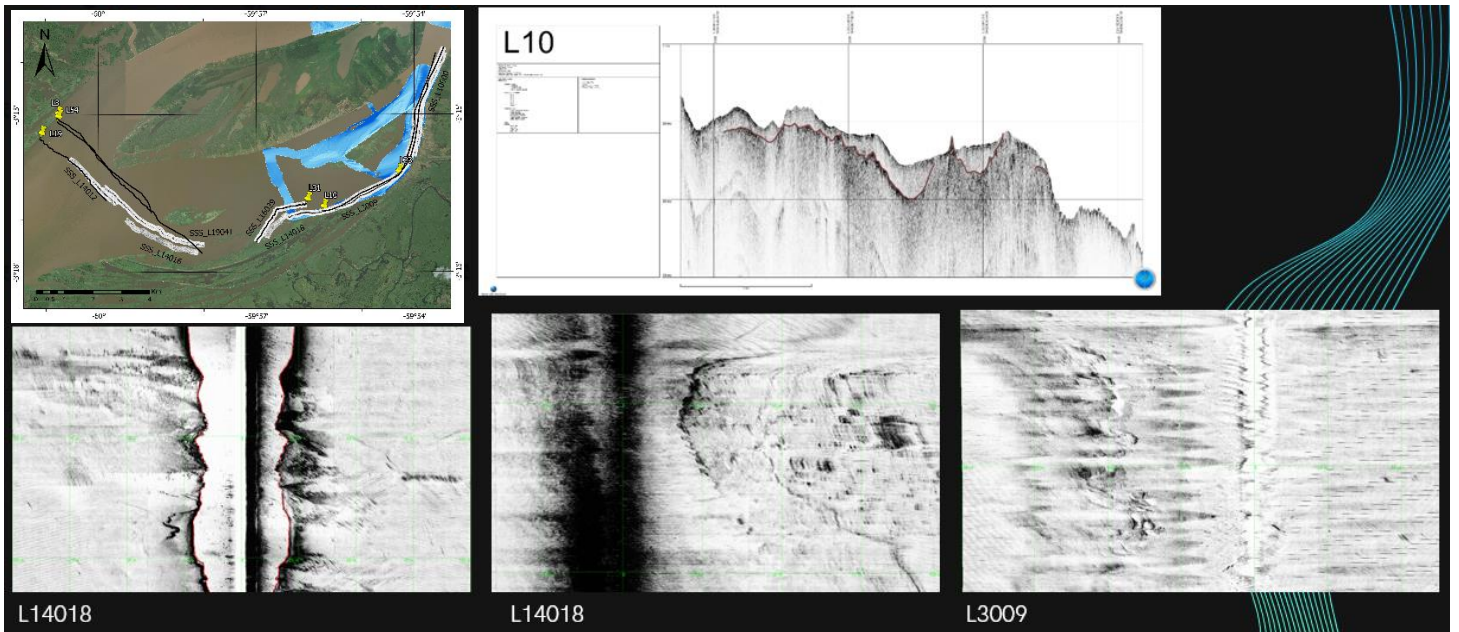


Figura 30 - Mosaico que une o mapa de localização das linhas de aquisição, recorte da linha 10 do SBP (figura 15), seções da linha L14018 (figuras 25 e 27) e seção da linha L3009 (figura 21) do Sidescan, para facilitar a visualização das considerações finais.

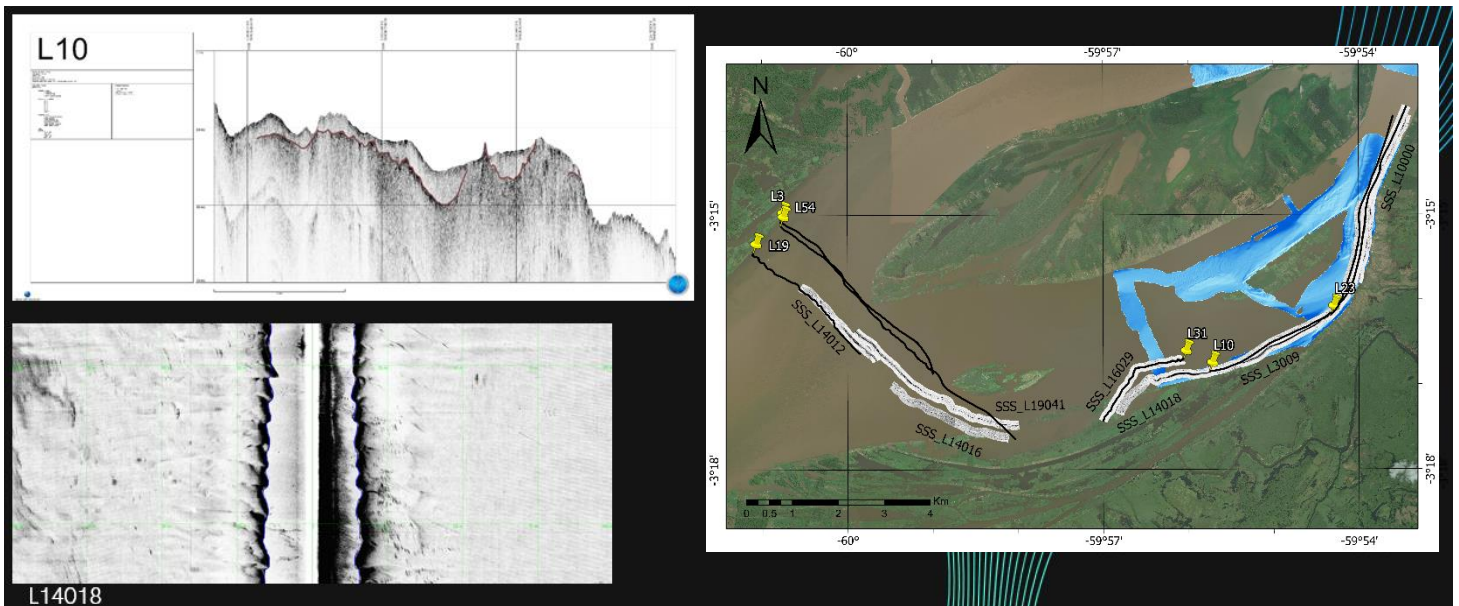


Figura 31 - Mosaico que une o mapa de localização das linhas de aquisição à direita, recorte da linha 10 do SBP (figura 15), e um recorte da linha L14018 (figura 26) do Sidescan, para facilitar a visualização das considerações finais.

A batimetria foi adquirida e processada no âmbito de outro projeto de pesquisa, todavia, foi de extrema importância a utilização dela para auxiliar no entendimento da

morfologia do rio, pois com a topografia do fundo, é possível identificar estruturas semelhantes às vistas nos dados de sonar de varredura lateral e do perfilador de fundo, especialmente nas áreas de sobreposição (figura 13). No trabalho realizado pela Turquetti em 2019, ela identifica diversas feições, apesar de serem em áreas diferentes, também são identificadas neste trabalho, tal como sistemas de dunas e afloramentos rochosos.

Através dos dados de sísmica de reflexão, observa-se que a litologia do fundo e do subfundo não mudam muito ao longo das linhas aquisitadas, e devido às amplitudes de reflexão e da profundidade de penetração (quantidade de energia refratada) – que além da frequência do equipamento utilizado, também está relacionado ao contraste de impedância acústica dos meios – pode-se inferir que o fundo é composto basicamente por uma geologia de granulometria mais fina, e pouco compactada, com presença de formações rochosas que se tornam bons refletores. Autores como Franzinelli e Church, trazem com mais detalhes em seus trabalhos as formações geológicas dessa região, que segundo eles, é composta principalmente por sedimentos não consolidados, como areia, silte, argila e cascalho não consolidados, e rochas pertencentes à formação Alter do Chão, como arenitos argilosos e silicificados.

Os dados de sonografia particularmente não foram bem adquiridos, por diversos fatores já citados, como o equipamento não foi rebocado – devido aos perigos de navegação do rio – ocorreram reverberações provavelmente provenientes do casco da embarcação, e como também sua potência não ter sido reduzida em trechos nos quais o equipamento se aproximava muito do fundo, o que causou uma saturação do registro, como podemos observar na figura 25. Apesar de tudo, graças à sobreposição com aquisições de outros métodos, foi possível obter proveito suficiente dos dados para caracterizar a região estudada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial, 163, 2015.
- ALMEIDA, Renato Paes de; GALEAZZI, Cristiano Padalino; FREITAS, Bernardo Tavares; JANIKIAN, Liliane; IANNIRUBERTO, Marco; MARCONATO, André. **Large barchanoid dunes in the Amazon River and the rock record: Implications for interpreting large river systems.** Earth and Planetary Science Letters, v. 454, 2016, p. 92-102;
- BASTOS, Terezinha Xavier. O estado atual dos conhecimentos das condições climáticas da Amazônia brasileira. 1972.
- BASTOS, Terezinha Xavier. **O clima da Amazônia Brasileira segundo Köppen.** Belém: EMBRAPA-CPATU, 1982.
- BLONDEL, P.; HUVENNE, Veerle; HÜHNERBACH, Veit. Multi-frequency acoustics of deep-water coral habitats and textural characterisation. In: **Proceedings of the 8th European conference on underwater acoustics.** 2006. p. 12-15.
- BUCHANAN, Larry A. Using a Dual Frequency Echo Sounder for the Determination of Suspended Sediment in the Water Column. In: **Proceedings of the Western Dredging Association 25th Annual Dredging Conference, New Orleans, LA USA.** 2005.
- CARAZZAI, Daniel et al. Sonografia e batimetria de varredura do Canal da Barra da Lagoa. 2015.
- CORRÊA, Alberto Jacques Ribeiro et al. Aplicação de sísmica de alta resolução em ambiente estuarino amazônico, na investigação de estruturas neotectônicas. Dissertação (Pós-graduação) Universidade Federal do Paraná, 2015.
- CPRM. Mapa geológico do estado do Amazonas: 1:1.000.000. Manaus: CPRM, 2005a. CD-ROM.
- DAEMON, Roberto F. Contribuição à datação da formação alter do chão, bacia do Amazonas. Revista Brasileira de Geociências. Volun 5, 1975;
- DO NASCIMENTO SILVA*, Luzia Liniane et al. Mapeamento Sonográfico da plataforma externa da Bacia Potiguar (NE, Brasil) com ênfase em ambientes recifais. In: 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 3-6 August 2015. Brazilian Geophysical Society, 2015. p. 449-453.
- EL-GEBALLY, Ayman; DWEDAR, Ahmed Mohey; WAGEH Assem. Design and Implementation of Time Variable Gain Amplifier (TVG) using FPGA. 5th IUGRC International Undergraduate Research Conference, Military Technical College, Cairo, Egyth, Aug 9th – Aug 12th, 2021. Disponível: https://iugrc.journals.ekb.eg/article_246366_51e49ed40d0d7c616f9b56a18f65925d.pdf <acesso em 24 de agosto de 2022>;
- ESPINOZA-VILLAR, R., Martinez, J.M., Armijos, E., Espinoza, J.C., Filizola, N., Santos, A., Willems, B., Fraizy, B., Santini, P., Vauchel. Spatio-temporal monitoring of suspended sediments in the Solimões River (2000-2014). Comptes Rendus Geoscience, 2018;
- GAAG, GILBERTO. Apostila de Levantamentos Hidrográficos – Noções Gerais. UFRGS – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, IGEO – INSTITUTO DE GEOCIENCIAS. 2016. Disponível: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/157210/001020445.pdf> < acesso em 10 de setembro de 2022 >;
- GAGG, Gilberto. Apostila de levantamento hidrográficos – Noções Gerais. Univerisdade Federal do Rio Grande do Sul. 2016;
- GUALTIERI, Carlo; FILIZOLA, Naziano; DE OLIVEIRA, Marco; SANTOS, André Martinelli; IANNIRUBERTO, Marco. **A field study of the confluence between Negro and Solimões Rivers. Part 1: Hydrodynamics and sediment transport.** Comptes Rendus Geoscience, v. 350, 2018, p. 31-42;

IANNIRUBERTO, Marco; TREVETHAN, Mark; PINHEIRO, Arthur; ANDRADE, João Fernando; DANTAS, Elton; FILIZOLA, Naziano; SANTOS, André; GUALTIERI, Carlo. **A field study of the confluence between Negro and Solimões Rivers. Part 2: Bed morphology and stratigraphy.** Comptes Rendus Geoscience, v. 350, 2018, p. 43-54;

MAIA, Maria Adelaide Mansini; MARMOS José Luiz; **Geodiversidade do estado do Amazonas:** Programa de geologia do Brasil Levantamento da Geodiversidade. Ministério de Minas e Energia apud Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Manaus, Brasil, 2010. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16624> <acesso em 06 nov. 2021>;

Marques, R. O., & Carvalho, J. A. L. de. (2019). PROCESSOS FLUVIAIS NO RIO AMAZONAS: EROSÃO LATERAL E IMPLICAÇÕES PARA A CIDADE DE PARINTINS/ River processes in the Amazon river: lateral erosion and implications for the city of Parintins: EROSÃO LATERAL E IMPLICAÇÕES PARA A CIDADE DE PARINTINS. REVISTA GEONORTE, 10(35), 108–132. <https://doi.org/10.21170/geonorte.2019.V.10.N.35.108.132>

MEDEIROS, Sidney Crystian Oliveira de. Caracterização das dunas da área de proteção ambiental da barra do Rio Mamanguape, Rio Tinto, PB. Universidade Federal da Paraíba. 2012. Disponível: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/17153/1/SCOM07062012.pdf> <acesso em 24 de agosto de 2022>;

NETO, Arthur Ayres. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. Rev. Geof. 18, 2000; Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbg/a/FG5J6dT3nnQR4W33Sf6DSGL/?lang=pt#> <acesso em 06 nov. 2021>;

NIMER, Edmon. Climatologia do Brasil. **IBGE**, 1989.

Penrose, J.D., Siwabessy, P.J.W., Gavrilov, A., Parnum, I., Hamilton, L.J., Bickers, A., Brooke, B., Ryan, D.A., Kennedy, P., 2005. Acoustic techniques for seabed classification. Cooperative Research Centre for Coastal Zone Estuary and Waterway Management, Technical Report 32.

PRESS, Frank et al. Para entender a Terra. **Artmed**, 2006.

QUARESMA, V. S.; DIAS, G. T. M.; BAPTISTA NETO, J. A. 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. Revista Brasileira de Geofísica, v. 18, p. 201-214, 2000.

RODRIGUES, T.E.; PEREIRA, L.C.; GAMA, J.R.N.F.; RÊGO, R.S; HENRIQUE, I.M. Uso e ocupação do solo da Amazônia brasileira. Embrapa Amazônia Oriental. 1996. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/394249/uso-e-ocupacao-do-solo-da-amazonia-brasileira> <acesso em 06 nov. 2021>;

SALT AMBIENTAL. **Geofísica Aquática - Serviços de batimetria, sonar de varredura lateral e perfilagem sísmica:** batimetria. BATIMETRIA. Disponível em: www.saltambiental.com.br <acesso em: 06 nov. 2021>.

SOUZA BELCHIOR, Flávia Valânea et al. Padrões de retroespalhamento (backscatter) no vale Inciso do Rio Açu (Plataforma Externa) com ênfase em ambientes recifais (NE Brasil). In: **14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 3-6 August 2015.** Brazilian Geophysical Society, 2015. p. 433-438.

SOUZA, Eliene Lopes de et al. Síntese da hidrogeologia nas bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões: Sistemas Aquíferos Içá-Solimões e Alter do Chão. 2013.

SUDAM 1984. Atlas Climatológico da Amazônia Brasileira. Projeto de Hidrologia e Climatologia da Amazônia. SUDAM, Publ.39, Belém.

SUGUIO, Kenitiro. **Geologia sedimentar.** Editora Blucher, 2003.

Time Varying Gain (TVG) Control. Disponível: https://chesapeakeotech.com/wp-content/uploads/docs/SonarWiz7_UG/HTML/time_varying_gain_tvg_control.htm <acesso em 24 de agosto de 2022>;

TUCCI, Carlos EM; BERTONI, Juan Carlos. **Inundações urbanas na América do Sul.** Ed. dos Autores, 2003.

TURQUETTI, Gabriela Nunes et al. 3D acoustic characterization of barchan dunes in the Solimões River. In: **15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 31 July-3 August 2017**. Brazilian Geophysical Society, 2017. p. 662-667.

TURQUETTI, Gabriela Nunes. **Caracterização geofísica da evolução de ilhas e canais de rios anabranching**: estudo de caso em um trecho do rio solimões (am). Dissertação (Mestrado) - Curso de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2019, 72 folhas;

WOHL, Ellen; MERRITTS, Dorothy J. What is a natural river?. **Geography Compass**, v. 1, n. 4, p. 871-900, 2007.