



UnB

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA**

CURSO DE MESTRADO EM GEOFÍSICA APLICADA

GABRIEL ANTONIO RODRIGUES VELLOSO CORDEIRO

**CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE ASSOREAMENTO DO
RESERVATÓRIO DE JIRAU (RO) COM BASE EM DADOS
GEOFÍSICOS**

Nº DA DISSERTAÇÃO (213)

BRASÍLIA

2023

GABRIEL ANTONIO RODRIGUES VELLOSO CORDEIRO

**CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE ASSOREAMENTO DO
RESERVATÓRIO DE JIRAU (RO) COM BASE EM DADOS
GEOFÍSICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -
Graduação em Geociências Aplicadas e
Geodinâmica (PPGGAG) e à banca
examinadora do Instituto de Geociências (IG) da
Universidade de Brasília (UnB) para obtenção
do título de Mestre em Geociências. Área de
Concentração: Geofísica.

Orientador: Prof ° Marco Ianniruberto

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

RC794c Rodrigues Velloso Cordeiro, Gabriel Antonio
CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE ASSOREAMENTO DO
RESERVATÓRIO DE JIRAU (RO) COM BASE EM DADOS GEOFÍSICOS /
Gabriel Antonio Rodrigues Velloso Cordeiro; orientador
Marco Ianniruberto. -- Brasília, 2023.
136 p.

Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) --
Universidade de Brasília, 2023.

1. Rio Madeira. 2. Assoreamento. 3. Barragem Jirau. 4.
Técnicas Geofísicas. I. Ianniruberto, Marco, orient. II.
Título.

GABRIEL ANTONIO RODRIGUES VELLOSO CORDEIRO

**CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE ASSOREAMENTO DO RESERVATÓRIO
DE JIRAU (RO) COM BASE EM DADOS GEOFÍSICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Geociências Aplicadas, área de concentração: Geofísica

18 de maio de 2023

Prof. Dr. Marco Ianniruberto

(IG-UnB)

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos

(IG-UnB)

Dr. Luiz Antonio Pereira de Souza

(LAPS Consulting Ltda.)

“Quanto mais longe enxergamos, mais existe para enxergar.”

Marcelo Gleiser, físico.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelos conselhos, apoio, amor e acolhimento durante o período de realização da minha dissertação. Aos meus irmãos, cunhada e sobrinhos pelos momentos de felicidade, amparo e carinho.

Agradeço ao meu orientador Marco Ianniruberto que me guiou durante esses dois anos me dando conselhos, além de sua paciência e dedicação ao me orientar.

Agradeço aos meus avós, tios e primos, pelos conselhos e mensagens carinhosas durante diversos momentos desse trabalho.

Aos colegas do Projeto SPECTROSED: Osmair, Diego, Diogo, Prof. Jean Michel e Prof. Henrique Roig pelos conselhos sobre o desenvolvimento da minha pesquisa e sobre a geração de produtos. Além desses, agradeço aos colegas que realizaram o trabalho de campo comigo: Ana Livia e Alam.

Agradeço aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, principalmente aos professores Welitom, Marcelo, Elder e Rafael pelos valiosos ensinamentos durante as disciplinas da Pós-Graduação.

Aos colegas da empresa RuralTech que nos auxiliaram na aquisição de dados e, também, no processamento de dados contribuindo para que eu conseguisse o melhor resultado.

Agradeço aos meus amigos pelo apoio e pelos momentos de descontração, principalmente ao Rocha e à Ana, que me deram apoio e conselhos durante esse período. Nossas saídas e conversas foram importantes para a geração deste produto.

Agradeço ao Dojo Rufino, principalmente ao Sensei Rufino, pelas lutas e pelos momentos de meditação realizados, permitindo que eu retirasse o foco da pesquisa por alguns momentos.

Por último e não menos importante, agradeço à CAPES, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível de Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Os estudos dos impactos decorrentes da implementação de barragens vêm sendo realizados ao longo do tempo em diferentes âmbitos, entre eles a estimativa do assoreamento de reservatórios. A preocupação é evidente, também, na Bacia Hidrográfica Amazônica devido ao volume d'água e de sedimentos transportados, entre outras razões. Dentre as sub-bacias Amazônicas, a sub-bacia do rio Madeira apresenta maior vulnerabilidade ao desenvolvimento das barragens, devido, principalmente, a sua alta capacidade de transporte de sedimentos. Essa preocupação também se mostra evidente, já que pesquisas recentes apontam redução da Concentração de Sedimentos em suspensão após a implementação da Barragem de Jirau e Santo Antônio. A partir da necessidade de compreender o impacto no fluxo de sedimentos da barragem de Jirau, este estudo foi realizado tendo como objetivo a promoção de análises do volume sedimentar assoreado por meio da caracterização morfológica e estratigráfica da área estudada por meio de dados geofísicos. Para descrever as feições encontradas no leito do rio Madeira, as técnicas da Batimetria Multifeixe e da Perfilagem Sísmica de Alta Resolução foram utilizadas, abordagens bastante eficazes na retratação de ambientes fluviais, lacustres e de reservatório. A aquisição de dados ocorreu durante os dias 08/02/2022 a 15/02/2022 na área entre a Cachoeira de Jirau (CJ) e área dos diques artificiais. Os instrumentos usados foram o ecobatímetro multifeixe ODOM MB1 (170 a 220 kHz) e o perfilador CHIRP EDGETECH 216S (2-15kHz). A partir do processamento de dados, houve a interpretação dos modelos batimétricos e perfis sísmicos. Os resultados encontrados permitiram caracterizar a morfologia da área de estudo e inferir sobre a dinâmica do fluxo de sedimentos. Além disso, com base nos dados obtidos, foi possível presumir sobre os locais mais vulneráveis ao assoreamento. Já em relação à estimativa do volume de sedimentos e da taxa de assoreamento conseqüentemente, houve dificuldade de demarcar, precisamente, a interface relativa à base da camada de sedimentos assoreados. Por fim, a interpretação da geomorfologia e da estratigrafia da área de estudo e da presença de sedimentos, realizada nesta pesquisa, foi compatível com o comportamento da concentração de sedimentos em suspensão, interpretado por imagens de satélite.

Palavras Chaves: Rio Madeira, Assoreamento, Barragem Jirau, Técnicas Geofísicas

ABSTRACT

Environmental impact assessments of dams' implementation have been carried out over time involving different knowledge areas, including the issue of reservoirs silting. This also concerns the Amazon River Basin due to the volume of water and transported sediments, among other reasons. Among the Amazonian rivers, the Madeira River sub-basin is more vulnerable to the development of dams, mainly due to its high sediment transport capacity. Recent research indicates a reduction of the Suspended Sediment Concentration in the Amazon River at Obidos after the implementation of the Jirau and Santo Antonio Dams in the Madeira River. Considering an original intention of better understand the impact on the flow of sediments in Jirau Reservoir, this study was carried out with the objective of promoting analyzes of the sedimentary volume silted up through the characterization of the morphology and stratigraphy of a limited area in Jirau Reservoir by geophysical data. To describe the features found in this area, which includes the old bed of a stretch of the Madeira River, the techniques of Multibeam Bathymetry and High-Resolution Seismic Profiling were used. These techniques are recognized as very effective approaches for the representation of fluvial, lake and reservoir environments. The data acquisition occurred in the Jirau Reservoir stretch between the Jirau Old Rapids and the levees, close to Jirau Dam, during the period of February 8th to February 15th, 2022. The devices used were an ODOM MB1 multibeam echo sounder (170-220 kHz) and a CHIRP EDGETECH 216S (2-15 kHz) profiler. From data processing, bathymetric models and seismic profiles were obtained. The results found allowed a characterization of the study area morphology and stratigraphy as well as an interpretation of sediment flow dynamics. Furthermore, based on the data obtained, it was possible to formulate assumptions about the reservoir regions more vulnerable to siltation. The objectives of estimation of the volume of sediments and the rate of siltation in the study area were not achieved due to the difficulty in identifying, with precision, the interface relative to the base of the silted sediment layer. Finally, the interpretation of the geomorphology and stratigraphy of the study area and the presence of sediments, carried out in this research, is coherent with the behavior of the concentration of suspended sediments, interpreted by satellite images.

Keywords: Madeira River, Silting, Jirau Dam, Geophysical Techniques

Lista de Figuras

Figura 1 - Deposição de Sedimentos em um Reservatório modificado de Slof (1991).....	10
Figura 2 - Variações na concentração de sedimentos em suspensão no rio Madeira a jusante da barragem de Santo Antônio (Latrubesse et al., 2017).....	12
Figura 3 - Mapa de regiões em que há assoreamento e degradação (erosão). Figura adaptada de Souza et al. 2008.....	13
Figura 4 - Alta Bacia do rio Madeira com três estações de medida: CE- Cachuela Esperanza no rio Beni, GY-Guayamérin no rio Mamoré e PV-Porto Velho no rio Madeira. Barragens de Jirau e Santo Antônio representadas pelo círculo amarelo. Principais drenagens fluviais da bacia do rio Madeira e sub-bacias do Madeira. Curva de nível de 400m dos Andes e limite da bacia foreland. Modelo de Elevação do <i>Shuffle Radar Topography Mission (SRTM)</i> . Imagem de Rivera et al. (2019).....	14
Figura 5 - a) Ilustra a vazão (Q), a concentração de sedimentos finos (FSC) e a regressão linear de FSC na estação de Porto Velho (PV). b) Ilustra, na estação de Cachuela Esperanza (CE), a redução de sedimentos em suspensão de 900 a 600 mg L ⁻¹ . Imagem de Rivera et al. (2019)	15
Figura 6 - Localização das Estações onde houve as seções amostrais. A quilometragem indica a distância de determinada estação à barragem de Jirau. Imagem de Alves e Santos (2022)	17
Figura 7 - Levantamento das CSS medianas anuais na região do reservatório de Jirau a) 2017- b) 2018- e)2019- de)2020- Alves e Santos (2022)	18
Figura 8 - Variação da Carga Sedimentar ao longo do Reservatório nos anos de 2016 a 2021 durante os quatro períodos hidrológicos do ano. Os traços azuis verticais e pontilhados indicam a região da área de estudo. Modificada de Alves e Santos (2022)	19
Figura 9 - Raio Incidente, Refletido e Transmitido. O raio incidente apresenta um ângulo normal. Adaptado de Reynolds (2011).....	21
Figura 10 - Zona de Fresnel de um raio refletido adaptado de Reynolds (2011)	22
Figura 11 - Processo de Difração em um Refletor Truncado adaptado de Reynolds (2011).....	23
Figura 12 - Fontes acústicas classificadas com base na frequência central (Hz). Adaptada e modificada de Kearey et al. (2002).....	25
Figura 13 - Formato do Sinal CHIRP (Adaptado de Verbeek e McGee (1995).....	26
Figura 14 - Diferentes feições sísmicas de vários pontos do Lago Garda, retratando os processos geológicos. (a) Alta refletividade e baixa penetração; (b) Pontos em branco em razão da presença de gás nos sedimentos; (c) Refletores plano-paralelos não deformados; (d) Fácies Hummock; (e) Sedimentos deformados e depósito de sedimentos com ação gravitacional (slump deposit). Gasperini et al. (2020)	28
Figura 15 - Aquisição de Batimetria Monofeixe. Em razão dos princípios físicos da onda acústica, o feixe fica largo em razão do aumento da profundidade. Modificada de SeaBeam (2000),	31
Figura 16 - Modo de Investigação batimétrica multifeixe. Adaptado de SeaBeam (2000).....	31
Figura 17 - Região ensonificada em uma aquisição multifeixe	32
Figura 18 – Movimentos Pitch, Roll e Yaw em relação aos eixos X, Y e Z. b) Ângulos Pitch, Roll e Yaw em uma embarcação. Modificado de SeaBeam (2000)	33
Figura 19 - Representação da sub-bacia do Rio Madeira, mostrando a localização da Usina de Jirau, além dos principais afluentes do Rio Madeira. Sistema de Referência Geográfica: SIRGAS 2000. Fontes dos dados: Instituto Brasileiro de Geologia e Estatística (IBGE) e Banco de Dados do Escoamento Global ou “ <i>Global Runoff Data Center</i> ” (GRDC). (Elaborada pelo autor).	36
Figura 20 - Mapa do SSL na região da bacia de drenagem do rio Madeira. Linhas e as setas pretas representam o SSL transferido das bacias Andinas para o rio Amazonas. A linha preta vertical simboliza a deposição sedimentar no sopé andino. Figura de Vauchel et al. (2017)	39
Figura 21 - Variação da produção sedimentar ao longo do período de Agosto de 2009 a 2010 em Milhões de Toneladas por dia de SSL. Os tracejados são referentes às medidas realizadas nas estações de Porto Velho (PVEL), Fazenda Água Lima (FVAL) e a soma dos dados de Cachuela Esperanza (CACH) e Guayamerin (GUAY). Figura de Vauchel et al. (2017).	39

Figura 22 - a) Área de estudo, traços azuis indicam os perfis batimétricos, já os laranjas indicam as linhas sísmicas. b) Área do Reservatório, quadrado verde escuro indica a área de estudo, traços azuis claros indicam os limites do reservatório e c) Área do reservatório na sub bacia do rio Madeira (coloração verde clara) e em parte da América do Sul Fontes para elaboração dos mapas: The World Wide Repository of River Data e Associated Meta Data (GRDC), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDUSGS, AeroGrid, IGN) (Elaborada pelo autor).....	41
Figura 23 - Unidades Geológicas da Área de Estudo em uma escala de 1:250000. Apesar da presença de sete formações, somente três unidades geológicas estão presentes na área de aquisição de dados. Fonte: Serviço Geológico do Brasil (CPRM).....	43
Figura 24 - Variação da descarga fluvial no período entre 07 de junho de 2021 a 07 de junho de 2022. Os traços vermelhos indicam o período de aquisição de dados, Fontes dos Dados: HIDROWEB ANA	46
Figura 25 - Variação do nível da barragem no período entre 07 de junho de 2021 a 07 de junho de 2022. Os traços vermelhos indicam o nível do reservatório durante o período de aquisição. Fontes dos Dados: HIDROWEB ANA	47
Figura 26 - Mapa de Linhas Batimétricas e Sísmicas. Observa-se no mapa abaixo dos outros dois, a área de estudo situada na região do reservatório de Jirau, cujos limites são representados pelos traços azul claros. O primeiro mapa a) mostra as linhas batimétricas no período posterior da implementação da barragem (02/04/2021) com as regiões do Canal e do Dique demarcadas (b e c), já, na d) temos a imagem do período anterior à implementação da barragem de Jirau (02/03/2004) e a e) indica a área do reservatório. Fonte: a) Landsat 7 d) Landsat 5, e) <i>Earthstar Geomagnetics</i> (Elaborada pelo Autor)	49
Figura 27 - Croqui da vista de cima da embarcação utilizada na aquisição de dados. No caso desse croqui, o ecobatímetro ainda está suspenso, não podendo estar realizando, assim, aquisição de dados. Croqui realizado no software LibreCAD (Elaborada pelo Autor).....	50
Figura 28 - Croqui da vista lateral, embarcação utilizada na aquisição de dados. No caso desse croqui, o ecobatímetro ainda está submerso, assim a aquisição poderia estar sendo desenvolvida. Croqui realizado no software LibreCAD (Elaborada pelo Autor).....	51
Figura 29 - a) Equipamento de Aquisição Batimétrica Multifeixe (ODOM MB1). b) Equipamento acoplado ao suporte basculante . (Fotografia do Autor).....	52
Figura 30 - a) Antenas GNSS Vector usadas na aquisição de dados, b) Equipamento MRU acoplado no Barco, c) Sistema de Aquisição Batimétrica RTA embaixo do Sistema de GNSS Vector. (Elaborada pelo Autor).....	53
Figura 31 - a) Monitor do Computador ligado ao gerenciamento da aquisição batimétrica do ODOM MB1, onde pode se alterar o alcance do sinal entre outras configurações, b) Monitor do notebook com a execução do software Qinsy que permite o georreferenciamento da embarcação e o registro dos dados batimétricos. (Elaborada pelo Autor).....	54
Figura 32 - Diagrama da Aquisição de Dados. Modificado de Teledyne (2013).	55
Figura 33 - a) Equipamento EDGETECH 3100 com transdutor SB216S, foto anterior à aquisição de dados com o próprio na superfície b) Equipamento TOPSIDE da empresa EdgeTech, representado pela maleta amarela, e o notebook em que há a visualização de dados de perfilagem sísmica (Fotografia do Autor).	57
Figura 34 - Localização das regiões cujas áreas são demarcadas pela linha branca. Verifica-se, também, o ponto de referência das linhas em relação à margem. Fonte imagem atual: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGrid, IGN e a comunidade do usuário de SIG ou (“GIS User Community”). Fonte imagem 2006: USGS, Landsat 7	60
Figura 35 - a) Imagem Satélite do Período Pré-Barramento (02 de março de 2004) b) Imagem Satélite do Período Pós-Barramento (02 de abril de 2021).....	65
Figura 36 - a) Modelo batimétrico da região do Canal. Verifica-se a existência de uma variação morfológica nesta região. Os valores encontrados na escala vertical são referentes ao nível do reservatório durante à aquisição de dados (90m).b) Modelo Batimétrico do Canal interpretado. Sistema de coordenadas WGS84 zona 20S.....	67
Figura 37 - Trecho da imagem satélite ilustrativa do período anterior à implementação da barragem (02/03/2004) com a) ausência e b) presença do modelo batimétrico. c) Modelo Batimétrico com a presença da imagem representando o período posterior ao barramento. A seta amarela aponta a presença da ilha.	68

Figura 38 – a) Modelo Morfológico do Dique. Assim como aplicado para o canal, os valores mostrados na figura acima são referentes a elevação das feições em relação ao nível do reservatório no período de aquisição de dados (90m). b) Modelo Batimétrico do Dique interpretado. Sistema de Coordenadas WGS 84 Zona 20S. 69

Figura 39 - Trecho da imagem satélite ilustrativa do período anterior à implementação da barragem (02/03/2004) com a) ausência do modelo batimétrico e b) presença do modelo batimétrico. c) Modelo batimétrico em cima da imagem representativa do período posterior ao barramento (02/04/2021), os diques artificiais são apontados. .. 70

Figura 40 - Localização do Perfil Sísmico (LLCJE) representado pela linha azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). c) Dado Processado com as eco fácies. Perfil é longitudinal ao fluxo do rio Madeira é longitudinal a este perfil. O exagero vertical é de 10x e a direção da navegação é de 53°. A linha vermelha no marco de 8,25m indica o nível mínimo do reservatório, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m. 74

Figura 41 - Localização do Perfil Sísmico (LLCJD) representada pela linha azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021) .Linha LLCJD c) Processada d) Croqui apontando, principalmente as eco fácies presentes. Além disso, verifica-se o fluxo de rio Madeira, o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição de 256°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical O perfil referente à linha 8,25m é o nível mínimo do reservatório, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m 76

Figura 42 - Localização do Perfil Sísmico (LTJCJ2.001) representado pela linha laranja a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). Linha LTJCJ2.001 c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies presentes. Verifica-se o fluxo de rio Madeira, o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição de 142°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que considera-se o marco 0m como relativo ao nível de 90m. 78

Figura 43 - Localização do Perfil Sísmico (LLJCJCD2) representado pela a linha azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). Linha LLJCJCD2 c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies presentes. Verifica-se o fluxo de rio Madeira, o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição de 47°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que considera-se o marco 0m como relativo ao nível de 90m. 80

Figura 44 - Localização do Perfil Sísmico (LLJCJCE1) representado pela linha laranja. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S, b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). Linha LLJCJCE1 c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies presentes. Verifica-se o fluxo de rio Madeira longitudinal a linha do rio Madeira o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 37°. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m..... 82

Figura 45 - Localização do Perfil Sísmico (LTMAC) representado pela linha azul. Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004) Fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). Linha LTMAC c) Processada d) Croqui apresentando as feições e as eco fácies presentes. Verifica-se o fluxo de rio Madeira transversal ao perfil sísmico, também, visualiza-se o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 137°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m..... 84

Figura 46 - Localização do Perfil Sísmico (LLACC) representado pela linha azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). Linha LLACC c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies presentes. Verifica-se o fluxo de rio Madeira longitudinal ao perfil sísmico, também, visualiza-se o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 36°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no

software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m. 86

Figura 47 - Localização do Perfil Sísmico (LLACC.002) representado pela linha azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004) Fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021) Fonte:.. Linha LLACC.002 c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies. Verifica-se o fluxo de rio Madeira longitudinal ao perfil sísmico, também, visualiza-se o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 73°. As linhas de 5, 10m e a de menor nível do reservatório foram criadas pelo autor no software Inkscape, com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que considera-se o marco 0m como relativo ao nível de 90m. 88

Figura 48 - Localização do Perfil Sísmico (LTMAD) representado pela linha azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). Linha LTMAD c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies. Verifica-se o fluxo de rio Madeira transversal (entrando para dentro) à linha do rio Madeira o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 231°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m. 90

Figura 49 - Localização do Perfil Sísmico (LLADD) representado pelo perfil azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021) Fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S. Linha LLADD c) Processada d) Croqui apresentando os refletores e feições. Verifica-se o fluxo de rio Madeira longitudinal a linha do rio Madeira o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 73°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m. 92

Figura 50 - Localização do Perfil Sísmico (LTD4) representado pelo perfil azul. a) Localização da linha na imagem do período anterior à implementação da barragem (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período posterior à implementação da barragem (02/04/2021). Linha LTD4 c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies. Verifica-se o fluxo de rio Madeira transversal a linha do rio Madeira o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 290°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m. 94

Figura 51 - Curvas topobatimétricas dos períodos de maior vazão do rio Madeira do ano de 2014 até 2020. 98

Figura 52 - a) Comparação da curva de 2015 com os horizontes do Leito do rio Madeira e do Refletor de Alta Amplitude obtidos pela linha sísmica. b) Comparação da curva de 2020 com os horizontes do leito do rio Madeira e do Refletor de Alta Amplitude 99

Figura 53 - a) Média do SSC (mg/l) durante o ano de 2021 para área de estudo b) Média de SSC com modelos batimétricos obtidos em cima dos valores de SSC. 100

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Configurações técnicas do Reservatório e da Barragem de Jirau. Dados obtidos de PCE <i>et al.</i> (2005). As informações, em negrito, correspondem às informações alteradas sobre o empreendimento ao longo do tempo como retratado por Bonthius (2013). Onde "N.A" equivale à Nível d'Água e EI é relativa à elevação.....	40
Tabela 2 - Representação do número de linhas longitudinais (L) e transversais (T) para cada região.	60
Tabela 3 - Ecofácies tipificadas. As feições sísmicas foram retiradas de perfis sísmicos longitudinais ao canal do Rio Madeira. N.A Min equivale ao mínimo nível do Reservatório. Elaborada pelo AutoΓ.....	72

Lista de Siglas

A ₁	Amplitude da Onda Refletida	m	metro
A ₂	Amplitude da Onda Transmitida	m ²	Metro ao Quadrado
A ₀	Amplitude da Onda Incidente	M ³	Metros Cúbicos
AC	Área Central	mg	miligramas
AD	Área Dique	MRU	"Motion Reference Unit"
ADCP	"Acoustic Doppler Current Profiler"	ms	milissegundo
AGC	"Automatic Gain Control"	mV	miliVolt
ANA	Agência de Nacional de Águas	N.A	Nível d'Água
CE	"Cachuela Esperanza	OLI	Operacional Land Imager
CHRM	Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira	PV	Porto Velho
CJ	Cachoeira de Jirau	R-	Coeficiente de Reflexão
cm	Centímetros	RO	Estado de Rondônia
EIA/RIMA	Estudo de Impactos Ambientais/ Relatório de Impacto Ambiental	r	raio
ESBR	Energia Sustentável do Brasil	RTA	Aparelho em Tempo Real ou "Real Time Appliance"
FSC	"Fine Sediment Concentration"	SHP	Small Hydroelectric Plant"
GNSS	"Global Navigation Satellite System"	SPECTROSED-	Espectrorradiometria para Monitoramento de Sedimentos em Reservatórios
GY	Guayamerin	SSL	"Suspended Sediment Load"
h	Profundidade do refletor	SSY	"Suspended Sediment Yield"
Hz	Hertz	SVP	"Sound Velocity Profile"
IG	Instituto de Geociências	t	tonelada
IMU-	Unidade de Movimento Inercial ou "Inercial Movement Unit"	T	Coeficiente de Transmissibilidade
kHz	KiloHertz	TIRS-	"Thermal Infrared Sensor"
km	Quilômetros	TM	"Thematic Mapper"
km ²	Quilômetros ao Quadrado	TWT-	Templo Duplo de Trânsito
LHP	"Large Hydroelectric Plant"	UHE	Usina Hidrelétrica

UnB Universidade de Brasília

USGS- Serviço Geológico Americano

V_1 Velocidade da Onda Acústica 1

V_2 Velocidade da Onda Acústica 2

V_p Velocidade da Onda P

V_s Velocidade da Onda

WDC- *“World Commission on Dams”*

Z_1 Impedância do meio 1

Z_2 Impedância do meio 2

λ Comprimento do Raio de Onda Incidente

ρ_1 Densidade do Meio 1

ρ_2 Densidade do Meio 2

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral	4
1.2 Objetivos Específicos	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1 Impactos Advindos da Formação de Reservatórios	5
2.2 Desenvolvimento de Reservatórios na Bacia Amazônica	7
2.3 Impactos da Construção do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira (CRHM)	8
2.3.1 Impacto da Deposição Sedimentar no Rio Madeira.....	9
2.3.2 Impactos da Construção da Barragem de Jirau.....	11
2.4 Metodologias Acústicas Aplicadas em Ambientes Fluviais	19
2.4.1 Metodologias Acústicas Aplicadas em Ambientes Aquáticos.....	20
2.4.1.1 Fontes Acústicas	24
2.4.1.2 Sísmica de Reflexão de Alta Resolução	25
2.4.1.3 Aplicações da Perfilagem Sísmica de Alta Resolução.....	27
2.4.1.4 EcoBatimetria	30
2.4.1.5 Batimetria Multifeixe.....	30
3. ÁREA DE ESTUDO.....	34
3.1 Bacia Hidrográfica Amazônica	34
3.2 Bacia Hidrográfica do Rio Madeira	35
3.2.1 Aspectos Gerais	35
3.2.2 Transporte de Sedimentos em suspensão no Rio Madeira	37
3.3 Reservatório de Jirau	40
3.3.1 Aspectos Geológicos da Área de Estudo	42
3.3.2 Geotectônica	44
3.3.3 Variação Fluvial e Pluvial	46
4. METODOLOGIA.....	48
4.1 Metodologia de Aquisição	48
4.1.1 Aquisição de Dados Batimétricos	51
4.1.2 Aquisição de Dados de Perfilagem Sísmica de Alta Resolução	56
4.2 Metodologia de Processamento.....	57
4.2.1 Processamento de Dados Batimétricos.....	58
4.2.2 Processamento de Dados de Perfilagem Sísmica de Alta Resolução	59

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
5.1 Análise das Imagens de Satélite da Área de Estudo	63
5.2 Modelos Batimétricos e Perfis Sísmicos	65
5.2.1 Caracterização e Interpretação dos Modelos Batimétricos	65
5.2.2 Caracterização e Interpretação dos Perfis Sísmicos	70
5.2.2.1 Classificação de Ecofácies	70
5.2.2.2 Caracterização dos Perfis Sísmicos	73
5.2.2.3 Perfil Linha Longitudinal Cachoeira de Jirau Esquerda (LLCJE)	73
5.2.2.4 Perfil Linha Longitudinal Cachoeira de Jirau Direita (LLCJD)	74
5.2.2.5 Perfil Linha Transversal Jusante Cachoeira de Jirau 2.001 (LTJCJ2.001)	76
5.2.2.6 Perfil Linha Longitudinal Jusante Cachoeira de Jirau Centro Direita 2 (LLJCJD2)	79
5.2.2.7 Perfil Linha Longitudinal Jusante Cachoeira de Jirau Centro Esquerda 1 (LLJCJE1)	80
5.2.2.8 Perfil Linha Transversal Montante Área Central (LTMAC)	83
5.2.2.9 Perfil Linha Longitudinal Área Central Centro (LLACC)	85
5.2.2.10 Perfil Linha Longitudinal Área Central Centro 002 (LLACC.002)	87
5.2.2.11 Perfil Linha Transversal Montante Área Dique (LTMAD)	89
5.2.2.12 Perfil Linha Longitudinal Área Dique Direita (LLADD)	90
5.2.2.13 Perfil Linha Transversal Dique 4 (LTD4)	93
5.3 Discussão dos Resultados Obtidos	95
5.4 Considerações Finais	101
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
7. APÊNDICE	115

1. INTRODUÇÃO

A partir da década de 1960, movimentos ambientais passaram a tratar a “energia renovável” como alternativa às energias ambientalmente impactantes, como por exemplo a energia nuclear e a advinda do carvão. Entretanto, autores como Harjanne e Korkonen (2019) advertem que todas as energias renováveis também apresentam vantagens e desvantagens, como é o caso da energia proveniente das usinas hidrelétricas. Isso porque estudos vêm estimando impactos sociais e ambientais advindos da construção de barragens, como visto nas pesquisas de Doria *et al.* (2020), no rio Madeira, em Rondônia e de Jiang *et al.* (2018) no rio Xingu, no Pará, sub-bacias pertencentes à Bacia Hidrográfica Amazônica.

Dentre as sub-bacias amazônicas, a Bacia Hidrográfica do Rio Madeira, onde está localizado o Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira (CHRM), apresenta o maior índice de vulnerabilidade à construção de barragens em relação às sub-bacias Amazônicas (Latrubesse *et al.*, 2017), devido principalmente à alta capacidade de transporte de sedimentos do Rio Madeira.

Pesquisas vêm sendo realizadas para verificar as alterações na concentração desses sedimentos suspensos. Antes da construção das barragens do CHRM, esse valor era 449 t/ano em média (Vauchel *et al.*, 2017). Após a construção da barragem de Santo Antônio, Latrubesse *et al.* (2017) verificaram redução de 20% dos sedimentos suspensos no rio Madeira, na região de Porto Velho (PV) em Rondônia (RO). Entretanto, Almeida *et al.* (2019) e Rivera *et al.* (2019) não comprovaram a ligação entre essa redução e a construção do CHRM. Neto *et al.* (2018) buscaram identificar padrões de assoreamento e erosão em nove seções transversais em um trecho maior que o reservatório de Jirau, trecho do rio Madeira entre Abunã (RO) e a Barragem de Jirau (PV, RO). Recentemente, Alves e Santos (2022) caracterizou o transporte de sedimentos no reservatório em determinados períodos do ano por meio da técnica de sensoriamento remoto principalmente. Apesar dos resultados obtidos nessas pesquisas, ainda existe a demanda de uma caracterização detalhada das alterações morfológicas do leito fluvial.

Assim, para compreender a magnitude da deposição sedimentar na região, há a necessidade de mapear o fundo do Rio Madeira e imagear a sub-superfície, no caso desta pesquisa o trecho entre a Cachoeira de Jirau (PV, RO) e a Barragem de Jirau (PV, RO), promovendo análises sobre a morfologia e a estratigrafia e identificando possíveis variações decorrentes da construção da barragem.

Para atingir esse objetivo, realizou-se a aquisição de dados com base na metodologia geofísica acústica aplicada em ambientes fluviais, utilizando-se as seguintes fontes acústicas de alta frequência: ecobatímetro multifeixe (170-220kHz) e perfilador de subfundo CHIRP com frequência modulada (2-15kHz). A partir da integração dos dados geofísicos e das imagens de satélite, um modelo da morfologia e da estratigrafia da área de estudo, no trecho próximo à barragem de Jirau, foi realizado.

A hipótese desta pesquisa é a de que, conhecendo a variação do volume do sedimento e identificando as regiões mais vulneráveis ao assoreamento do reservatório de Jirau, será possível gerenciar mais adequadamente a sua vida útil, como também contribuir para a utilização do modelo de investigação adotado nesta pesquisa em estudos futuros semelhantes em outros reservatórios.

O presente trabalho se encontra vinculado ao Programa de Pesquisa e Desenvolvimento P&D da Energia Sustentável do Brasil – ESBR a partir das diretrizes da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL tendo sido criado o grupo de pesquisa do projeto “Espectrorradiometria para Monitoramento de Sedimentos em Reservatórios” - SPECTROSED em 2020. Esse projeto realiza campanhas para caracterização dos sedimentos em suspensão desde 2021. Já no ano de 2022 dados foram adquiridos por meio das técnicas geofísicas com a finalidade de caracterizar o assoreamento decorrente da implementação da UHE Jirau em um trecho do rio Madeira.

Além disso, o presente trabalho foi subsidiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES), auxiliando com bolsa de mestrado.

Esta dissertação compreende sete capítulos. O primeiro capítulo introduz ao leitor o contexto e a justificativa da pesquisa. O segundo capítulo caracteriza o objetivo principal e os objetivos específicos que nortearam o estudo. O terceiro capítulo

apresenta um recorte que abrange trabalhos sobre os impactos da construção de barragens em âmbito global e os impactos da construção do CHRM no rio Madeira, principalmente os relativos ao fluxo de sedimentos. Esse capítulo descreve também os princípios físicos das ondas acústicas e a aplicação de ambas as técnicas geofísicas em ambientes fluviais. O quarto capítulo descreve a área de estudo desta pesquisa. O quinto aborda a metodologia de aquisição e de processamento dos dados. O sexto discute a integração dos dados geofísicos com as imagens satélite, gerando interpretação acerca das características morfológicas e estratigráficas da área de estudo. O sétimo capítulo descreve as considerações finais do estudo, incluindo conclusões, limitações do estudo e sugestões para pesquisas posteriores.

1.1 Objetivo Geral

Estudar o processo de assoreamento dos sedimentos no reservatório de Jirau (RO) por meio da caracterização morfológica e estratigráfica da área utilizando o método sísmico.

1.2 Objetivos Específicos

- a. Caracterizar a morfologia e estratigrafia do rio Madeira, no trecho represado pela formação do reservatório, utilizando métodos geofísicos aquáticos da perfilagem sísmica de alta resolução e da batimetria multifeixe.
- b. Caracterizar as regiões com prováveis deposições sedimentares decorrentes do assoreamento;
- c. Caracterizar o processo de assoreamento integrando dados batimétricos pregressos.
- d. Relacionar os sedimentos assoreados e os sedimentos em suspensão com dados de investigações recentes realizadas por técnicas radiométricas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação do presente trabalho incluiu tópicos sobre os impactos advindos da formação de reservatórios, o desenvolvimento de reservatórios na Bacia Amazônica, os impactos da construção do complexo hidrelétrico do Rio Madeira com enfoque no fluxo de sedimentos e os efeitos medidos após a construção da barragem de Jirau.

Neste item, são também abordados os métodos geofísicos de investigação indireta em ambientes fluviais, sendo esses, os métodos acústicos da sísmica de reflexão de alta resolução e da batimetria multifeixe.

2.1 Impactos Advindos da Formação de Reservatórios

Para compreendermos as consequências do assoreamento de um reservatório, primeiramente, é necessário retratar o conceito de reservatório e quais são os seus propósitos.

Um reservatório é um lago artificial em que a água é armazenada (National Geography, 2023) Pode apresentar diferentes níveis de água e áreas de inundação, tendo, assim, diversas formas e volumes (Ferrari, 2006). São diferentes os propósitos de um reservatório, tais como: retenção de inundações, armazenamento de sedimentos e rejeitos, geração de energia, suprimento de água, recreação, navegação, irrigação e controle de qualidade da água (Ferrari, 2006).

A partir de 1970, principalmente, começou a haver identificação de impactos advindos da construção de reservatórios, como descrito na pesquisa da Comissão Mundial de Barragens ou *World Commission on Dams* (WDC,2000). Além disso, retrata-se que ao longo dos anos, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas para mensurar impactos sociais, ambientais, entre outros, como visto, por exemplo, em Eakin e Brown (1937), WDC (2000) e Annandale (2016).

Recentemente, diversos impactos resultantes de estruturas artificiais como barragens, diques e outras foram descritos em pesquisas realizadas em grandes bacias hidrográficas do mundo. Para exemplificar, citam-se estudos no Rio Yangtzé, na China, por Wang *et al.* (2018), na bacia do rio Mississipi, nos Estados Unidos da América, por Mize *et al.* (2018) e nas sub-bacias amazônicas do rio Madeira e Xingu

por Doria *et al.* (2020) e Jiang *et al.* (2018), respectivamente. Os estudos de Wang *et al.* (2018) e Mize *et al.* (2018), especialmente, identificaram redução de sedimentos em suspensão em ambientes fluviais, devido à construção de estruturas artificiais como as hidrelétricas, ao longo do tempo.

A produção de energia renovável vem sendo estimulada devido à grande demanda por energia elétrica no início desse milênio, causada pelo importante crescimento populacional (UN, 2005). A necessidade de desenvolver barragens com designs que permitam a redução dos impactos ambientais já tinha sido tratada no início deste século, como pode ser visto em WDC (2000). O desenvolvimento dessas barragens deve levar em conta diversos aspectos: o regime hidrológico, a conectividade fluvial, a estrutura do canal, as características da área e a comunidade de espécies.

Nos últimos anos, as Usinas Hidrelétricas Largas ou *Large Hydroelectric Plant* (LHP) nomenclatura de Kuriqi *et al.* (2019), principalmente as que têm grande armazenamento de água, estão dando lugar a hidrelétricas que alteram o fluxo de água de forma minoritária, chamadas de barragens a fio d'água (Kuriqi *et al.* (2019). Além disso, atualmente está, também se priorizando a construção de Pequenas Usinas Hidrelétricas ou "*Small Hydroelectric Plant*" (SHP), as quais demandam menos estudos para a sua implementação (Kuriqi *et al.*, 2019).

Acerca das barragens a fio d'água, essas são consideradas mais sustentáveis, porém, ainda, apresentam impactos ambientais. Kelly Richards *et al.* (2017) apontam que a presença de uma alteração do fluxo do rio em uma barragem a fio d'água, pode desencadear em impactos com relação aos parâmetros físicos, químicos e biológicos desse rio. Além disso, a intensidade do impacto pode estar relacionada ao regime fluvial e pluvial como retratado em Bejarano *et al.* (2019) e Kuriqi *et al.* (2017) e ao design da barragem, conforme Kuriqi *et al.* (2021) e Kelly Richards *et al.* (2017). É importante salientar que esses estudos anteriormente citados tratam dos impactos medidos em pequenas usinas hidrelétricas (Kuriqi *et al.*, 2021; Kelly-Richards *et al.*, 2017).

A caracterização dos impactos de barragens a fio d'água de maior produção energética (maior que 1500W), no período anterior à construção do Complexo

Hidrelétrico do Rio Madeira (CHRM), foi realizada, entre outros autores, por Johnson *et al.* (2005), Rondeau *et al.* (2000) e Ploskey *et al.* (2002). Johnson *et al.* (2005) e Ploskey *et al.* (2002) investigaram as adversidades ligadas ao fluxo dos peixes nas turbinas. Já Rondeau *et al.* (2000) trataram sobre os sedimentos em suspensão no rio Lawrence, no Canadá, em relação ao complexo hidrelétrico. Na pesquisa de Rondeau *et al.* (2000), há a verificação de que não havia a contenção de sedimentos na barragem a fio d'água de Beauharnois, também no Canadá.

Devido à grande complexidade da Bacia Hidrográfica Amazônica e, também, pelo fato de estar localizada em vários países da América do Sul, há a demanda de investigações em relação ao desenvolvimento de reservatórios como descrito por Latrubesse *et al.* (2017).

2.2 Desenvolvimento de Reservatórios na Bacia Amazônica

Na década de 1980, a Bacia Hidrográfica Amazônica era alvo da construção de diversas barragens devido ao seu grande potencial de desenvolvimento energético, como descrito no Plano 2010 da Eletrobrás (1987).

Caso essas barragens fossem construídas, o aproveitamento do potencial energético total levaria à inundação de uma área de 100000 quilômetros quadrados ou km² (Fearnside, 1995). Além disso, essas barragens inundariam cerca de 2,5-2,9% de toda área vegetada (Fearnside, 1995).

Devido às pressões sociais e, também, à indisponibilidade de recursos financeiros, muitas dessas barragens não foram construídas nos anos seguintes (Fearnside, 1995). Relata-se, também, que as barragens como a de Tucuruí (Pará, Brasil), inaugurada em 1984 e Balbina (Amazonas, Brasil), principalmente, inaugurada em 1989 gerou bastantes impactos e controvérsias (Fearnside, 1999; Fearnside, 1989; La Rovere e Mendes, 2000). Apesar das controvérsias ao longo dos anos, Almeida *et al.* (2019), recentemente retrataram que existiam 351 barragens propostas e 158 construídas.

Ressalta-se que, atualmente, barragens a fio d'água foram desenvolvidas com a finalidade de reduzir impactos acerca da inundação de grandes áreas, como pode ser visto em Belo Monte e o CHRM (Freire *et al.*, 2019; PCE, 2005). Em Belo Monte, a

área de inundação de Belo Monte foi reduzida de 1225 km² para 400 km², evitando, principalmente, a inundação de áreas indígenas (Luna, 2010). Já, as usinas do rio Madeira sofreram alterações, já que, inicialmente, havia o desejo de uma única barragem, que seria instalada na cachoeira de Santo Antônio, produzindo 6.854 Mw de potência. A implementação de duas barragens, teve como finalidade limitar os níveis d'água dos reservatórios a níveis próximos à calha fluvial do rio, evitando a inundação de territórios bolivianos (MPRO, 2006 e PCE *et al.*, 2005)

2.3 Impactos da Construção do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira (CRHM)

Anteriormente à construção das barragens, ainda no período do licenciamento ambiental das UHEs de Jirau e Santo Antônio, já havia controvérsias em relação a esse processo. O governo desejava suprir as demandas energéticas, evitando apagões (Switkes, 2008). Já os pesquisadores indagavam sobre os impactos estimados no EIA/RIMA (Tucci, 2007; Carpio, 2008 entre outros).

Após o licenciamento do EIA/RIMA, segundo Bonthius (2013), a barragem de Jirau teve sua localização alterada, da cachoeira de Jirau para a Ilha do Padre, local atual. Outras alterações foram o aumento do número de turbinas de 44 para 50 e a redução de áreas de conservação próximas.

Além disso, Fearnside (2014) alarmava sobre diversos impactos que estariam subestimados no EIA/RIMA da barragem de Jirau, entre eles, a, possível, inundação de regiões bolivianas, concentração de mercúrio, além de impactos a jusante como a erosão fluvial.

Já após a inauguração de ambas as barragens, UHE Santo Antônio (em 2012) e Jirau (em 2016) pesquisas vêm sendo realizadas para estimar os impactos dos reservatórios em diversos âmbitos como o aumento da área de inundação (Cochrane *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2020 e Oliveira *et al.*, 2021), aumento da concentração de mercúrio (Bastos *et al.*, 2020; Pestana *et al.*, 2019), entre outros.

Entre os impactos estimados, as alterações no transporte de sedimentos do rio Madeira em decorrência da implementação da barragem vêm sendo investigadas ao longo do tempo (Carpio, 2008, Tucci, 2007, Latrubesse *et al.*, 2017, Alves e

Santos,2022 entre outros). Essa preocupação é em razão da alta capacidade de transporte de sedimentos do rio Madeira, cerca de 50% (Martinelli *et al.*, 1993) do total transportado pela Bacia Amazônica. Nesta pesquisa, haverá enfoque nesse âmbito.

2.3.1 Impacto da Deposição Sedimentar no Rio Madeira

Anteriormente à caracterização do assoreamento no rio Madeira, retrata-se sobre as pesquisas realizadas acerca da deposição de sedimentos. O assoreamento de reservatório, já vem sendo caracterizado ao longo do tempo como descrito em Eakin & Brown (1937), Mahmood (1987), Ferrari (2006), Annandale (2016). O modelo de deposição de sedimentos, ilustrado na Figura 1,,vem sendo aplicado desde Mahmood (1987).

O modelo proposto retrata que o processo de deposição sedimentar está relacionado ao aumento da área de escoamento em função da formação do reservatório, levando à redução da força de arrasto dos sedimentos, esses sendo depositados à medida que a turbulência e a velocidade são reduzidas. Ainda segundo WDC (2000), os fatores que influenciam o processo de sedimentação são a forma do reservatório, seu tamanho em relação à quantidade de sedimento que entra, a distribuição da granulometria das partículas, flutuações nas contribuições de água e de sedimentos e a forma de operação do reservatório.

Os sedimentos com maior índice granulométrico tendem a ser depositados a montante formando um delta fluvial. Os outros sedimentos são depositados à medida que há o avanço em direção à barragem, de modo que os mais finos são depositados próximos à barragem ou a atravessam, processo que é mostrado na Figura 1.

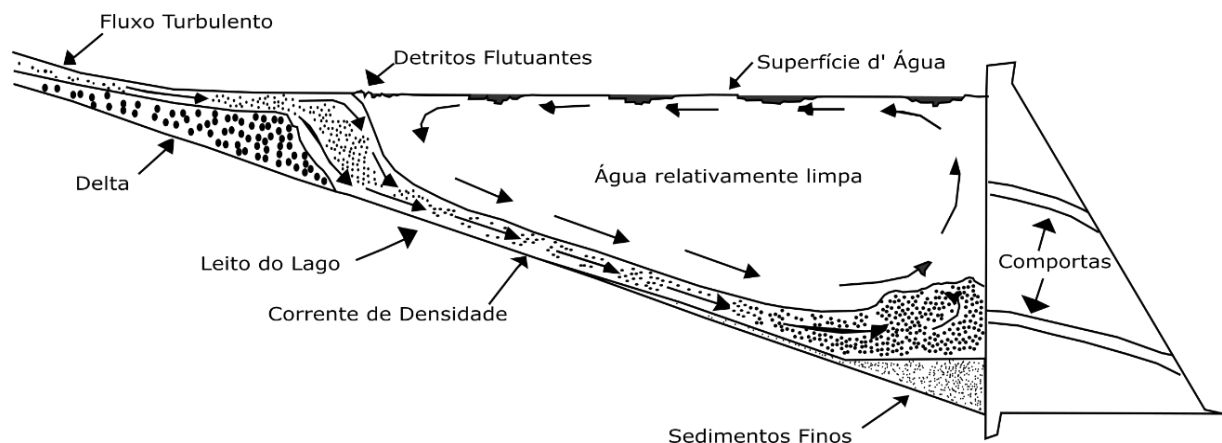


Figura 1 - Deposição de Sedimentos em um Reservatório modificado de Slof (1991).

Em relação às barragens a fio d'água, como reiterado anteriormente, essas, diferentemente, não modificam a calha fluvial de forma significativa. Como explicado, as barragens a fio d'água tendem a não modificar o canal do rio de forma significativa (Rondeau *et al.*, 2000 e Kuriqi *et al.*, 2021). Anteriormente ao desenvolvimento das pesquisas sobre os impactos do CHRM na redução de sedimentos em suspensão, havia poucas pesquisas sobre o impacto das barragens a fio d'água no transporte de sedimentos. Os estudos existentes eram relacionados a barragens de tamanhos diferentes e a ambientes diferentes do encontrado no CHRM. Csiki e Rhoads (2010) caracterizaram a variação geomorfológica presente após a implementação de barragens. Rondeau *et al.* (2000) não identificaram redução de sedimentos em suspensão do canal artificial de Beauharnois no Canadá.

Estudos para mensurar a deposição sedimentar no rio Madeira em decorrência da implementação da barragem de Jirau vêm sendo realizados desde a produção do EIA/RIMA até os dias atuais. Nesta revisão bibliográfica, serão enfatizadas as pesquisas realizadas após implementação da UHE Jirau que tiveram como finalidade estimar a variação dos sedimentos em suspensão. Tucci (2007) e Carpio (2008) alertavam sobre os equívocos do modelo hidrosedimentológico. Segundo eles, havia a necessidade de expandir os estudos para regiões além do trecho de Abunã e Porto Velho (RO). Além disso, Carpio (2008) alertava sobre a possível deposição de 97% dos sedimentos arenosos do rio Madeira. Sobre os impactos a jusante, Bonthius (2013) alertava sobre esses possíveis efeitos e Barbosa *et al.* (2014), Barbosa *et al.*

(2015) e Pinheiro *et al.* (2016) avaliaram os impactos do assoreamento no rio Madeira a jusante da UHE Santo Antônio.

2.3.2 Impactos da Construção da Barragem de Jirau

A partir de 2016, após a inauguração da UHE Jirau, pesquisas vêm sendo realizadas para compreender os possíveis impactos do CHRM no transporte de sedimentos, como pode ser visto em Latrubesse *et al.* (2017), Rivera *et al.* (2019) e Almeida *et al.* (2019).

Latrubesse *et al.* (2017) descreveram que a sub-bacia do Rio Madeira estava sendo bastante afetada pelo desenvolvimento do complexo hidrelétrico, apresentando a maior vulnerabilidade ambiental ao desenvolvimento das barragens entre as outras sub-bacias Amazônicas. Latrubesse *et al.* (2017) mostraram uma perspectiva pessimista futura sobre o impacto das barragens na bacia do rio Madeira. Essa avaliação estava relacionada à existência de oitenta e três barragens planejadas ou construídas, em que 25 estavam localizadas nos tributários Andinos, 56 nos tributários de origem dos Crátons Brasileiros e duas no rio principal (Jirau e Santo Antônio).

Ainda segundo Latrubesse *et al.* (2017), a vulnerabilidade ambiental da bacia do Rio Madeira estaria ligada à alta capacidade de transporte de sedimentos em suspensão, às variações das vazões ao longo do ano e, finalmente, ao impacto consequente da inundação de grandes áreas pelos reservatórios. Em relação ao complexo hidrelétrico (Jirau-Santo Antônio), com base em análises de sensoriamento remoto, no período de 2001 a 2015, houve 20% de redução dos sedimentos em suspensão a jusante da Usina de Santo Antônio após a construção dos reservatórios (Latrubesse *et al.*, 2017).

A Figura 2 ilustra essa redução, indicando as variações na concentração de sedimentos em suspensão no rio Madeira a jusante da barragem de Santo Antônio (8°48'06" S, 63°57'03" W), nos períodos pré e pós barragem. As linhas coloridas representam as médias das concentrações de sedimentos em suspensão. A linha azul é relacionada ao período pré e a construção da barragem, já a vermelha é relativa ao período após o reservatório.

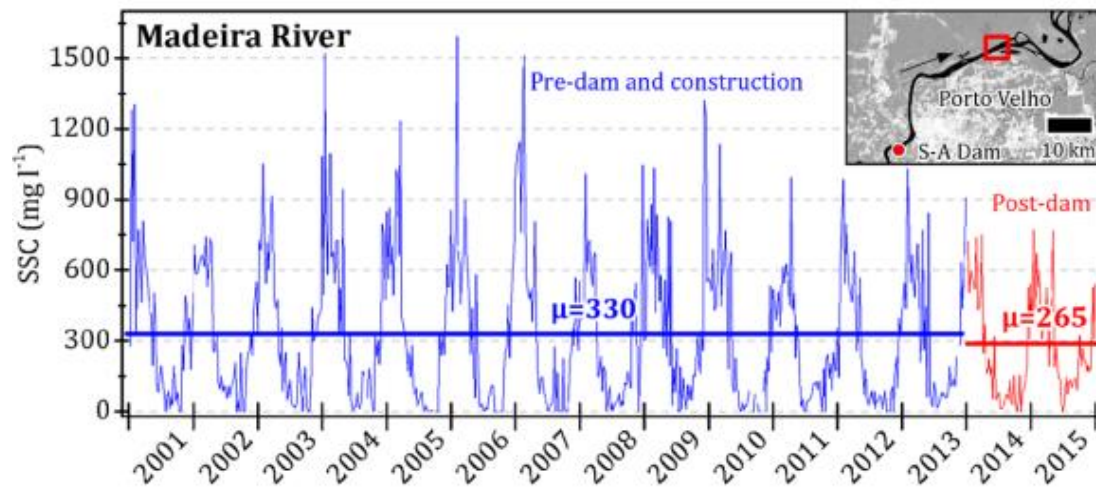


Figura 2 - Variações na concentração de sedimentos em suspensão no rio Madeira a jusante da barragem de Santo Antônio (Latrubesse et al., 2017).

Neto *et al.* (2018) utilizaram batimetrias realizadas pela Energia Sustentável do Brasil (ESBR), concessionária da UHE Jirau, em 14 seções transversais. Os autores compararam dados do período (2014-2017) com o período pré-barragem (2011), com a exceção de um perfil que era de 2010. Eles criaram um mapa que mostra regiões de assoreamento e degradação, em comparação com os dados pré-barramento, com base nas comparações das seções batimétricas (Figura 3). As regiões a jusante da seção RJ03 apresentaram assoreamento. Além disso, foi visto nas seções a jusante da UHE Jirau, com a exceção de uma, que havia um processo erosivo em 2016. Porém as batimetrias de 2017 apontaram interrupção desse processo.

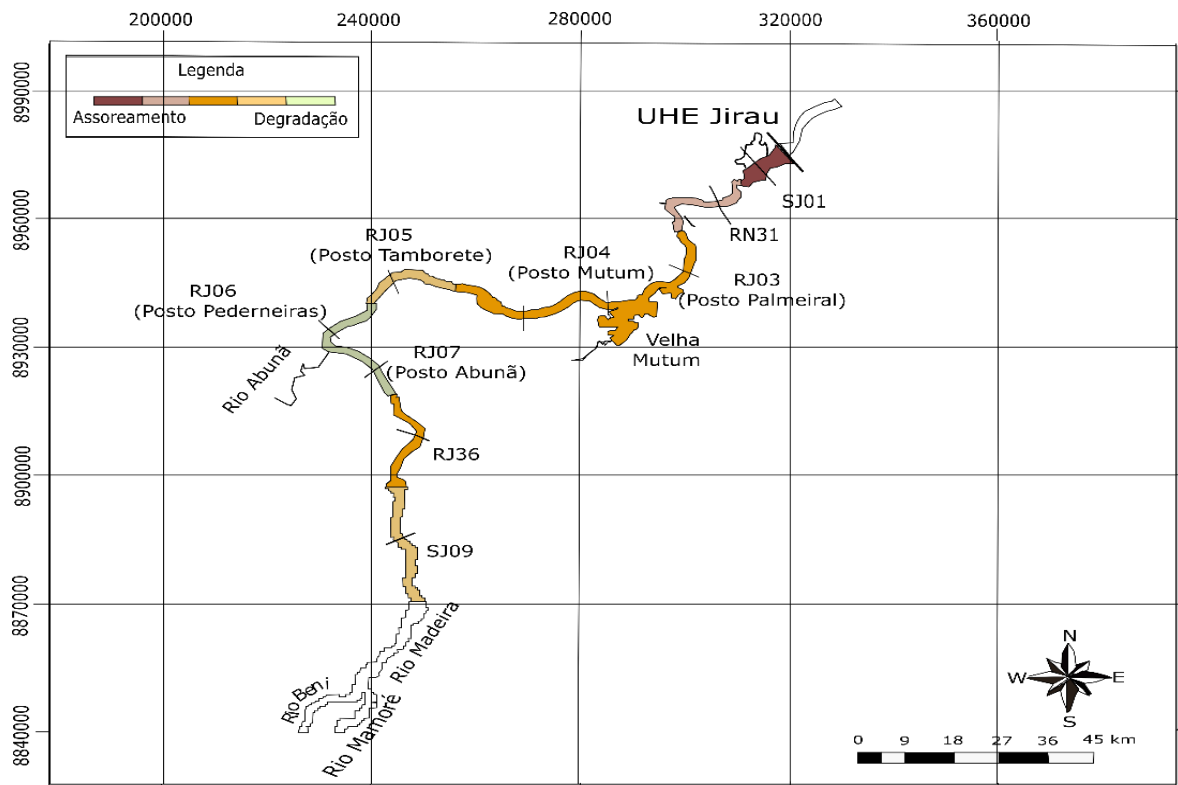


Figura 3 - Mapa de regiões em que há assoreamento e degradação (erosão). Figura adaptada de Neto et al. 2008

Rivera *et al.* (2019) procuraram verificar possíveis mudanças na vazão fluvial e na concentração de sedimentos finos (Argila e Silte) em três estações de medição de água: duas na Bolívia (Cachuela Esperanza (CE) e Guayaramerin (GY)) e uma em PV (RO). A concentração de sedimentos finos foi estudada, uma vez que Espinoza-Villar *et al.* (2013) relataram que 99% dos sedimentos em suspensão, no rio Madeira, eram menores que 64µm. A estação Cachuela Esperanza (CE) é localizada no rio Beni e a 130 km a jusante da foz do próprio com o rio Madre de Dios. Já a estação de Guayaramerin (GY) é localizada no rio Mamoré e a 190 km a jusante da sua confluência com o Guaporé. E a estação Porto Velho (PV) é localizada no rio Madeira e a 6km a jusante da UHE Santo Antônio. A Figura 4 mostra as localizações das estações.

Por meio de testes estatísticos, Rivera *et al.* 2019 verificaram tendência negativa da concentração de sedimentos finos (FSC), após a construção do complexo hidrelétrico. Porém, foi também encontrada tendência negativa na estação CE. Os gráficos mostrados na Figura 5 retratam essas tendências. Essa tendência negativa no rio

Beni, levou a Rivera *et al.* (2019) concluírem que não há evidências para que a redução de sedimentos em suspensão em Porto Velho fosse consequente da construção do complexo, já que o impacto dessas barragens no Rio Beni seria improvável.

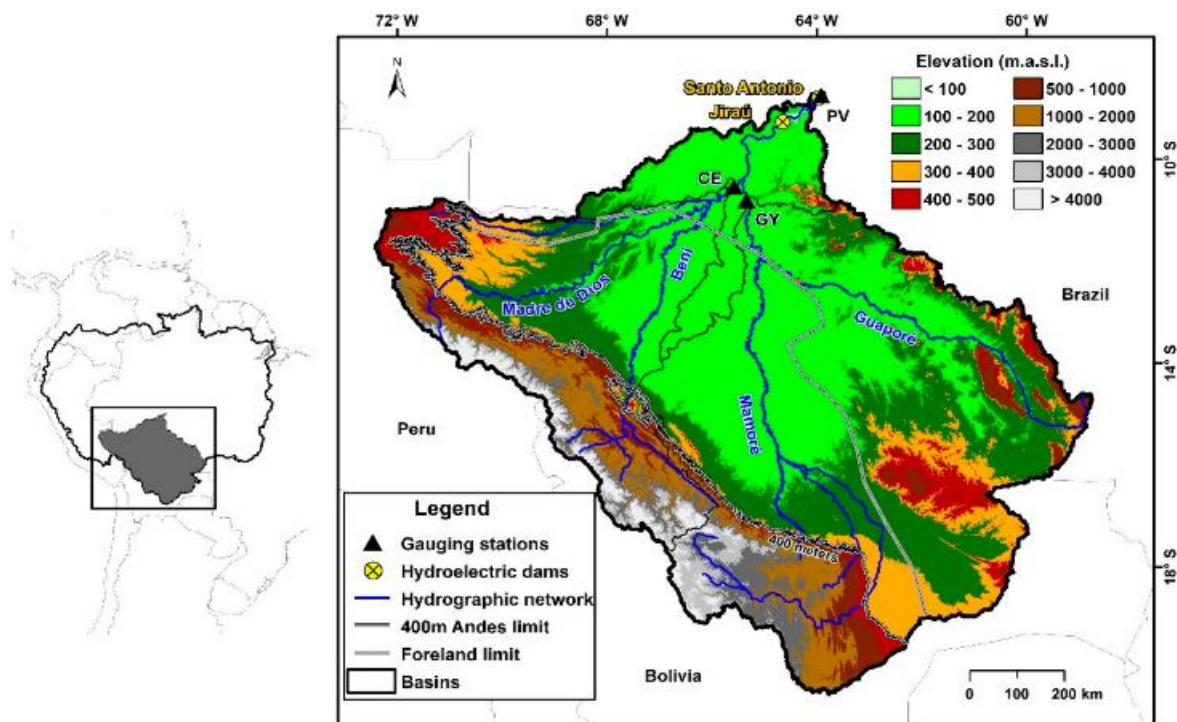


Figura 4 - Alta Bacia do rio Madeira com três estações de medida: CE- Cachuela Esperanza no rio Beni, GY- Guayamérin no rio Mamoré e PV-Porto Velho no rio Madeira. Barragens de Jirau e Santo Antônio representadas pelo círculo amarelo. Principais drenagens fluviais da bacia do rio Madeira e sub-bacias do Madeira. Curva de nível de 400m dos Andes e limite da bacia foreland. Modelo de Elevação do *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. Imagem de Rivera *et al.* (2019)

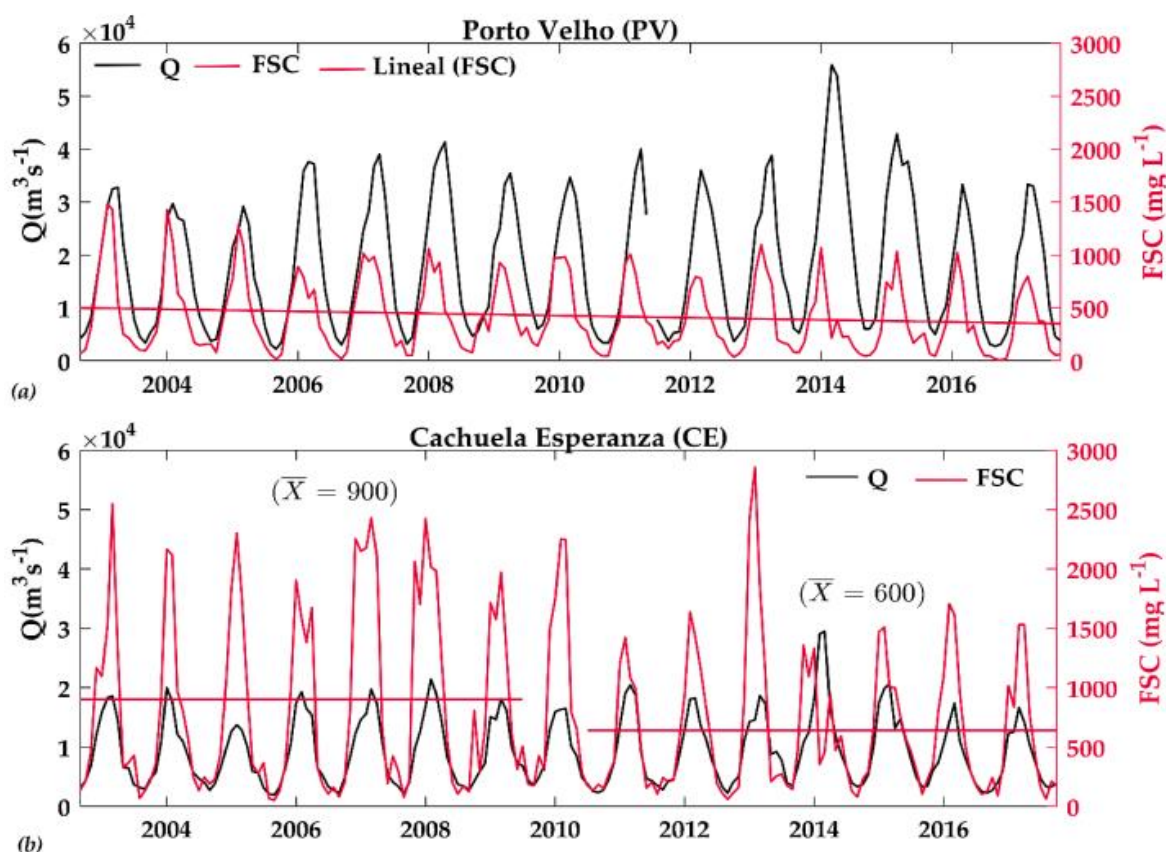


Figura 5 - a) Ilustra a vazão (Q), a concentração de sedimentos finos (FSC) e a regressão linear de FSC na estação de Porto Velho (PV). b) Ilustra, na estação de Cachuela Esperanza (CE), a redução de sedimentos em suspensão de 900 a 600 mg L^{-1} . Imagem de Rivera et al. (2019)

No mesmo ano, Almeida *et al.* (2019), por meio de comparações de testes estatísticos com base em parâmetros físico-químicos da água, além da profundidade, não encontraram alterações significativas no canal principal do rio Madeira. Entretanto, essas alterações foram verificadas nos tributários. Por fim, Almeida *et al.* (2019) retrataram que no canal principal do rio Madeira o tempo de residência da água é bem curto, não havendo redução da turbidez e, conseqüentemente, não havendo depósitos de sedimentos finos.

Em relação aos impactos a jusante do CHRM, Dos Santos *et al.* (2020) fizeram análise, por meio da técnica de sensoriamento remoto (com imagens dos anos de 1984, 1991, 2001, 2011 e 2018), das alterações na morfologia fluvial e na dinâmica de sedimentos em suspensão no trecho de Porto Velho (RO) a Humaitá (AM), Mesmo que tenham encontrado um crescimento de 115% dos bancos de areia, não há

evidência em relação a esse crescimento ter sido consequência da implementação das barragens. Além disso, não foi encontrada uma tendência significativamente negativa da redução de sedimentos em suspensão nas estações de medição de Porto Velho (RO) e de Humaitá (AM).

Sartain (2021) analisou, com base na técnica do sensoriamento remoto, o comportamento dos sedimentos em suspensão na Bacia do Rio Madeira. Esse autor verificou uma diferença na concentração de sedimentos na região do Complexo entre as décadas de 2010 (2010-2019) e 1990 (1990-1999). Apesar da deposição natural encontrada após a confluência dos tributários Beni e Madre de Dios, haveria um assoreamento de $100 \cdot 10^6$ t por ano, e posteriormente o restabelecimento da condição natural na foz do rio Jamari (localizado a 100km do complexo).

A pesquisa de Alves e Santos (2022), referente ao projeto SPECTROSED em que o presente estudo e está inserido - baseou-se em técnicas de sensoriamento remoto, aliadas a análises ópticas, que tinham como finalidade mapear a Concentração de Sedimentos em suspensão (CSS) no reservatório de Jirau.

Alves e Santos (2022) relatam que 8 seções amostrais foram feitas para a compreensão do CSS, além de diversas propriedades, sendo três dessas seções amostrais em regiões de cachoeiras submersas, como a cachoeira de Jirau (Figura 6).

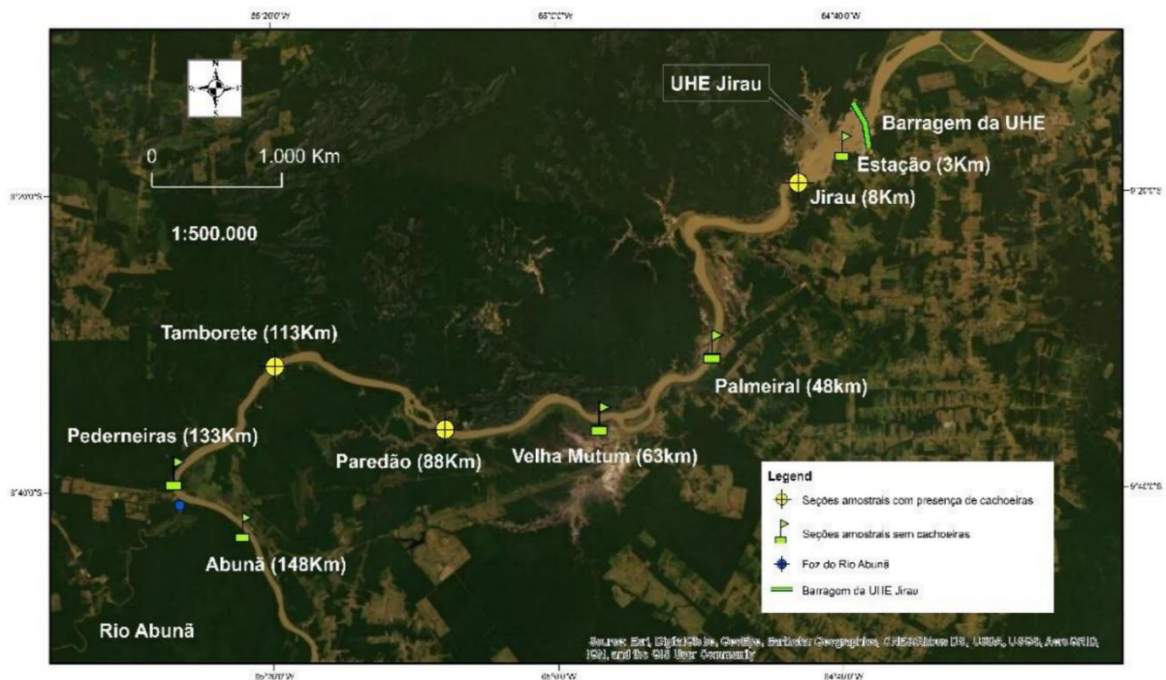


Figura 6 - Localização das Estações onde houve as seções amostrais. A quilometragem indica a distância de determinada estação à barragem de Jirau. Imagem de Alves e Santos (2022)

Além disso, Alves e Santos (2022) verificou a variação do CSS ao longo do reservatório de Jirau com aumentos e reduções dessa curva, como ilustrado na Figura 7. Apesar das modificações ao longo do ano, por meio de testes estatísticos, o autor verificou uma tendência da redução na carga de sedimentos em suspensão ou *Suspended Sediment Load* (SSL) no trecho do reservatório.

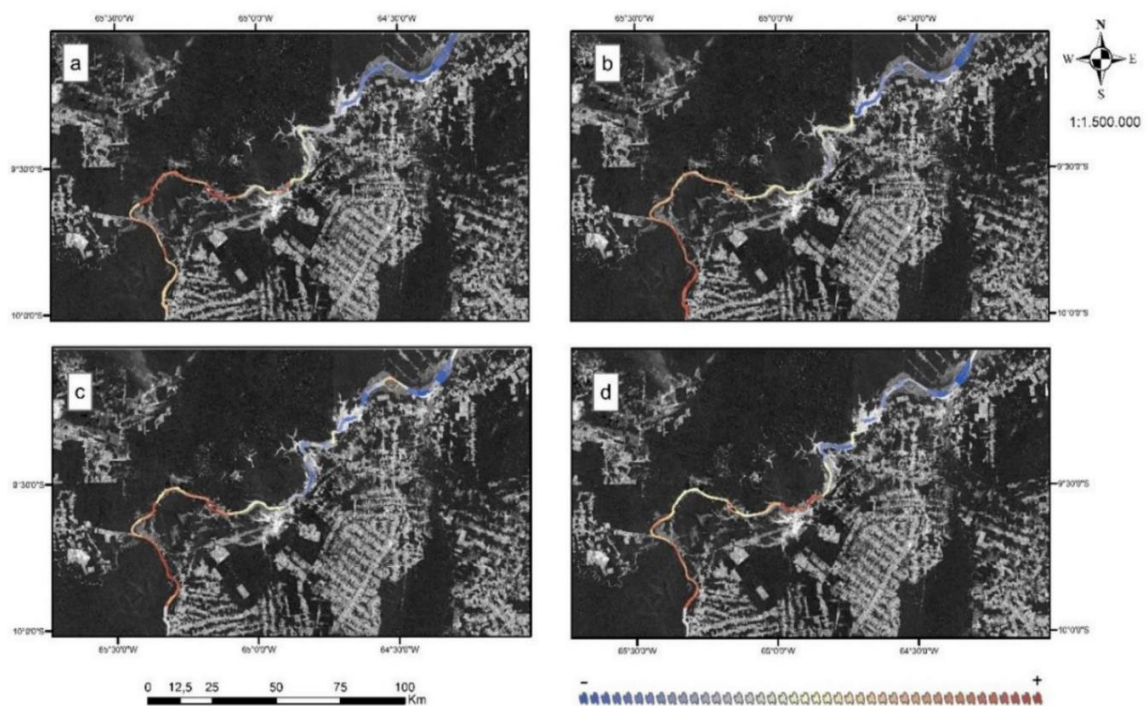


Figura 7 - Levantamento das CSS medianas anuais na região do reservatório de Jirau a) 2017- b) 2018- e)2019-de)2020- Alves e Santos (2022)

Com relação à variação do CSS ao longo do reservatório de Jirau, Alves e Santos (2022) caracterizou a curva de CSS de 2016 a 2021 (Figura 8). O autor estipulou uma curva para cada período hidrológico dos quatro presentes em um ano. O primeiro período é a Enchente, quando as vazões subiam de 10.000 m³ até 20.000 m³ durante os meses de novembro a janeiro. O segundo é a Cheia, com vazões de 36.500m³, atingindo os picos em março e abril. O terceiro é denominado de Vazante, com vazões que decresciam de 20.000m³a 10.000m³, durante os meses de abril e maio. Por fim, durante o período de Seca de agosto a outubro, havia uma queda de 5.000m³, com valores mínimos de 2.000m³.

É importante registrar aqui que o trecho da área de estudo desta pesquisa está presente na Figura 8, delimitado por dois traços verticais pontilhados e azulados. Verifica-se nesse trecho um aumento da CSS na região da Cachoeira de Jirau (CJ), associado a uma ressuspensão de sedimentos, provavelmente. Além disso, identifica-se uma deposição na seção Estação.

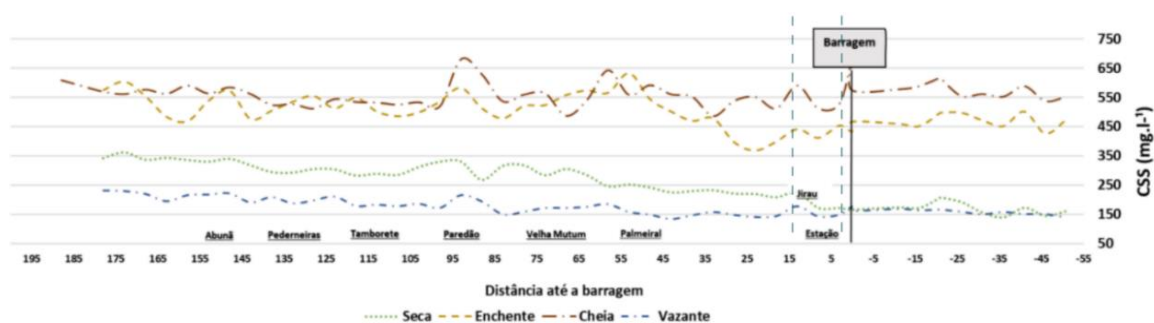


Figura 8 - Variação da Carga Sedimentar ao longo do Reservatório nos anos de 2016 a 2021 durante os quatro períodos hidrológicos do ano. Os traços azuis verticais e pontilhados indicam a região da área de estudo. Modificada de Alves e Santos (2022)

Alves e Santos (2022) também observou um fenômeno de tendência de deposição de sedimentos mais evidenciado nos períodos de Vazante e Seca do que no período de Enchente e Cheia. Nos períodos de Vazante e Seca, a deposição de sedimentos parece ocorrer juntamente à redução do CSS e da vazão. Durante a época da Enchente e Cheia, em que há barramento com maior energia, há a geração de turbulência e uma ressuspensão dos sedimentos depositados. Por fim, o autor, também, verificou um aumento na deposição entre 2020 e 2019 por meio de levantamentos batimétricos no trecho SJ01 mesmo perfil estudado em Neto *et al.* (2018) como visto na Figura 3

Após a descrição dessas pesquisas realizadas nos últimos anos, verifica-se que ainda há incertezas sobre a deposição de sedimentos em suspensão decorrente da implementação da UHE Jirau, demandando, assim, mais investigações, como é o caso deste estudo

2.4 Metodologias Acústicas Aplicadas em Ambientes Fluviais

Nas investigações de caracterização sedimentar de ambientes fluviais, lacustres e de reservatórios, podem ser utilizadas abordagens diretas, indiretas ou ambas (Sotiri *et al.*, 2021)

Dentre essas, temos as abordagens indiretas geofísicas, que investigam e caracterizam, principalmente, o meio submerso (Almeida *et al.*, 2016; Neto *et al.*, 2018; Sotiri *et al.*, 2021), não sendo destrutivas e invasivas (Reynolds, 2011).

Essas abordagens aplicadas em estudos fluviais, lacustres e de reservatórios permitem alcançar uma grande cobertura em um tempo relativamente curto (Buscombe *et al.*, 2014; Reynolds, 2011, Gasperini *et al.*, 2020 e Sotiri *et al.*, 2021).

2.4.1 Metodologias Acústicas Aplicadas em Ambientes Aquáticos

A geofísica apresenta diversas metodologias para compreensão do subterrâneo a partir de suas propriedades físicas. Dentre essas metodologias, há as que trabalham a impedância acústica do meio, chamadas de metodologias acústicas.

As metodologias acústicas se baseiam nos fenômenos relacionados a ondas acústicas ou sísmicas. A impedância acústica é relacionada ao particionamento de ondas acústicas em uma interface, fenômeno relacionado à reflexão e transmissão das ondas acústicas (Reynolds, 2011).

Zoeppritz (1919) *apud* Sheriff e Geldart (1995) desenvolveu equações para simplificar o cálculo da energia refletida e transmitida. Assim, para uma incidência normal (0°) ou com baixo ângulo ($<20^\circ$), a equação das amplitudes das energias em uma interface se daria pela Equação 1, onde A1, A2 e A0 são as amplitudes dos raios refletidos, transmitidos e incidentes respectivamente.

$$A_0 = A_1 + A_2$$

Equação 1

Em relação à Equação 1, as suas soluções são: os coeficientes de reflexão (R) e o coeficiente de Transmissibilidade (T), representados pela Equação 2 e Equação 3, respectivamente. Os parâmetros ρ_1 e ρ_2 , V_1 e V_2 e, conseqüentemente, Z_1 e Z_2 são as densidades, velocidades e impedâncias acústicas do meio 1 e 2. Os intervalos dos coeficientes de R é mostrado na Equação 4. O máximo valor 1 indica alta reflexão (R), diferentemente, o valor -1 é relacionado ao máximo R com uma mudança de fase. Já, quando nulo, esse indica inexistência de reflexão (R) Nesse modelo matemático (Equação 6), para obedecer ao princípio da conservação de energia, a soma dos coeficientes (R e T) deve ser igual a 1. A Figura 9 ilustra o particionamento de energias em ondas refletidas e transmitidas.

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

$$T = \frac{2\rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

$$-1 \ll R \ll 1$$

$$R + T = 1$$

Equação 2

Equação 3

Equação 4

Equação 5

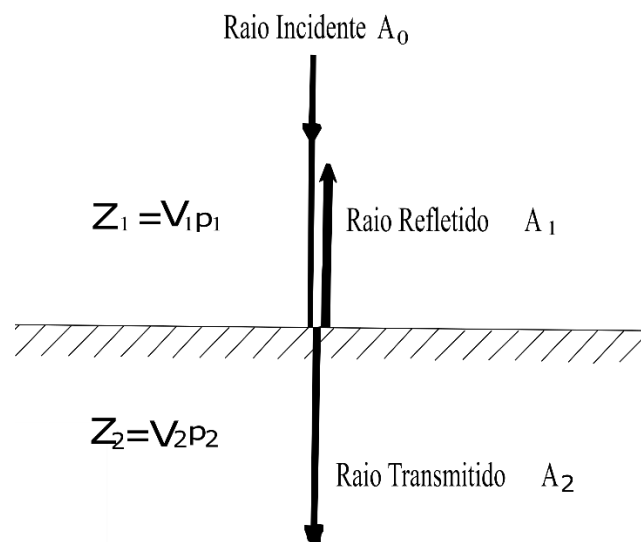


Figura 9 - Raio Incidente, Refletido e Transmitido. O raio incidente apresenta um ângulo normal. Adaptado de Reynolds (2011).

Apesar do ilustrado na Figura 9, a reflexão da onda acústica não é relativa a um ponto, de modo que a reflexão está associada a uma área da superfície, onde o coeficiente R retrata a média da reflexão da área. Essa é definida como Zona de Fresnel, como ilustrado na Figura 10. Quando o raio incidente apresenta inclinação igual a 20° , outras zonas podem estar presentes.

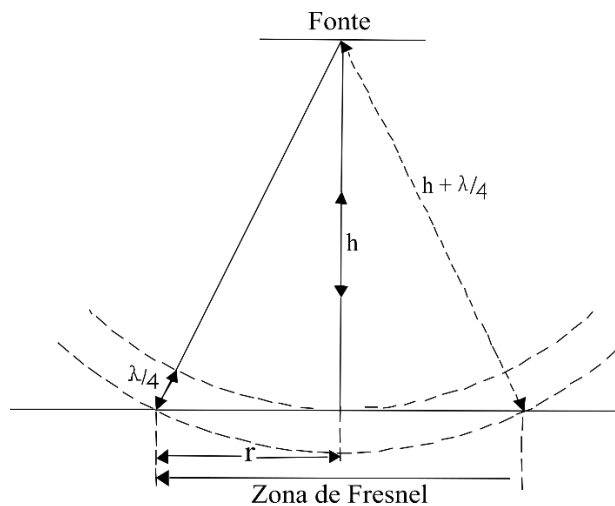


Figura 10 - Zona de Fresnel de um raio refletido adaptado de Reynolds (2011).

Como retratado na Figura 10, o raio (r) dessa zona é diretamente proporcional à profundidade do refletor (h) e ao comprimento de onda do raio incidente (λ). Além disso, como visto na Figura 10, usa-se o quarto do comprimento de onda ao invés de sua metade (Reynolds, 2011), devido ao tempo de trânsito duplo (TWT), aplicado nas metodologias acústicas. O TWT (Equação 7) é relativo ao período entre a incidência e o retorno da onda acústica relacionado a uma reflexão em uma interface de uma onda normal; v é referente à velocidade da onda acústica.

$$\text{TWT} = \frac{2h}{v}$$

Equação 6

Outro fenômeno relacionado à reflexão das ondas é a geração de múltiplas (Sheriff e Geldart, 1995), sendo resultado de eventos que apresentam mais de uma reflexão. Como a amplitude das múltiplas é proporcional ao coeficiente de reflexão (R), e seu valor é baixo para a maioria dos refletores, essas serão diferenciadas, somente em interfaces com alto contraste de impedância acústica (Z). Dentre as múltiplas, Sheriff e Geldart (1995) definem duas categorias de múltiplas de longo trajeto (“*Long-Path*”) e pequeno trajeto (“*Small-Path*”).

As múltiplas (“*Long-Path*”) apresentam tempo de trânsito longo em relação às primeiras reflexões, portanto, aparecendo como um evento distinto em um dado sísmico, mesmo assim pode ser confundida com um evento primário. Já as (“*Small-Path*”) aparecem em um tempo muito curto, adicionado uma cauda à reflexão primária,

esse tipo não é reconhecido distintamente, uma vez que essa altera o formato da onda ao invés de criar outro evento subsequente.

Além dos fenômenos relacionados à reflexão e à transmissão das ondas acústicas em interfaces, ocorre, também, a difração e o espalhamento ou “*Scattering*”.

A difração, segundo Sheriff e Geldart (1995) e Reynolds (2011), ocorre quando uma região apresenta rochas com dimensões próximas ao comprimento da onda incidente (λ) ou de falhas e discordâncias. Nesses casos, as Equações 4 e 5 não são aplicadas, uma vez que o sinal é difratado ao invés de refletido e transmitido. Entretanto, a demonstração da equação associada à difração, vista em Sheriff e Geldart (1995), é complexa e não será aplicada nesta pesquisa.

O objeto difrator como visto na Figura 11 atua como uma fonte secundária, emitindo as ondas de forma esférica. Apesar de o fenômeno ser, normalmente, tratado como reverberação, segundo Reynolds (2011), sua compreensão pode auxiliar na interpretação de dados.

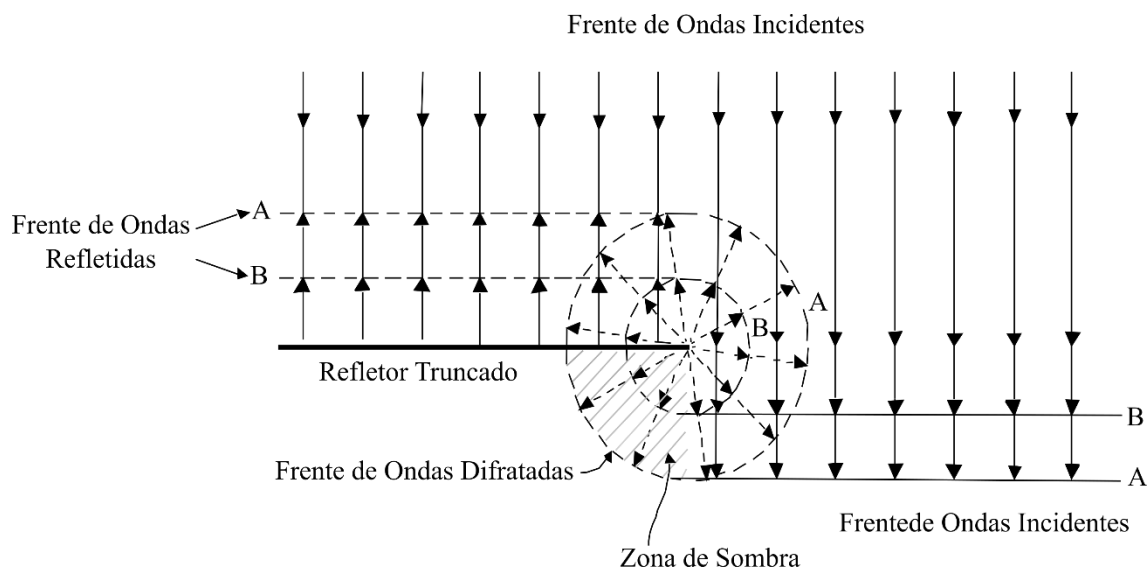


Figura 11 - Processo de Difração em um Refletor Truncado adaptado de Reynolds (2011).

Conforme Sheriff e Geldart (1995) e Reynolds (2011), uma difração apresenta forma hiperbólica. Ainda segundo Sheriff e Geldart (1995), o ponto mais alto da hipérbole, o menor tempo, é relativo à profundidade real dessa feição. O formato hiperbólico da

difração é explicado com base no afastamento do receptor em relação ao ponto em que essa ocorre, de modo que o tempo de trânsito começa a aumentar.

Além disso, a hipérbole em um sinal sísmico de alta resolução tende a indicar um ambiente pontual; a característica pontual dependerá da largura da Zona de Fresnel. Essas feições podem estar associadas, também, a ambientes de coral (Savini *et al.*, 2010) ou tubulações (Li *et al.*, 2022), além de outras feições.

Segundo Reynolds (2011), outro processo importante no particionamento de ondas em uma interface é o espalhamento das ondas ou “wave scattering”, esse, normalmente, retratado como atenuação aparente. Em estudos de sísmica rasa de alta resolução, blocos na ordem de 0,5 a 1m de diâmetro são suficientemente grandes em relação ao comprimento de onda incidente levando ao retro espalhamento, havendo, assim, uma redução na amplitude das ondas refletidas.

2.4.1.1 Fontes Acústicas

Um dos parâmetros importantes para a caracterização de uma onda acústica é a sua frequência central. A escolha de uma fonte a ser aplicada que produza uma onda acústica com determinada frequência é ligada ao objetivo da pesquisa. Essa ligação ocorre, já que a profundidade atingida é inversamente proporcional à frequência, já a resolução é diretamente proporcional (Reynolds, 2011). Isso é evidenciado pelo fato de que a resolução máxima é equivalente a um quarto do comprimento de onda (Reynolds, 2011). Na Figura 12, as fontes acústicas aplicadas em ambientes fluviais são mostradas. Essas fontes apresentam variações em relação ao seus espectros de frequência. Assim, Devido à relação inversa entre a profundidade e a frequência, pode-se atingir profundidades diferentes dependendo da fonte,.

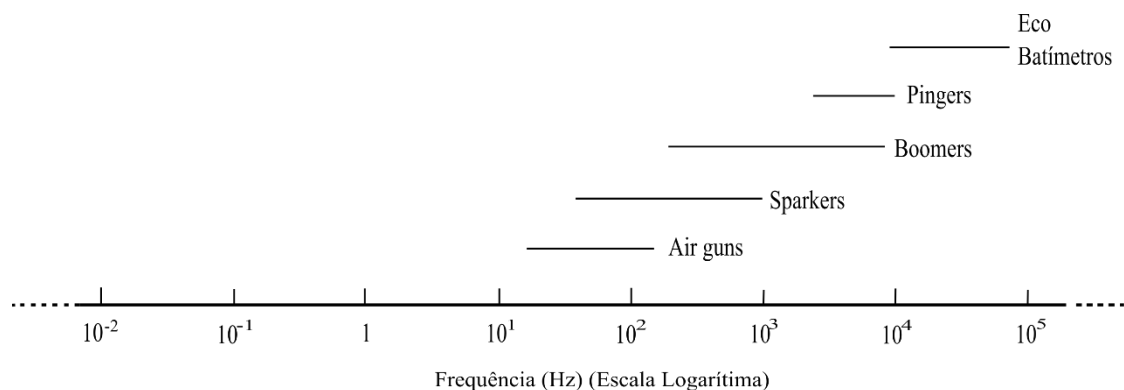


Figura 12 - Fontes acústicas classificadas com base na frequência central (Hz). Adaptada e modificada de Kearey et al. (2002).

McGee (1995B), Verbeek e McGee (1995) classificaram as fontes acústicas aquáticas em ressonantes e impulsivas. As ressonantes consistem em instrumentos piezelétricos que são usados em ecobatímetros, localizadores de peixes e investigadores de sub-fundo, como por exemplo CHIRP, Sonar e Pinger. Já as fontes impulsivas emitem o pulso de forma abrupta, em uma única emissão, produzindo, assim, uma onda acústica de forma semelhante a uma função delta, como por exemplo as fontes Boomer, Sparker, Air Gun e Water Gun. Como já retratado anteriormente, a fonte aplicada nesta pesquisa é a ressonante CHIRP. A frequência ressonante do cristal piezelétrico dá o nome a essas fontes, uma vez que o senoide, formato da onda acústica, é determinado por essa frequência. Os picos dessa onda correspondem à expansão do cristal e os vales são ligados à retração do cristal.

2.4.1.2 Sísmica de Reflexão de Alta Resolução

Dentre as fontes acústicas, há as caracterizadas como Fontes Sísmicas de Alta Resolução ou “*High Resolution Waterborne Sources*”. Essas fontes são relacionadas à perfilagem sísmica de alta resolução, cuja aquisição tem como finalidade a caracterização de ambientes rasos como investigações de drenagem, hidrovias, caracterizações de transportes de sedimentos em ambientes fluviais (Almeida *et al.*, 2016) e estimativa de assoreamentos em reservatórios (Sotiri *et al.*, 2021), além de outras aplicações.

Essas fontes acústicas apresentam baixa energia e emitem frequências mais elevadas, de modo que a aquisição, processamento e a visualização dos dados são

diferentes das aplicações de ambientes petrolíferos (Souza, 2006). Dentre essas fontes tem-se o sparker, boomer e o pinger. Além dessas, há fonte modulada CHIRP (Leblanc *et al.*, 1992).

A fonte CHIRP emite um pulso de frequência modelada (FM) e sua nomenclatura é referente a um Pulso Comprimido Irrradiado de Alta Intensidade ou “Compressed High-Intensity Radiated Pulse), como dito por Leblanc *et al.* (1992). O formato desse sinal é mostrado na Figura 13. As frequências relacionadas a fonte CHIRP são variadas, podendo ser de 0,5kHz a 24kHz como exemplificado em Edgetech (2022).

Dentre as vantagens dessa técnica, há a correlação entre os sinais adquiridos e os recebidos, possibilitando o ganho em relação ao ruído (Leblanc *et al.*, 1992). Outra vantagem é relacionada ao formato Gaussiano da onda produzida, mesmo que essa seja atenuada por sedimentos, já que somente a sua energia seria reduzida, preservando a sua resolução.

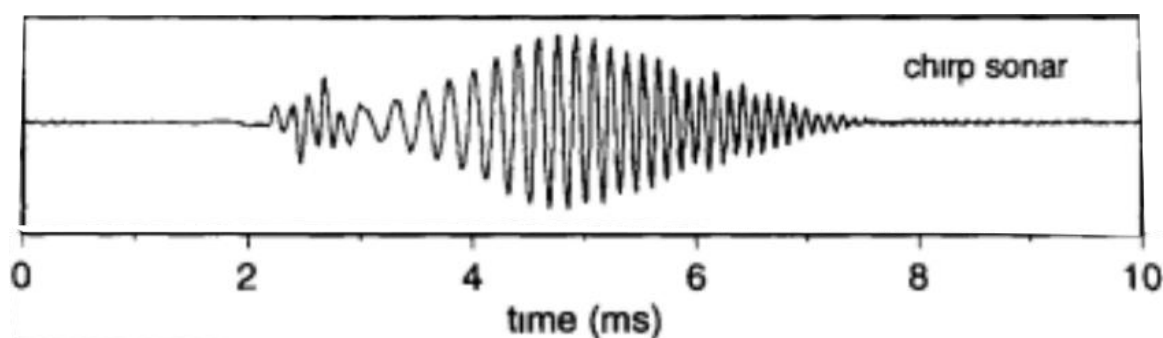


Figura 13 - Formato do Sinal CHIRP (Adaptado de Verbeek e McGee (1995).

Segundo Weit *et al.* (2023), a penetração da onda acústica é relacionada a atenuação das ondas acústicas no substrato (sedimentos finos ou grossos), dependente da refletividade em diversas superfícies, além da potência do equipamento. Segundo o mesmo autor, em regiões com presença de estruturas vegetais e gases biogênicos, verifica-se também a atenuação das ondas acústicas.

O conhecimento da interação das ondas acústicas com os ambientes deposicionais permitem a compreensão da deposição a partir das características dos refletores e das fácies sísmicas. Como verificado em diversas pesquisas como em Gasperini *et al.* (2020), Lafferty *et al.* (2006) e McGlue e Woolery (2022) e Weit *et al.*(2023)

2.4.1.3 Aplicações da Perfilagem Sísmica de Alta Resolução

Gasperini *et al.* (2020) utilizaram um perfilador CHIRP com a finalidade de caracterizar o Lago Garda, localizado na região norte da Itália. O equipamento continha dois transdutores eletroacústicos em paralelo, um com a função de transdutor e outro de receptor. O espectro de frequência aplicado foi de 2 a 7 kHz. Esses autores classificaram as fácies em cinco tipos com base na caracterização do CHIRP (Figura 14).

A Figura 14a apresenta alta reflexão no leito do lago e baixa penetração. Isso se deve ao fato de o CHIRP ter dificuldade em penetrar sedimentos de granulometria grossa (arenitos e cascalhos), ao passo que em argilas e siltes há menos atenuação do sinal.

Já a Figura 14b possui feição com baixa resolução e penetração da onda acústica devido à presença de gases biogênicos diluídos. A concentração desses estaria relacionada a regiões em que há transporte de sedimentos segundo Gasperini *et al.* (2020).

A Figura 14c apresenta feição com uma estratificação sedimentar contínua em camadas sem distúrbios, permitindo assim demarcar as transições entre granulometrias mais finas e as mais grossas. Essa fácies, segundo os autores, estaria relacionada a ambientes sem distúrbios.

Já a Figura 14d mostra depósitos sedimentares denominados de fácies de Hummock, que teriam origem glacial.

A Figura 14e retrata formações sedimentares deformadas, a origem dessa pode estar associada a processos tectônicos, instabilidade gravitacional e migração de gás e de fluidos.

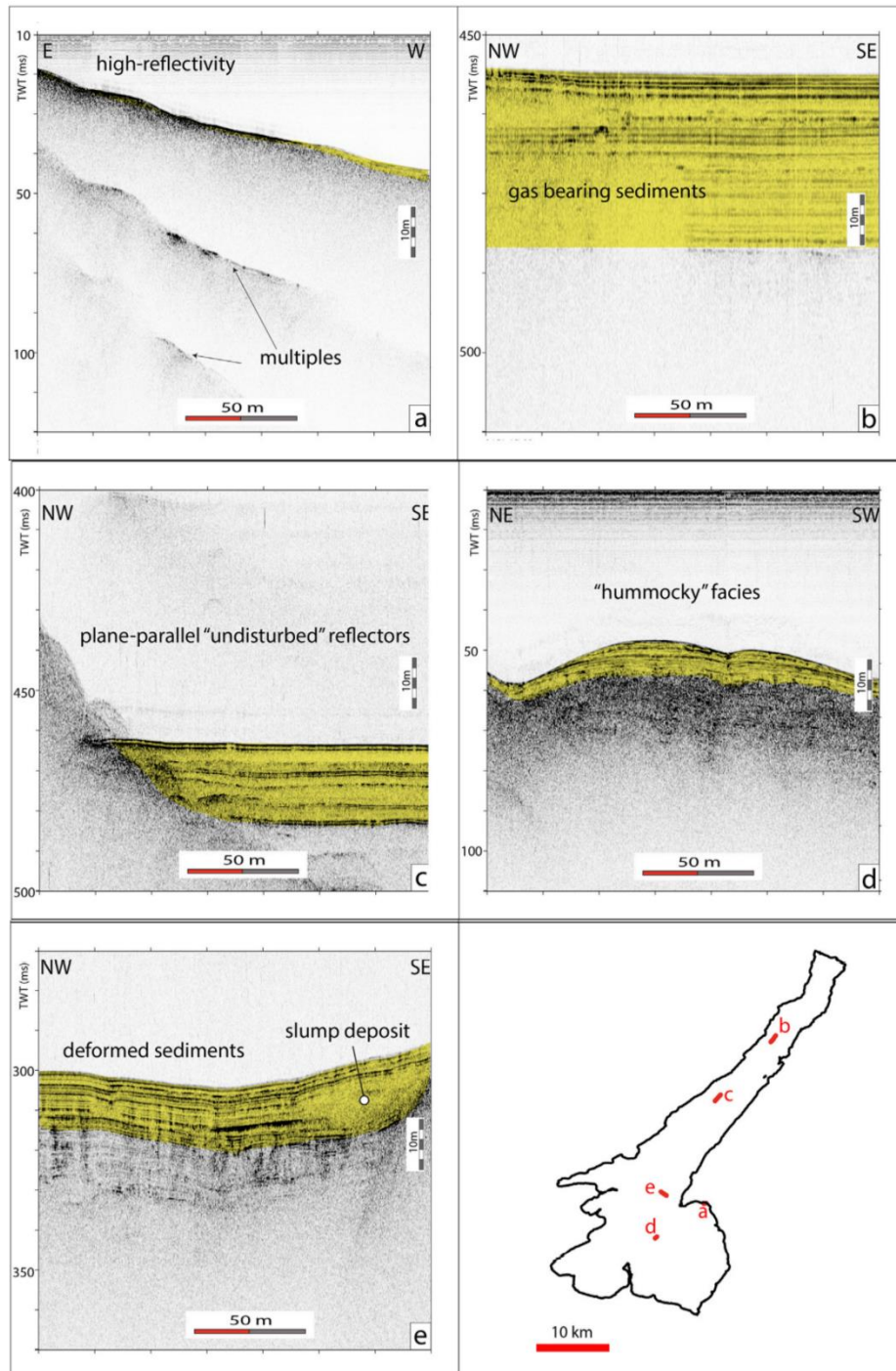


Figura 14 - Diferentes feições sísmicas de vários pontos do Lago Garda, retratando os processos geológicos. (a) Alta refletividade e baixa penetração; (b) Pontos em branco em razão da presença de gás nos sedimentos; (c) Refletores plano-paralelos não deformados; (d) Fácies Hummock; (e) Sedimentos deformados e depósito de sedimentos com ação gravitacional (slump deposit). Gasperini et al. (2020)

Lafferty *et al.* (2006) buscaram caracterizar o desenvolvimento do lago Lower Lough Erne, na Irlanda, após o último período glacial, com base na aplicação do perfilador

CHIRP EdgeTech SB 216S, com espectro aplicado de 2-10kHz, e do equipamento side scan sonar com a aplicação de duas frequências 100 e 500kHz. Os autores correlacionaram:

- Sinais paralelos moderados finos e fracos espessos a ambientes de sedimentos finos
- Sinais fortes irregulares a ambientes de cascalhos
- Sinais fortes suavizados com ondulações a embasamentos rochosos
- Sinais com presença de refletores internos caóticos a cascalhos e sedimentos finos.

McGlue e Woolery (2022) tinham como objetivo caracterizar o Lago Convict na Califórnia, na região de Sierra Nevada, revelando sua natureza morfológica e estratigráfica. As fontes aplicadas foram as acústicas CHIRP com o equipamento Edgetech (0,5-8kHz), com resolução vertical máxima de 12cm o ecobatímetro multifeixe. Houve a caracterização geológica do lago a partir das unidades sísmicas. Além disso, houve a relação entre as fácies sísmicas e os ambientes deposicionais:

- Feições caóticas a depósitos de alta energia
- Feições plano paralelas a ambientes de mais baixa energia

Nittrouer *et al.* (2011) tinham como principal objetivo caracterizar a morfologia fluvial dos últimos cento e sessenta cinco quilômetros do rio Mississippi. As abordagens acústicas aplicadas foram o CHIRP com o EDGETECH 216, o sonar de varredura lateral, a batimetria multifeixe, além de metodologias diretas. A partir dessa integração de metodologias, principalmente da batimetria, foram obtidas fácies referente a dunas arenosas e argilosas, além dos substratos expostos decorrentes de processos erosivos no fundo do rio e da margem fluvial.

Flocks *et al.* (2014) aplicaram o perfilador CHIRP SB-424 da EdgeTech, além da aplicação de metodologias diretas, com a finalidade de caracterizar a espessura e a distribuição dos sedimentos para mapear e quantificar a acumulação de sedimentos nos reservatórios de Brownlee e Hell Canyon (Idaho, EUA). O equipamento utilizado foi o SB-424 da EdgeTech. Para obter a espessura do sedimento acumulado, os

autores se basearam na demarcação de dois horizontes acústicos. O primeiro horizonte era relacionado à interface do leito do reservatório. Já o segundo era relacionado ao sedimento depositado e a rocha basáltica e metamórfica. Por fim, segundo Flocks *et al.* (2014), a aplicação do CHIRP permitiu caracterizar a acumulação de sedimentos em ambos os reservatórios, obtendo-se, assim, a espessura dos sedimentos depositados (lama siltosa e argilosa) após a construção das barragens. Além disso, foi verificado uma baixa deposição em regiões com alta inclinação ($>5^\circ$), porém em regiões planas houve alta deposição.

2.4.1.4 *EcoBatimetria*

As fontes ecobatimétricas apresentam a frequência central mais elevada das fontes mostradas na Figura 12. Têm como principal objetivo a caracterização geomorfológica de leitos fluviais (Ianniruberto *et al.*, 2018), lacustres (Gasperini *et al.*, 2020), marinhos (Rossi *et al.*, 2020) e reservatórios (Sotiri *et al.*, 2021).

Dentre os levantamentos com ecobatímetros, descreve-se a batimetria multifeixe (Barbosa *et al.* 2015; Sotiri *et al.* 2021), a batimetria monofeixe e os ecobatímetros multifrequenciais, que são instrumentos com emissão de mais de uma frequência (Maina *et al.* 2019; Iradukunda e Bwambale, 2021). Nesta pesquisa, foi aplicada a batimetria multifeixe.

2.4.1.5 *Batimetria Multifeixe*

A Batimetria Multifeixe tem a capacidade de com apenas um sinal imagear uma grande área perpendicular à direção da embarcação adquirindo dados com uma boa resolução e precisão (SeaBeam, 2000). Entretanto, essa técnica demanda um alto nível de processamento (Souza, 2006).

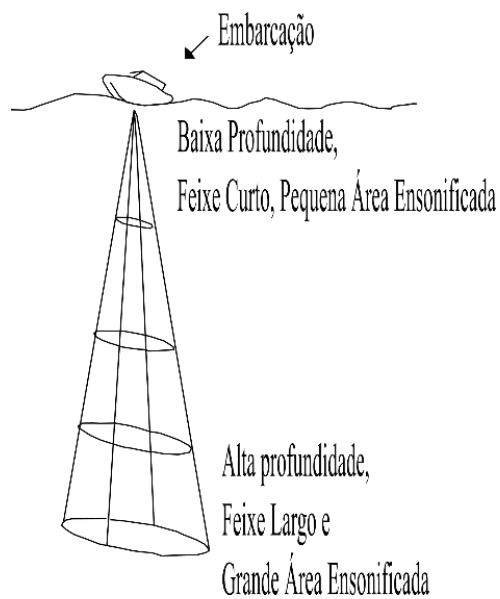


Figura 15 - Aquisição de Batimetria Monofeixe. Em razão dos princípios físicos da onda acústica, o feixe fica largo em razão do aumento da profundidade. Modificada de SeaBeam (2000),

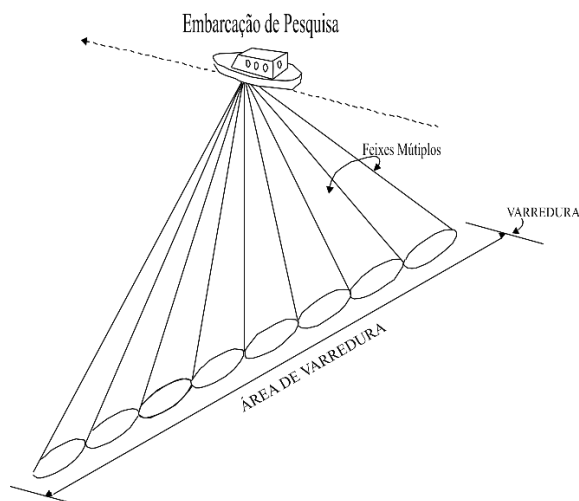


Figura 16 - Modo de Investigação batimétrica multifeixe. Adaptado de SeaBeam (2000).

A aquisição da batimetria multifeixe, devido à incidência oblíqua das ondas acústicas, adquire, majoritariamente dados a partir de ondas retro espalhadas, segundo Jackson & Richardson (2007) *apud* Buscombe *et al.* (2014), O retro espalhamento é dependente do contraste de impedância acústica (Z) e da rugosidade do meio. Além disso, segundo Jackson & Richardson *apud* Buscombe *et al.* (2014), em regiões com diferença de elevação considerável, o sinal retro espalhado não apresenta boa intensidade, criando zonas de sombra no dado batimétrico.

A aquisição multifeixe, como descrito em SeaBeam (2000), apresenta o arranjo de transdutores perpendicular ao de hidrofones com fins de imagear uma determinada região. Essa caracterização é mostrada na Figura 17, de modo que a área da região é diretamente proporcional à profundidade. Esse arranjo perpendicular em L ou T é denominado MillCross (SeaBeam,2000).

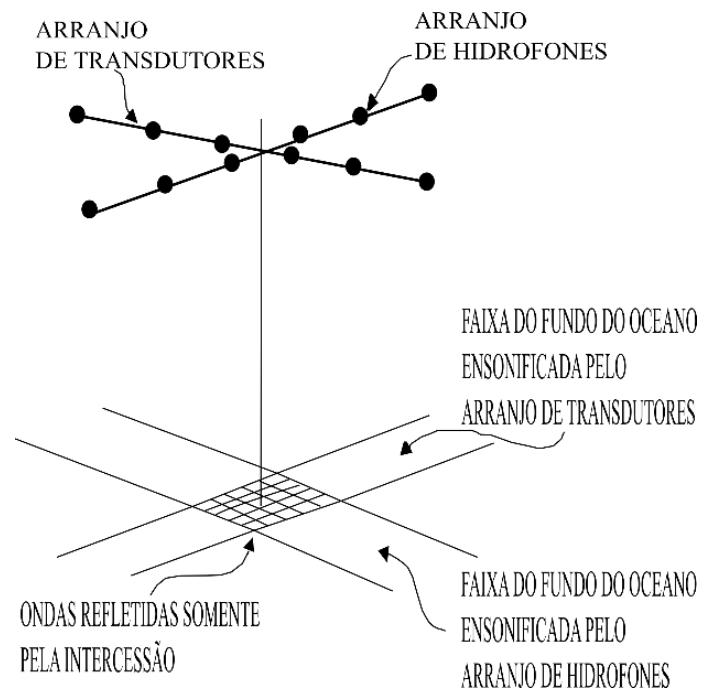


Figura 17 - Região ensonificada em uma aquisição multifeixe

A aquisição de dados ruidosa e o desalinhamento no feixe, segundo Buscombe *et al.* (2014), podem estar associados a mudanças bruscas nos movimentos da embarcação (*pitch*, *roll*, *yaw*), esses mostrados na Figura 18, além de interferências de feixes laterais (“*side lobes*”), retro espalhamento da onda acústica em presença de bolas além de outros fatores. Para amenizar esses ruídos, há necessidade de realizar diversas operações. As operações realizadas nesta pesquisa serão descritas na metodologia.

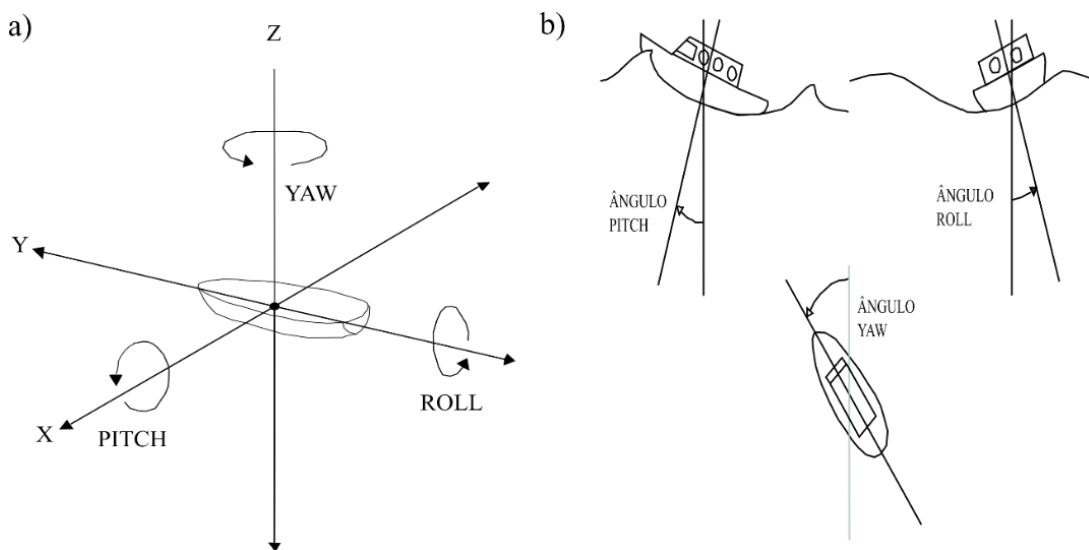


Figura 18 – Movimentos Pitch, Roll e Yaw em relação aos eixos X, Y e Z. b) Ângulos Pitch, Roll e Yaw em uma embarcação. Modificado de SeaBeam (2000)

As aplicações multifeixes em ambientes fluviais podem estar relacionadas à caracterização de dunas como visto em Almeida *et al.* (2016), Lokin *et al.* (2022) e Cisneros *et al.* (2020). Almeida *et al.* (2016) aplicaram a batimetria multifeixe, além da perfilagem sísmica de alta resolução com a fonte boomer, além de metodologias diretas para caracterizar as dunas de tipo barcanóide do rio Amazonas. Lokin *et al.* (2022) utilizaram a batimetria multifeixe e outras metodologias com a finalidade de caracterizar as mudanças das dunas durante condições de baixo fluxo. Já Cisneros *et al.* (2020), com base em dados de batimetria multifeixe, caracterizaram as dunas de rios ao longo do mundo.

Em ambientes lacustres, Gasperini *et al.* (2020) utilizaram batimetria multifeixe para caracterizar as feições do Lago Garda, além disso, Mc Glue e Woolery (2022) aplicaram a batimetria para caracterizar o Lago Convict.

Em ambientes de reservatório, Marineau *et al.* (2020) caracterizaram o assoreamento de um reservatório com base na batimetria multifeixe. Já Sotiri *et al.* (2021) caracterizaram o reservatório de Passaúna, Paraná, Brasil com um equipamento multifeixe, além de um monofeixe multifrequencial e uma fonte do tipo pinger.

3. ÁREA DE ESTUDO

O Reservatório de Jirau, no trecho entre a usina hidrelétrica e a atualmente submersa cachoeira de Jirau, localizado no Rio Madeira, afluente do rio Amazonas, foi o objeto de estudo do presente trabalho.

Nesse contexto, será apresentada uma breve caracterização das Bacias Amazônica e do Rio Madeira, em seus aspectos físicos gerais e acerca do transporte de sedimentos. Serão também apresentadas características geológicas, geomorfológicas, fluviais e pluviais do trecho estudado do reservatório.

3.1 Bacia Hidrográfica Amazônica

A Bacia Hidrográfica Amazônica é localizada entre as latitudes de 5°N e 20°S e está presente em sete países da América do Sul: Brasil (63%), Peru (16%), Bolívia (12%), Colômbia (5,6%), Equador (2,3%), Venezuela (0,6%) e Guiana (0,2%), conforme Molinier *et al.* (1993). Segundo informações do portal HIDROWEB da Agência Nacional de Águas (ANA), a bacia tem uma área de aproximadamente $5,9 \times 10^6$ km². Além disso, a bacia apresenta descarga fluvial de 6300×10^9 m³, por ano em direção aos oceanos (Meade, 1994).

Em relação ao SSL da Bacia Amazônica, Martinez *et al.* (2009) estimaram que a média anual dos sedimentos transportados seria de 754×10^6 t. Já em relação à origem desses sedimentos em suspensão, cerca de 90% seriam de origem andina, mesmo com uma área de apenas 12% da Bacia Hidrográfica, conforme averiguação realizada ao longo do tempo por Gibbs (1967) *apud* Meade (1985), Meade *et al.* (1985) e Filizola e Guyot (2009). Os escudos cristalinos brasileiros e da Guiana produziram apenas 7% desses sedimentos (Filizola e Guyot, 2009).

A importância dos Andes na geração de sedimentos em suspensão pode ser exemplificada quando comparamos as contribuições anuais médias do rio Negro (origem nos escudos cristalinos) e do rio Madeira (origem andina) em termos de descarga fluvial e transporte de sedimentos em suspensão. Apesar de o rio Negro transportar cerca de 13% de toda vazão fluvial como relatado em Molinier *et al.* (1993), a quantidade de sedimentos transportados seria de $7 \cdot 10^6$ t/ano (Filizola e Guyot,

2009). Já o rio Madeira contribuiria com 15% de toda vazão (Filizola e Guyot, 2009), mas com um aporte de 430.10^6 t/ano (Vauchel *et al.*, 2017), ressaltando-se que esse aporte é variável ao longo do ano.

3.2 Bacia Hidrográfica do Rio Madeira

3.2.1 Aspectos Gerais

A Bacia Hidrográfica do Rio Madeira está presente em três países da América do Sul: Bolívia (51% da área), Brasil (41%) e Peru (7%). Está localizada entre as coordenadas 3.36° S a 20.50° S de latitude e 58.53° W a 72.42° W de longitude (Figura 19). Sua área de drenagem é de $1.4 \cdot 10^6$ km², ou seja, cerca de 23% de toda Bacia Hidrográfica Amazônica (Guyot *et al.* 1996; Martinelli *et al.* 1993 e Filizola e Guyot, 2009).

Bacia do Rio Madeira

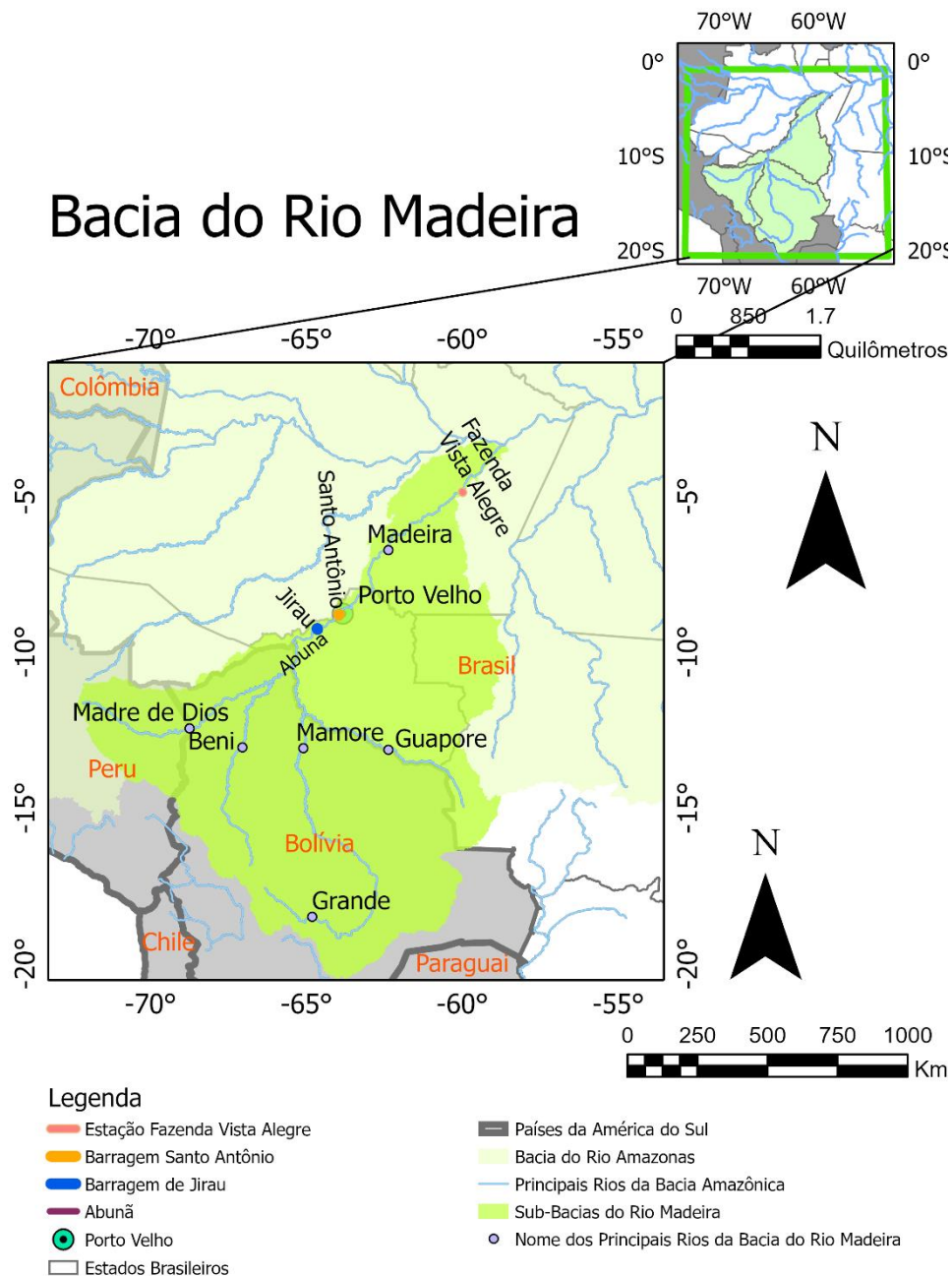


Figura 19 - Representação da sub-bacia do Rio Madeira, mostrando a localização da Usina de Jirau, além dos principais afluentes do Rio Madeira. Sistema de Referência Geográfica: SIRGAS 2000. Fontes dos dados: Instituto Brasileiro de Geologia e Estatística (IBGE) e Banco de Dados do Escoamento Global ou “Global Runoff Data Center” (GRDC). (Elaborada pelo autor).

A Bacia do Rio Madeira apresenta os três domínios morfoestruturais também encontrados na Bacia Hidrográfica Amazônica: a cadeia de montanhas Andina (16% de sua área), os escudos cristalinos brasileiros (33%), a Planície Amazônica (48%), além da formação do Arco Fitzcarrald (3%), segundo Vauchel *et al.* (2017).

De acordo com Guyot (1993), a Cordilheira Andina apresenta relevo alto, podendo chegar até 6.400 metros de altitude. Essa orogênese é desenvolvida em rochas sedimentares, com idades paleozoicas, de modo que esses terrenos sofreram ação tectônica. Guyot (1993) também relata a presença de maciços vulcânicos e sedimentos da época terciária na região. Além disso, Dunne *et al.* (1998) relataram que as camadas sedimentares andinas são finas. Assim, a combinação entre essas regiões de altas declividades e rochas mais vulneráveis à erosão favorecem a incisão de canais, alta erodibilidade e, conseqüentemente, grande produção sedimentar, como visto em Guyot *et al.* (1996) e Vauchel *et al.* (2017).

Já os escudos brasileiros são compostos de rochas pré-cambrianas cristalinas que franqueiam a planície amazônica, apresentando um relevo mais baixo, em relação à cordilheira Andina (Filizola e Guyot, 2009; Dunne *et al.*, 1998), além, também, de apresentarem declividade mais suave, contendo um saprólito mais espesso e com a presença de florestas equatoriais (Filizola e Guyot, 2009; Dunne *et al.*, 1998). Devido a essas características, essa região apresenta baixo índice de erodibilidade e, também, baixa produção sedimentar como evidenciado em diversas pesquisas como as de Martinelli *et al.* (1993), Filizola e Guyot (2009), entre outras.

Segundo Guyot *et al.* (1996), as planícies Amazônicas na sub-bacia do rio Madeira estão presentes em duas regiões. O escudo cristalino brasileiro separa essas duas regiões, agindo como um limiar hidráulico (barragem natural) para os tributários andinos. Depois de o rio Madeira atravessar o escudo, a unidade geomorfológica presente é a planície Amazônica, continuando até a foz com o rio Amazonas (Martinelli *et al.*, 1993; Guyot *et al.*, 1996; Vauchel *et al.*, 2017). Como já, citado, nas regiões de planície há deposição sedimentar e, também, pode haver a ressuspensão de sedimentos, dependendo da dinâmica fluvial (Vauchel *et al.* 2017; Filizola e Guyot, 2009, Dunne *et al.* 1998; Martinelli *et al.*, 1993).

3.2.2 Transporte de Sedimentos em suspensão no Rio Madeira

O transporte de sedimentos em suspensão no Rio Madeira vem sendo caracterizado ao longo do tempo em diversas pesquisas (Meade, 1985; Martinelli *et al.*, 1993; Guyot *et al.*, 1996; Filizola e Guyot, 2009; Espinoza-Villar *et al.*, 2013; Vauchel *et al.*, 2017 e

Föeeger *et al.*, 2022). Os sedimentos em suspensão correspondem a 99% de todos os sedimentos transportados.

As estimativas da Concentração de Sedimentos em suspensão ou “*Suspended Sediment Concentration*” (SSC) e SSL são divergentes nessas pesquisas, como pode ser visto nos valores obtidos por Guyot *et al.* (1996) e Vauchel *et al.* (2017) para Porto Velho (PV). Guyot *et al.* (1996) estimaram que o SSC em PV seria de 483 mg/l^{-1} e o SSL de $306 \cdot 10^6 \text{ t}$. Já Vauchel *et al.* (2017), utilizando dados do projeto Hybam durante o período de 2002 a 2011, estimaram um valor médio de 556 mg/l^{-1} de SSC e de $451 \cdot 10^6 \text{ t/ano}^{-1}$ de SSL. Segundo Vauchel *et al.* (2017), a variação das estimativas acerca dos sedimentos em suspensão identificada nas pesquisas revela uma dependência das medidas com as condições de amostragem (metodologia e frequência).

Em relação à origem dos sedimentos, segundo Vauchel *et al.* (2017), o SSL produzido nos Andes é de $640 \cdot 10^6 \text{ t}$ (30%) ano^{-1} . Já os tributários Andinos: Madre de Dios, Beni e Mamoré produzem $133 \cdot 10^6 \text{ t ano}^{-1}$, $203 \cdot 10^6 \text{ t ano}^{-1}$, $303 \cdot 10^6 \text{ t ano}^{-1}$ respectivamente como pode ser visto na Figura 20.

Como apontado na Figura 20, verifica-se deposição de sedimentos do rio Mamoré no Sopé Andino ou como apontado na figura: “*Piedmont Deposition*”. Em relação à planície de Inundação Boliviana, Vauchel *et al.* 2017 não encontraram uma redução do SSC no rio Beni discordando do proposto por Guyot *et al.* (1996)

Durante a travessia do Escudos Brasileiro, Guyot *et al.* 1996 relatam que durante o trecho de 350 km de Cachuela Esperanza (CE) e Guaramirim (GY) a Porto Velho (PV), há a união dos tributários Beni e Mamoré, formando o Madeira. Além disso, havia a redução de 50 m de atitude, na presença de diversas corredeiras. Outra informação é relacionada ao aporte de rios de baixo SSC nessa região. Essa situação é evidenciada, já que o SSL do rio Guaporé é de $39 \cdot 10^6 \text{ t ano}^{-1}$, valor baixo comparado ao fluxo sedimentar originado dos tributários andinos (Vauchel *et al.*, 2017). Espinoza Villar *et al.* (2013) retratam, também, um baixo aporte de sedimentos do rio Abunã e Jaci Paraná, levando a uma redução de 30% da Concentração de Sedimentos em suspensão de Superfície ou “*Surface Suspended Sediment Concentration*’ (SSSC) durante o período de maior vazão.

Em PV, uma SSL de $449 \cdot 10^6$ foi verificada como pode ser visto na Figura 20. Entre PV e a estação da Fazenda Vista Alegre (FVA) verifica-se uma variação de SSC e SSL durante o ano, possivelmente, relacionada a ressuspensão e deposição de sedimentos, integração de rios com baixo aporte de SSC: Rio Jamari, Ji-Paraná, Marmelos, Aripuanã e a variação da vazão. Por fim, como mostrado na Figura 21, há uma variação anual do SSC, como evidenciado em Martinelli *et al.* (1993) e Espinoza-Villar *et al.* (2013). Durante Novembro e Abril, o SSC é alto, diferentemente, do encontrado entre Maio e Outubro, onde o SSC é baixo (Figura 21).

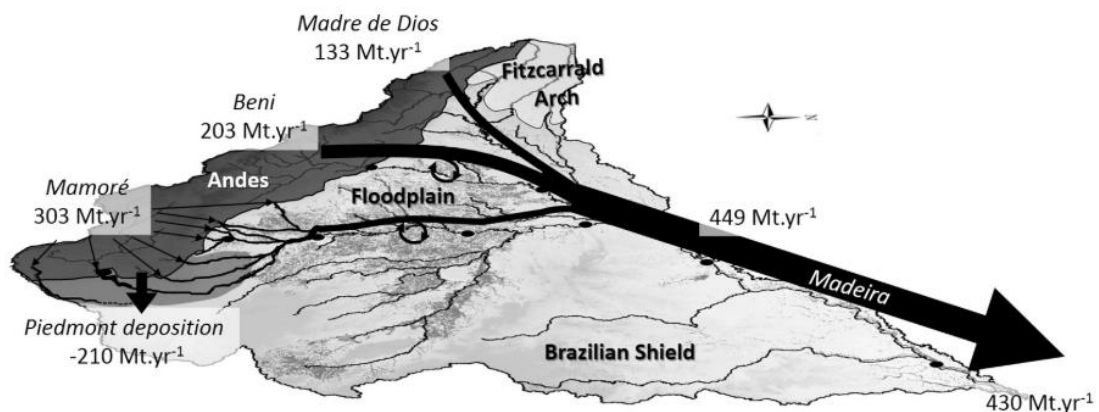


Figura 20 - Mapa do SSL na região da bacia de drenagem do rio Madeira. Linhas e as setas pretas representam o SSL transferido das bacias Andinas para o rio Amazonas. A linha preta vertical simboliza a deposição sedimentar no sopé andino. Figura de Vauchel *et al.* (2017)

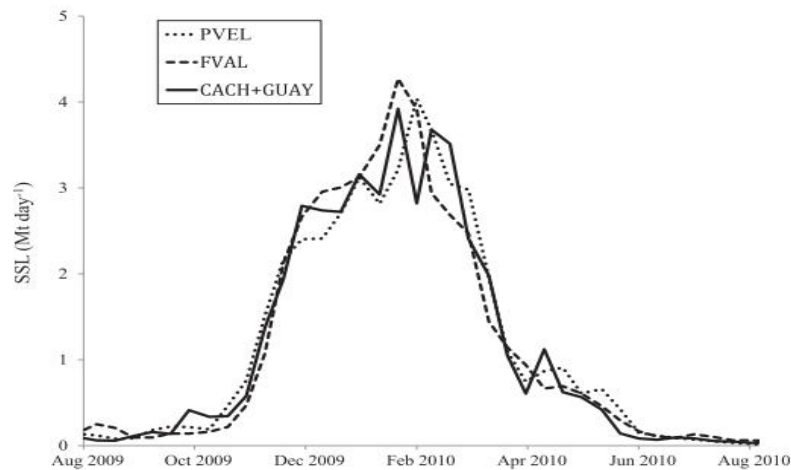


Figura 21 - Variação da produção sedimentar ao longo do período de Agosto de 2009 a 2010 em Milhões de Toneladas por dia de SSL. Os tracejados são referentes às medidas realizadas nas estações de Porto Velho (PVEL), Fazenda Água Lima (FVAL) e a soma dos dados de Cachuela Esperanza (CACH) e Guayamerin (GUAY). Figura de Vauchel *et al.* (2017).

3.3 Reservatório de Jirau

O Reservatório de Jirau está localizado no trecho do rio Madeira de Abunã (RO) à barragem de Jirau, localizada na Ilha do Padre (RO). Na Tabela 1, há informações acerca da barragem de Jirau e seu reservatório.

Tabela 1 - Configurações técnicas do Reservatório e da Barragem de Jirau. Dados obtidos de PCE *et al.* (2005). As informações, em negrito, correspondem às informações alteradas sobre o empreendimento ao longo do tempo como retratado por Bonthius (2013). Onde "N.A" equivale à Nível d'Água e El é relativa à elevação.

Configurações Técnicas	UHE Jirau
N.A Máximo Normal	El. 90,00m
N.A Mínimo Normal	El. 82,50m
N.A Normal Jusante	El.74,23 m

A área de aquisição de dados compreende um trecho do reservatório de Jirau, entre, a região da Cachoeira de Jirau (8,0km da barragem) e uma área com a presença de diques artificiais (2,0km da barragem). Na Figura 22, há a demarcação da área de estudo.

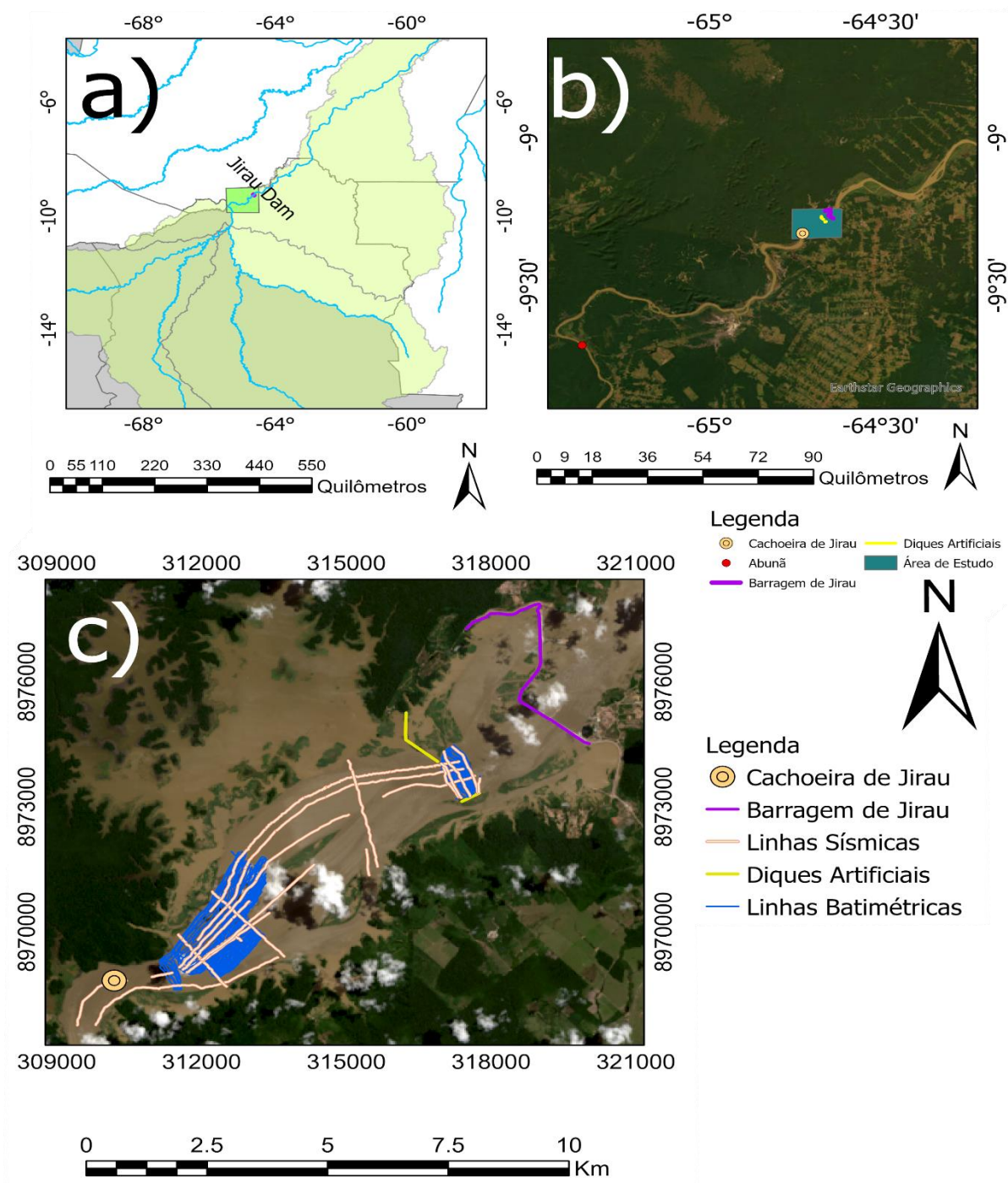
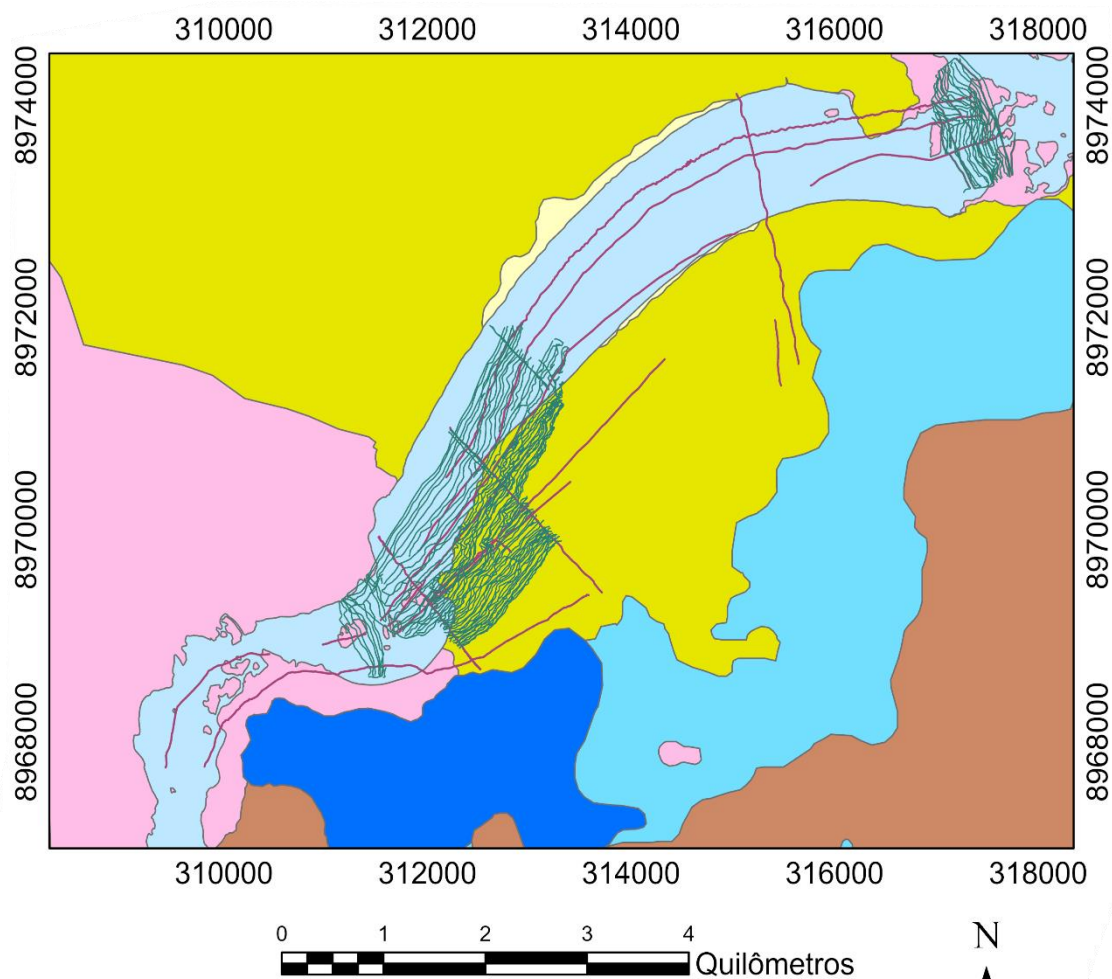


Figura 22 - a) Área de estudo, traços azuis indicam os perfis batimétricos, já os laranjas indicam as linhas sísmicas. b) Área do Reservatório, quadrado verde escuro indica a área de estudo, traços azuis claros indicam os limites do reservatório e c) Área do reservatório na sub bacia do rio Madeira (coloração verde clara) e em parte da América do Sul Fontes para elaboração dos mapas: The World Wide Repository of River Data e Associated Meta Data (GRDC), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDUSGS, AeroGrid, IGN) (Elaborada pelo autor).

3.3.1 Aspectos Geológicos da Área de Estudo

Com base em dados geológicos da Figura 23 e nos relatos de Rizotto *et al.* (2005), Bettencourt *et al.* (2016) e Adamy *et al.* (1990). As formações geológicas presentes na área de aquisição das linhas sísmicas e batimétricas são a formação São Lourenço-Caripunas, Formação Jaci Paraná e Depósitos Aluvionares. As outras unidades geológicas não estão presentes na área de levantamento.



Geologia da Área de Estudo

Unidades Geológicas

- Depósitos Aluvionares
- Formação Palmeiral Conglomerados
- Depósitos Detrito Lateríticos
- Formação Jaci Paraná
- Rio Madeira
- Formação Palmeiral
- Formação São Lourenço-Caripunas

Aquisição de Dados

- Linhas Sísmicas
- Linhas Batimétricas

Figura 23 - Unidades Geológicas da Área de Estudo em uma escala de 1:250000. Apesar da presença de sete formações, somente três unidades geológicas estão presentes na área de aquisição de dados.
Fonte: Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

Como visto na Figura 23, na região da Cachoeira de Jirau e na área dos Diques artificiais aflora a Formação São Lourenço e Caripunas (1.31-1.30Ga). Essa formação está relacionada à província Rondonian-San Ignacio (1.56-1.30Ga) do Cráton Amazônico (Rizotto *et al.*, 2005; Bettencourt *et al.*, 2016)

A formação Jaci Paraná contata a formação São Lourenço e Caripunas. A Jaci Paraná é da época Pleistocênica (Adamy *et al.*, 1990) contendo areias inconsolidadas. Em sua parte superior, essa unidade apresenta a cimentação acima do ambiente arenoso.

Os depósitos aluviais são do período Holocênico (Adamy *et al.*, 1990), formação composta de sedimentos com granulometria variada (Rizotto *et al.*, 2005). Essas feições podem ser encontradas na planície de inundação, entre outros domínios geomorfológicos.

. Essa formação aflora na direção nordeste, segundo Bettencourt *et al.* (2016). Além disso, essa formação apresenta idade MesoProterozóica com suas formações contendo 1.31-1.30 bilhões de anos Ga (Bettencourt *et al.*, 2016; Rizotto *et al.*, 2005) e pertencendo à província do Cráton Amazônico, Rondonian-San Ignacio (1.56-1.30Ga). Segundo a descrição de Rizotto *et al.*(2005), essa formação é aflorada na região da Cachoeira de Jirau. Essa unidade constitui-se de granitos avermelhados com o intenso fraturamento e com a presença de uma tectônica rúptil. Em regiões peleplanizadas, somente o saprólito fica exposto. Em algumas regiões, entretanto, as feições estruturais e texturais estão preservadas.

3.3.2 Geotectônica

Em relação à Geotectônica, a área de estudo é situada na borda sudoeste do Cráton Amazônico. Com a orogênese andina, durante o período do Terciário, essa região foi tectonicamente afetada. Esse processo afetou o substrato onde se encontra o rio Madeira atualmente. O tectonismo afetou as rochas constituintes dessa região, levando a alterações no relevo e na drenagem. (Rizotto *et al.*, 2005).

Assim, a partir da reativação de áreas de fraqueza, na área de estudo do reservatório, aconteceu a reativação do sistema de falhas e fraturas, levando, conseqüentemente,

ao encaixe atual do rio Madeira e à geração de desníveis que são representados pelas corredeiras encontradas no próprio (Rizotto *et al.*, 2005).

Em relação ao domínio geomorfológico, verificam-se duas importantes estruturas no trecho entre a área de estudo e Abunã, segundo os autores citados: o lineamento Itacoatiara-Madre de Dios e a Unidade Morfo Estrutural Alto Guajará Mirim-Porto Velho. O Alto Estrutural Guajará - Mirim apresenta uma grande erosão fluvial com a presença de vales encaixados e encachoeirados (Souza Filho *et al.*, 1999).

Ainda segundo Souza Filho *et al.* (1999) e Igreja e Catique (1997) *apud* Souza Filho *et al.* (1999), o lineamento Itacoatiara-Madre de Dios seria responsável pela direção do rio Madeira de Abunã (AB) a Porto Velho (PV). Além disso, esse lineamento modelaria a direção do rio após Porto Velho, como visto em Hayakawa *et al.* (2010) e Rossetti *et al.* (2014). Essa feição tectônica, também, seria responsável pela assimetria de tributários do Madeira, uma vez que o desenvolvimento de drenagens a direita seria maior em relação ao lado esquerdo do rio, sentido montante jusante.

Planícies de inundação podem estar presentes nos ambientes fluviais, sendo que essas feições ocorrem independentemente do padrão fluvial, como dito por Bridge (2003). Ainda segundo Bridge (2003), essas feições são caracterizadas por serem inundadas em determinadas épocas do ano. Normalmente, essa estrutura tem cerca de vinte vezes a mais de largura do que o canal fluvial. Outra estrutura presente é o *Levee*, feições com formato de cunha (Brierley *et al.* 1997; Cazanacli e Smith, 1998). Essas feições apresentam características como o seu formato, extensão, granulometria diferentes para diversos padrões fluviais. Apesar disso, Bridge (2003) descreve que a espessura média do *Levee* é quatro vezes maior do que a largura do canal. Normalmente, essas feições quando menos desenvolvidas são mais estreitas e constituídas de sedimentos mais grossos, contrastando com as mais desenvolvidas, largas e com sedimentos mais finos.

No trecho do rio Madeira localizado entre Abunã e Porto Velho, o Alto Estrutural Guarajá Mirim-Porto Velho, devido à presença de áreas mais elevadas, conforme Campos e Teixeira (1988) *apud* Souza Filho *et al.* (1999), promoveria a mudança da

direção dos cursos fluviais, menor sinuosidade, estreitando as planícies de inundação e levando a presença de terraços erosivos.

3.3.3 Variação Fluvial e Pluvial

Em relação à variação anual da vazão fluvial no reservatório de Jirau, a Figura 24, com base em dados do período entre 07/06/2021 a 07/06/2022, mostra a variabilidade dessa medida. A vazão fluvial teria seu máximo de Dezembro a Maio e o mínimo no período de Junho a Outubro. Já a precipitação pluvial teria seu máximo nos meses de Outubro a Março e o seu mínimo de Junho a Agosto. Como citado em PCE *et al.* (2005), o nível do reservatório acompanha a vazão fluvial, conforme exemplificado na Figura 25. Outro ponto é que quando se compara a variabilidade das vazões fluviais (m^3/s) e do SSC (mg/l^{-1}) em PV, ao longo do ano, como visto na Figura 24 e Figura 21, respectivamente, verifica-se uma diferença temporal entre os seus picos, como já retratado em Espinoza-Villar *et al.* (2013).

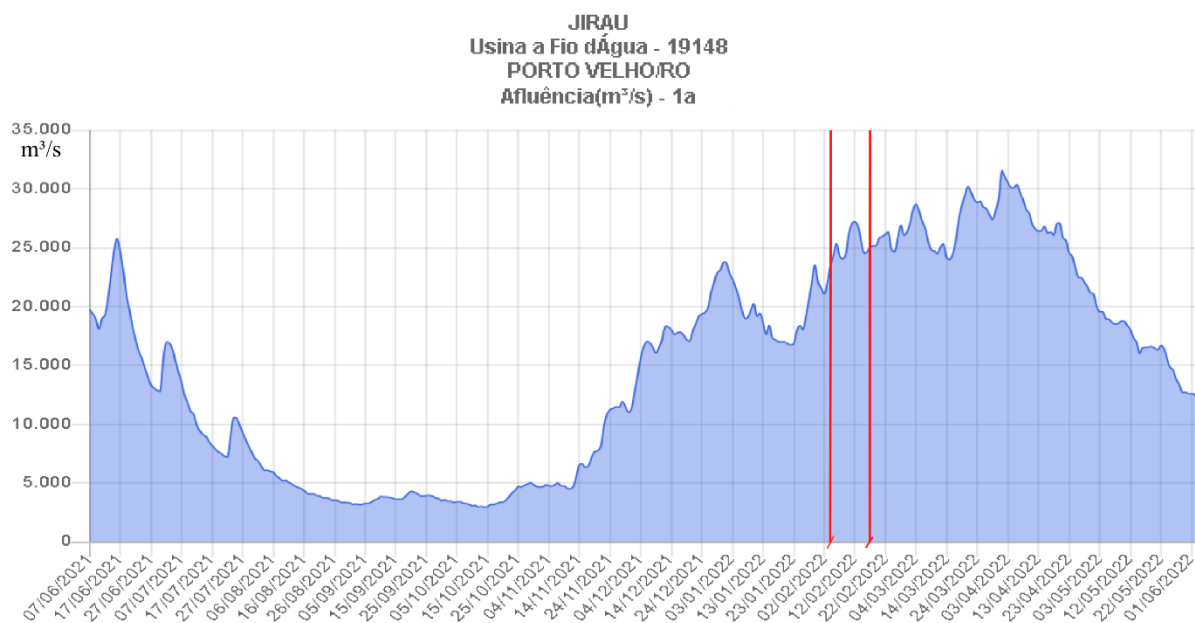


Figura 24 - Variação da descarga fluvial no período entre 07 de junho de 2021 a 07 de junho de 2022. Os traços vermelhos indicam o período de aquisição de dados, Fontes dos Dados: HIDROWEB ANA

UHE JIRAU BARRAMENTO - Fluviométrica - 15340500
PORTO VELHO/RO
Nível(cm) - 1a

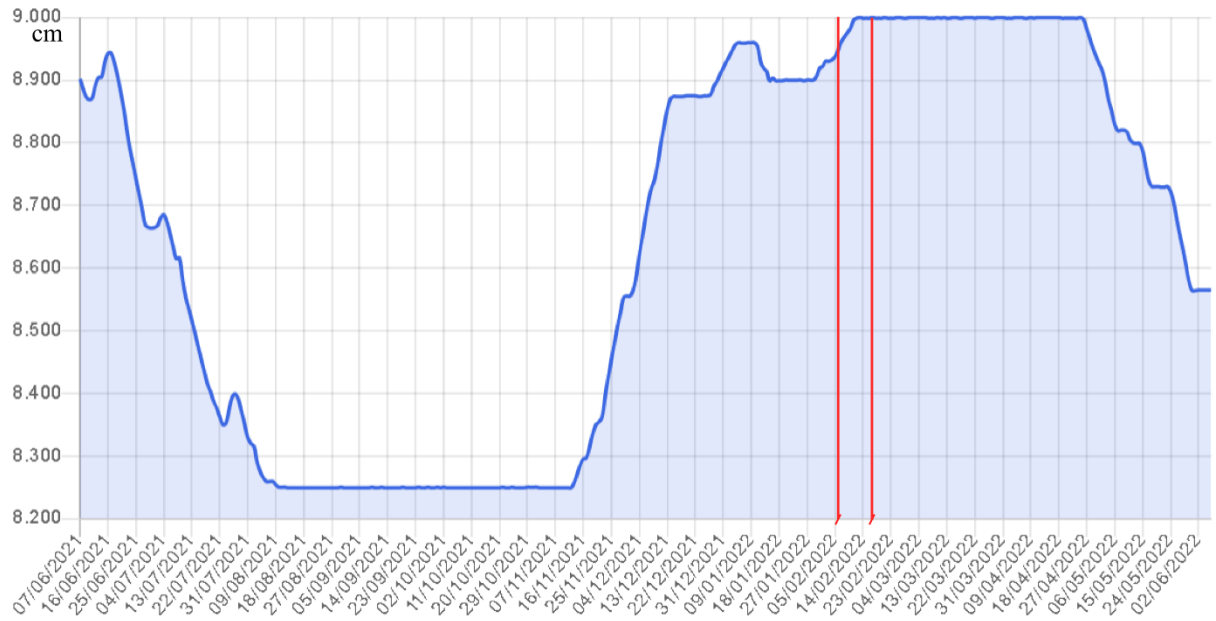


Figura 25 - Variação do nível da barragem no período entre 07 de junho de 2021 a 07 de junho de 2022. Os traços vermelhos indicam o nível do reservatório durante o período de aquisição. Fontes dos Dados: HIDROWEB ANA

4. METODOLOGIA

Nesta seção, serão tratados a aquisição e o processamento dos dados coletados para a pesquisa. A aquisição de dados teve como sua principal finalidade caracterizar o assoreamento no reservatório de Jirau e foi desenvolvida no período de 8 a 15 de fevereiro de 2022.

Os métodos utilizados foram a batimetria multifeixe e a perfilagem sísmica de alta resolução, que foram aplicados simultaneamente, porém, também, separadamente, conforme a necessidade da logística de campo.

4.1 Metodologia de Aquisição

O levantamento de dados da batimetria multifeixe foi realizado principalmente em duas áreas: em região aqui denominada de Canal, localizada a jusante da Cachoeira de Jirau (Figura 26b). A outra região onde ocorreu a aquisição de dados é próxima à Barragem de Jirau, onde foram implementados dois diques fluviais, com a finalidade de direcionar o fluxo do rio Madeira para as turbinas da barragem. Esta região está aqui denominada de Dique (Figura 26c).

A aplicação da técnica batimétrica multifeixe teve como principal finalidade caracterizar a morfologia da área de estudo. Já a aquisição de perfilagem sísmica de alta resolução visou caracterizar as variações geomorfológicas e estratigráficas da região. O levantamento das linhas sísmicas longitudinais foi feito em direção paralela ao fluxo do rio Madeira, já o levantamento das linhas sísmicas transversais foi realizado em direção perpendicular às linhas longitudinais. Na Figura 26, há a localização da aquisição dos dados sísmicos e batimétricos.

Mapa de Linhas

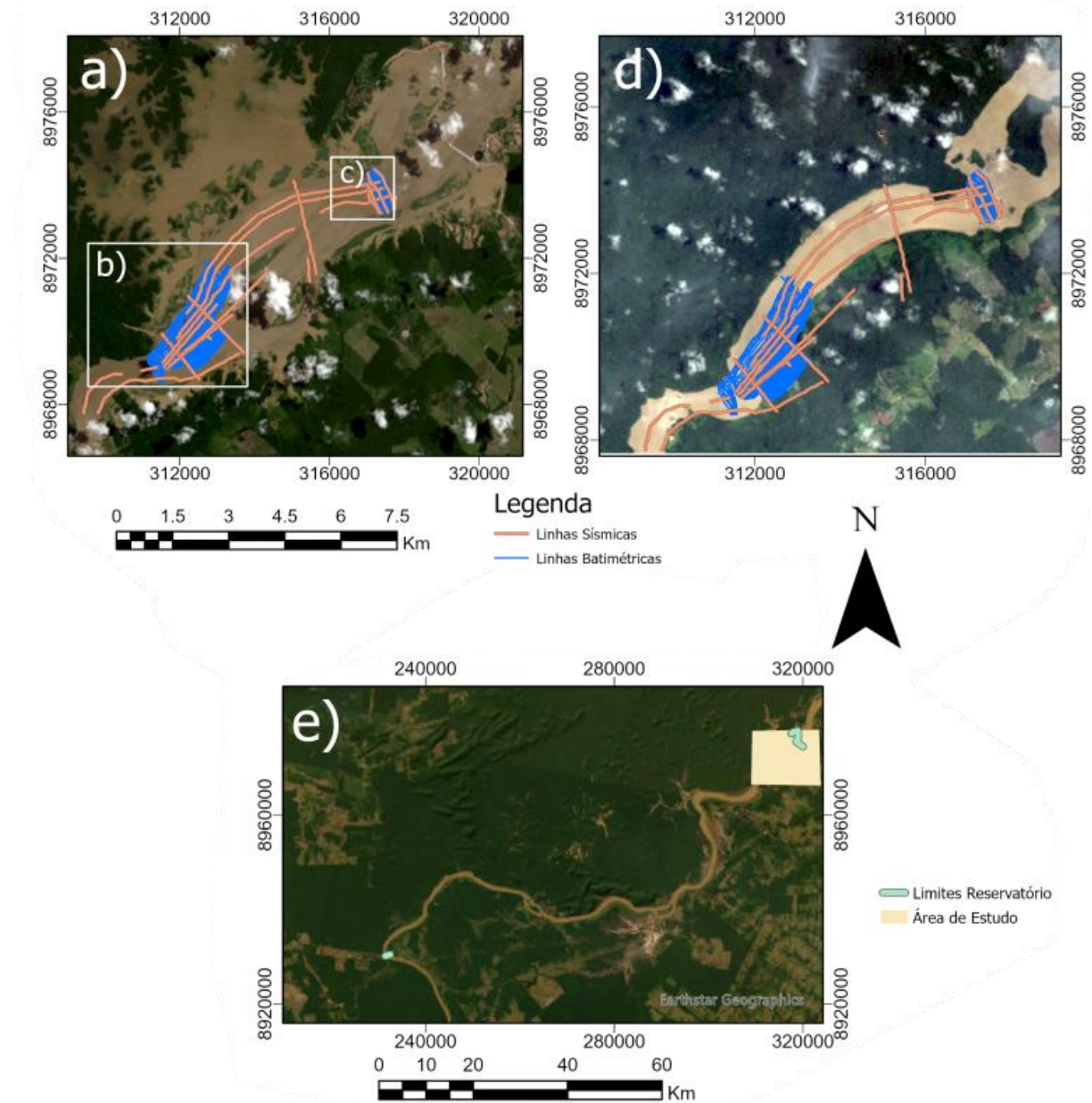


Figura 26 - Mapa de Linhas Batimétricas e Sísmicas. Observa-se no mapa abaixo dos outros dois, a área de estudo situada na região do reservatório de Jirau, cujos limites são representados pelos traços azul claros. O primeiro mapa a) mostra as linhas batimétricas no período posterior da implementação da barragem (02/04/2021) com as regiões do Canal e do Dique demarcadas (b e c), já, na d) temos a imagem do período anterior à implementação da barragem de Jirau (02/03/2004) e a e) indica a área do reservatório. Fonte: a) Landsat 7 d) Landsat 5, e) *Earthstar Geomatics* (Elaborada pelo Autor)

Em relação à embarcação utilizada, a Figura 27 e a Figura 28 apresentam os modelos representativos gerados por meio do software da empresa *LibreCad*, com base em medidas feitas durante a aquisição dos dados. Nesses modelos foram incluídos o ecobatímetro multifeixe e o suporte basculante utilizado, a Unidade de Movimentos Inertes ou “*Inercial Movement Unit (IMU)*” e as antenas que obtinham o sinal de localização com uso de dados do Sistema Global de Navegação por Satélite ou *Global Navigation Satellite System (GNSS)*. O uso desses equipamentos durante a aquisição será detalhado nos próximos parágrafos.

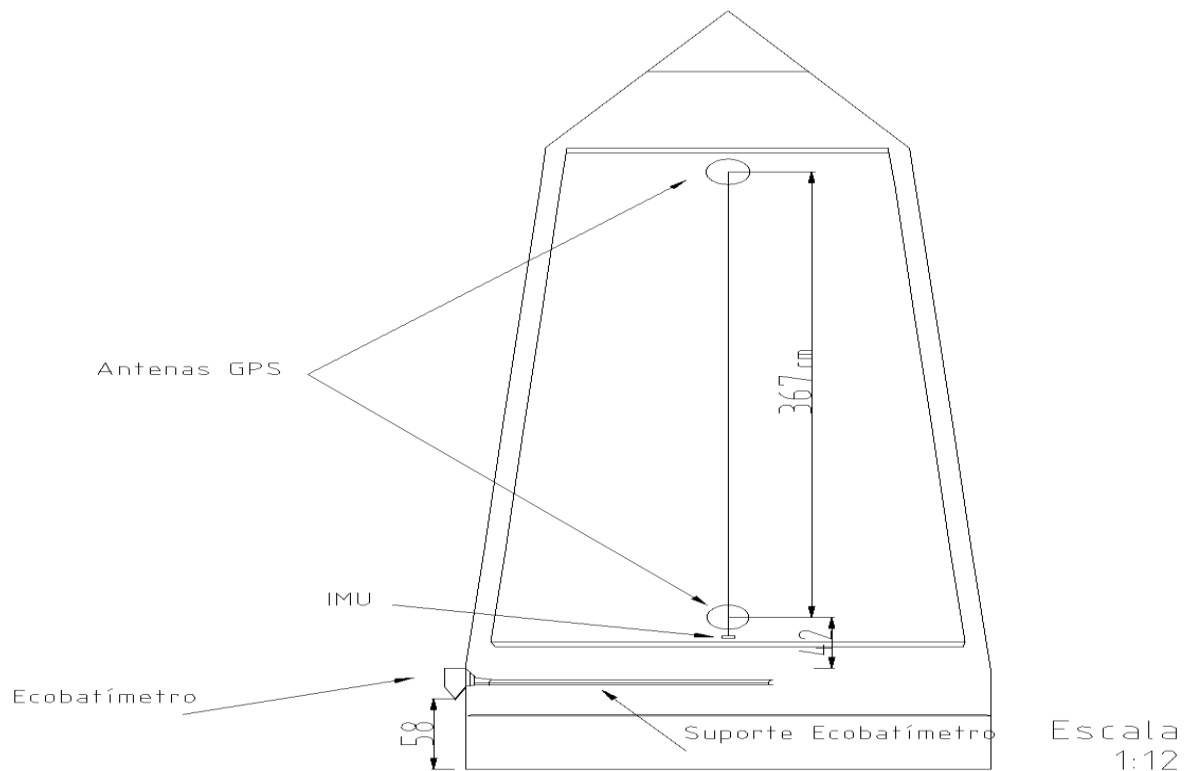


Figura 27 - Croqui da vista de cima da embarcação utilizada na aquisição de dados. No caso desse croqui, o ecobatímetro ainda está suspenso, não podendo estar realizando, assim, aquisição de dados. Croqui realizado no software LibreCAD (Elaborada pelo Autor).

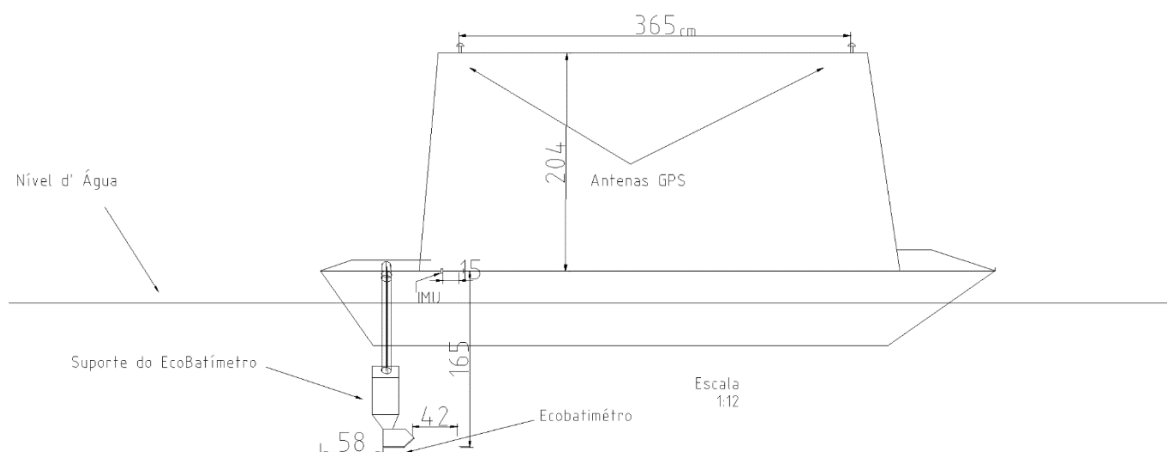


Figura 28 - Croqui da vista lateral, embarcação utilizada na aquisição de dados. No caso desse croqui, o ecobatímetro ainda está submerso, assim a aquisição poderia estar sendo desenvolvida. Croqui realizado no software LibreCAD (Elaborada pelo Autor).

4.1.1 Aquisição de Dados Batimétricos

Como descrito anteriormente, a aquisição de dados batimétricos foi realizada com base na técnica de investigação multifeixe. O levantamento de dados ocorreu durante o período do dia 11 a 15.02.2022.

O equipamento utilizado foi o Odom MB1 da Teledyne, equipamento cedido pela empresa RuralTech de Brasília (Figura 29a), instalado em um suporte basculante (Figura 29b). Algumas características desse equipamento são descritas a seguir, com base no manual do equipamento Teledyne (2013):

- Frequência Operacional (kHz) - 170 a 220 kHz;
- Resolução Máxima ou “*Range Resolution*” - 3,6cm;
- Máxima emissão de Sinais - 60Hz;
- Número de Feixes Batimétricos - 10 a 512;
- Zona de Varredura Máxima - 120°.

Além do ecobatímetro Odom MB1, outros equipamentos foram utilizados e estão citados abaixo:

- Sistema GNSS Vector com duas antenas (Figura 30a);
- Unidade de Movimentos Inerciais ou “*Inercial Motion Unit*” (IMU) (Figura 30b);

- Sistema denominado Aparelho em Tempo Real ou “*Real Time Appliance*” (RTA) pertencente ao sonar Odom MB1 da Teledyne. (Figura 30c);
- Sistema acoplado gerenciador das antenas GNSS (Figura 30c);
- Sonda da Velocidade do Som ou “*Sound Velocity Probe*” (SVP) denominada, também, de Digibar da marca Teledyne.

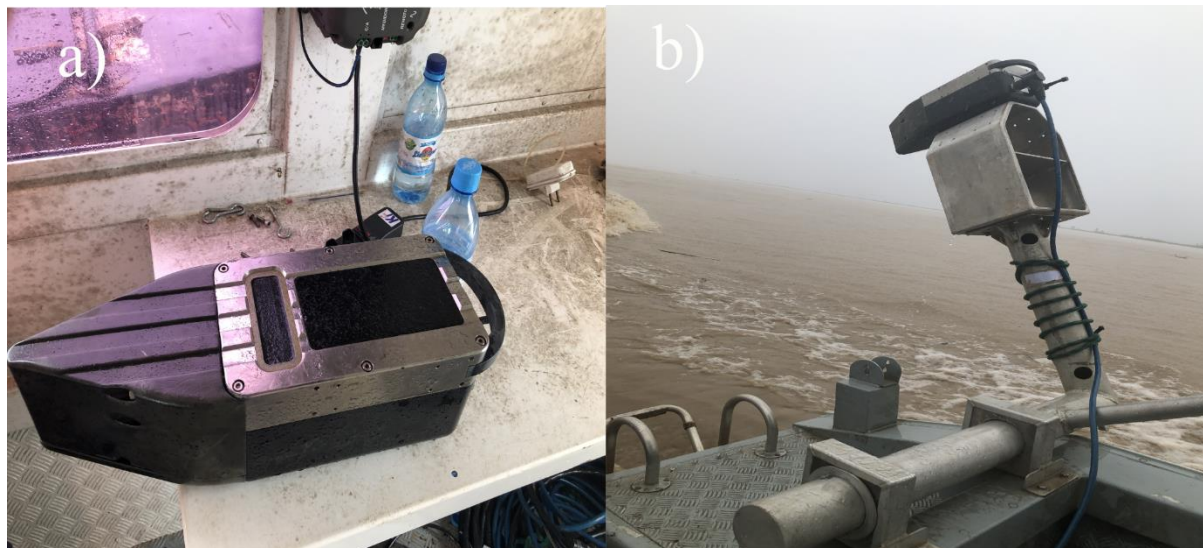


Figura 29 - a) Equipamento de Aquisição Batimétrica Multifeixe (ODOM MB1). b) Equipamento acoplado ao suporte basculante . (Fotografia do Autor).

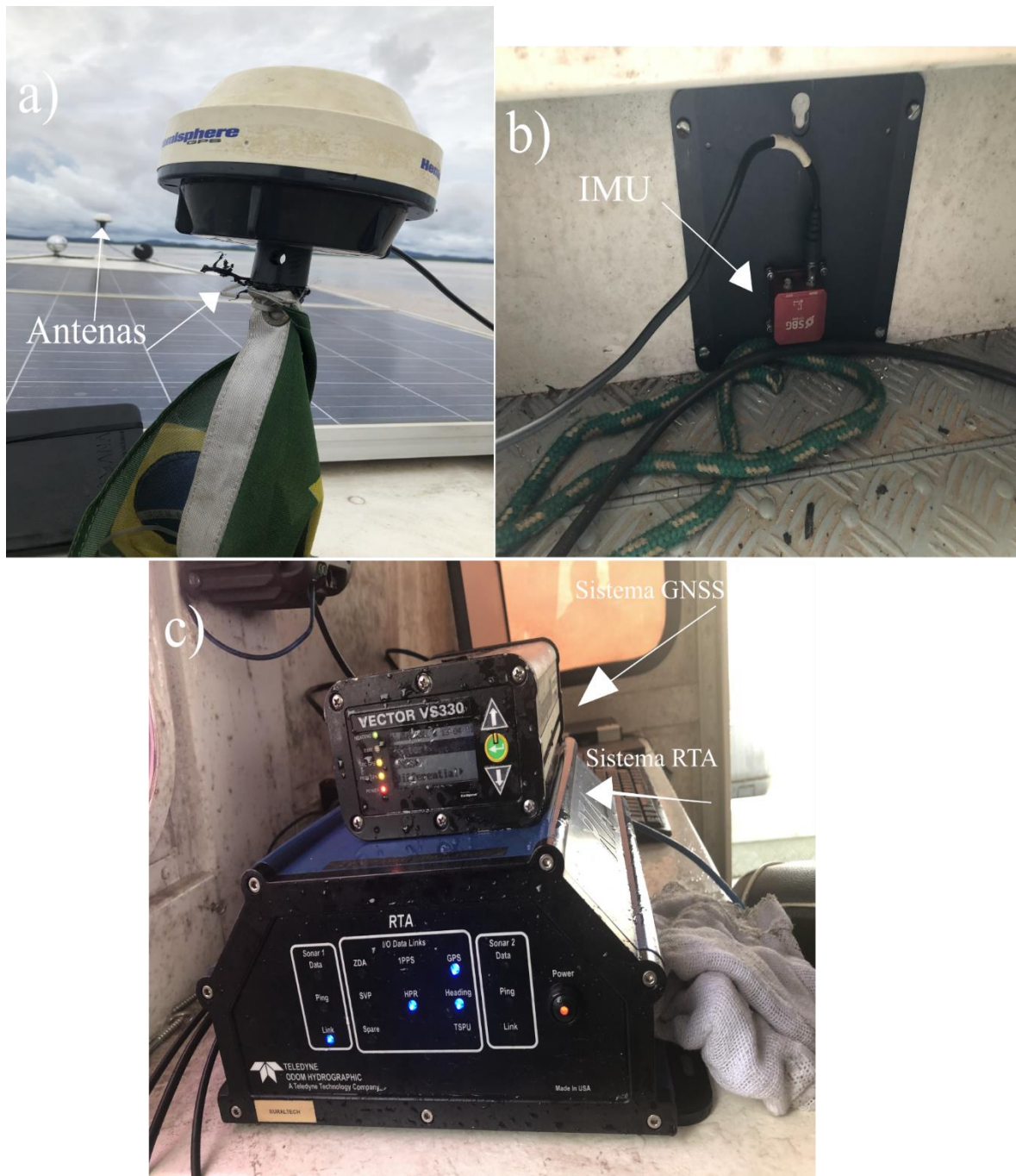


Figura 30 - a) Antenas GNSS Vector usadas na aquisição de dados, b) Equipamento MRU acoplado no Barco, c) Sistema de Aquisição Batimétrica RTA embaixo do Sistema de GNSS Vector. (Elaborada pelo Autor).

Além dos equipamentos citados anteriormente, houve, também, a instalação de dois computadores. Um computador foi ligado ao controle da sonda MB1 (Figura 31a), e outro a uma suíte de navegação e posicionamento Qinsy, software da empresa QPS,

(Figura 31b). Esse computador (Figura 31b) permitiu verificar a localização da embarcação, além de registrar os dados do levantamento batimétrico.

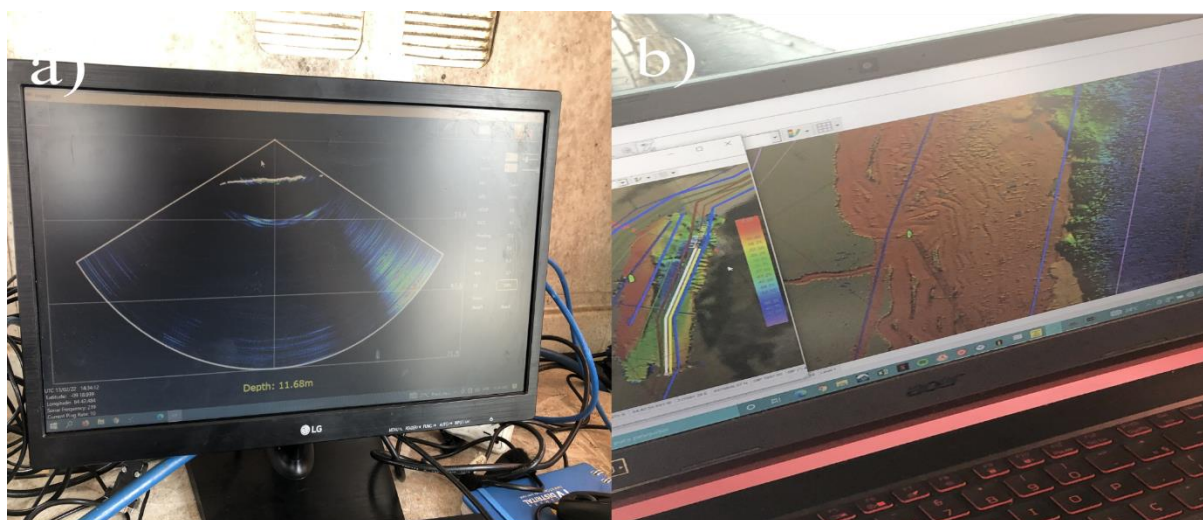


Figura 31 - a) Monitor do Computador ligado ao gerenciamento da aquisição batimétrica do ODOM MB1, onde pode se alterar o alcance do sinal entre outras configurações, b) Monitor do notebook com a execução do software Qinsy que permite o georreferenciamento da embarcação e o registro dos dados batimétricos. (Elaborada pelo Autor).

Durante o levantamento de dados, esses equipamentos, com a exceção do SVP, foram utilizados simultaneamente. Houve a utilização do SVP quatro vezes para estimar a velocidade do som da coluna d'água. O diagrama (Figura 32) mostra os equipamentos que se interconectaram simultaneamente com o RTA para a realização da pesquisa.

Durante a aquisição, foi ainda efetuada a conexão entre as antenas GNSS, os dois computadores e o sensor IMU com o RTA (Figura 32). O termo “*heading*” é relacionado à direção de deslocamento da embarcação, variando de 0 a 360°. Para determinação desse valor foi necessária a utilização de duas antenas. O RTA monitorava o funcionamento do MB1, registrava os dados de batimetria e, também, georreferenciava os dados batimétricos com o auxílio dos dados do GNSS.

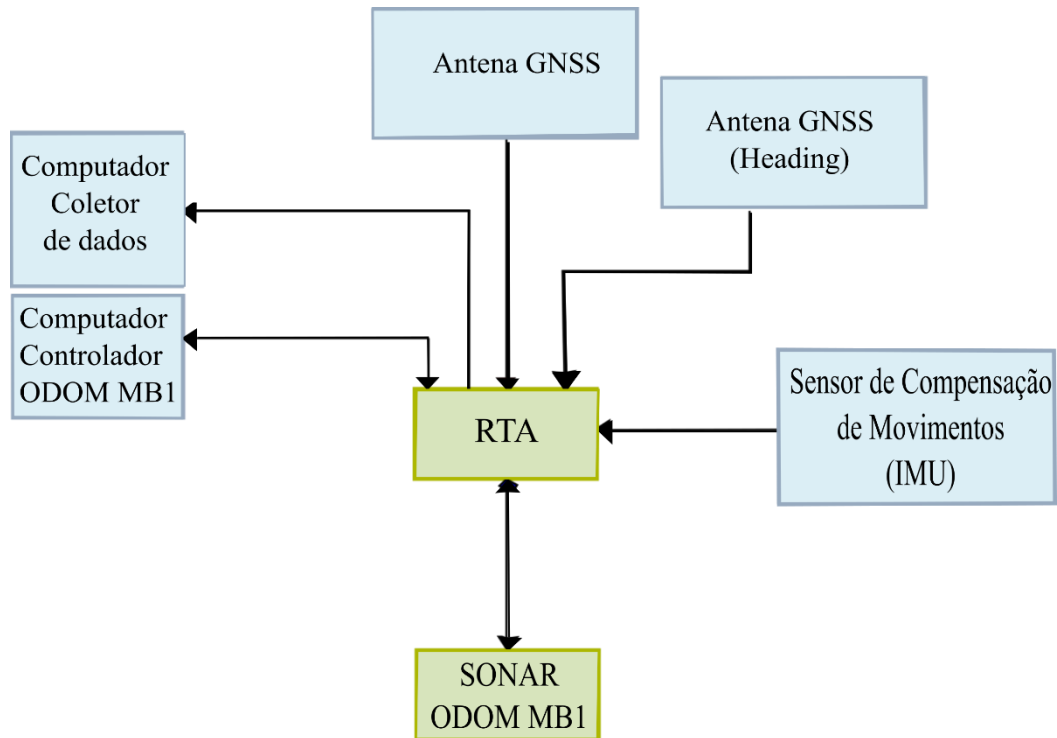


Figura 32 - Diagrama da Aquisição de Dados. Modificado de Teledyne (2013).

Anteriormente à aquisição de dados, a calibração foi realizada por “patch tests”, que são desenvolvidos antes do levantamento, com a finalidade de determinar e compensar os offsets, resíduos dos ângulos de instalação entre o sensor e a embarcação (Roll, Pitch e Yaw), bem como a latência temporal entre os sistemas de levantamento, como explicado, também, em Buscombe *et al.* (2014).

Já para realizar os “*patch tests*” em relação aos ângulos de instalação, algumas linhas testes foram realizadas. Em relação à calibração dos movimentos Roll, foram realizadas duas linhas em sentidos opostos. Já em relação ao Pitch, duas linhas sobrepostas foram adquiridas em regiões de declive. Já para o Yaw, houve a execução de duas linhas na mesma direção, apresentando melhor efetividade em regiões de afloramentos rochosos.

Após a calibração de dados, algumas linhas batimétricas foram realizadas na região denominada Canal (Figura 26b). Nessa região há um alargamento do Rio Madeira, em consequência da implementação da barragem. Assim o levantamento de dados foi baseado na presunção de uma maior deposição de sedimentos nesse trecho do

rio. Além dessa região, a aquisição batimétrica foi efetuada em uma área com a presença do Dique. (Figura 26c).

4.1.2 Aquisição de Dados de Perfilagem Sísmica de Alta Resolução

Além da investigação batimétrica, ocorreu também a aquisição dos dados de perfilagem sísmica de alta resolução. A fonte aplicada, nesta pesquisa, era do tipo CHIRP, apresentando uma frequência modulada do sinal. O levantamento foi realizado durante os dias 08 a 10.02.2022 e no período de 13 a 15.02.2022. O equipamento utilizado foi o EDGETECH 3100 da com transdutor SB216S fabricado pela a empresa EDGETECH (Figura 33a). Esse equipamento foi cedido pelo laboratório de Geofísica Aplicada (LGA) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade de Brasília (UnB). Algumas características do EDGETECH 3100 são descritas a seguir, baseando-se em EdgeTech (2015):

- Alcance de Frequência do Equipamento - 2 a 15 kHz;
- Tipo de Pulso - Frequência Modulada (FM);
- Máxima Resolução Vertical - 6cm (2-15 kHz), 8 cm (2-12kHz), 10cm (2-10kHz);
- Máxima Penetração em Areias Grossas e Calcário - 6m (Típico);
- Máxima Penetração em Argilas - 80m.

O transdutor foi conectado com o *transceiver* (EdgeTech TopSide, Figura 33b) mediante um cabo de transmissão de dados e reboque. Um notebook, para visualização de dados e controle da aquisição, também foi empregado (Figura 33b). Semelhante à aquisição de dados batimétricos, houve outro notebook para o gerenciamento da navegação, com base também no software Qinsy. O georreferenciamento dos dados foi realizado com base nas mesmas antenas usadas para a aquisição batimétrica.



Figura 33 - a) Equipamento EDGETECH 3100 com transdutor SB216S, foto anterior à aquisição de dados com o próprio na superfície b) Equipamento TOPSIDE da empresa EdgeTech, representado pela maleta amarela, e o notebook em que há a visualização de dados de perfilagem sísmica (Fotografia do Autor).

Como dito anteriormente, o levantamento dos perfis sísmicos foi efetuado em linhas em sentidos transversais e longitudinais ao leito do rio

Durante a aquisição de dados, houve a variação do espectro de frequência do CHIRP de 2 a 15kHz para 2 a 10kHz a fim de maximizar a penetração nas estruturas sedimentares. Além disso, uma área turbulenta, com presença de emulsão de bolhas, localizada na margem esquerda do rio (sentido montante-jusante) próximo à área da Cachoeira de Jirau promoveu bastante reverberação na aquisição.

4.2 Metodologia de Processamento

O processamento dos dados adquiridos no trabalho de campo é apresentado nesta seção. O processamento de dados batimétricos demandou cuidados com a finalidade de remover os ruídos, para que o modelo gerado representasse a geomorfologia fluvial corretamente. Em relação aos perfis sísmicos, o processamento foi igual para todos os perfis, porém demandou tempo e organização, permitindo uma melhor classificação dos perfis.

4.2.1 Processamento de Dados Batimétricos

Inicialmente, o processamento de dados foi realizado no software Qimera 2.5 da empresa QPS. Esta etapa foi realizada, primeiramente, para a região do Dique e, posteriormente para área do Canal. Foram realizados “testes de calibração” ou patch tests no software Qimera para obter valores referentes aos movimentos da embarcação (Pitch, Roll e Yaw). Esse procedimento foi desenvolvido, novamente, devido à presença de desajuste na direção dos perfis. Anteriormente à realização desses testes, foi acoplada a velocidade do som obtida por meio da sonda SVP. Esta etapa foi realizada para obter uma melhor precisão acerca da profundidade do leito.

Posteriormente, houve a remoção de ruídos com o filtro “Remove Outliers (True 3D)”, que retira pontos anômalos aos pontos vizinhos. Trata-se de ferramenta baseada na aplicação dos princípios estatísticos da média e do desvio padrão, como descrito no manual do software.

Essa filtragem foi realizada com a seleção de faixas ou “Slices” ao longo da nuvem de pontos. A escolha da espessura do Slice foi realizada com objetivo de filtrar uma quantidade de dados razoável, a fim de evitar o processamento de uma quantidade grande ou pequena de pontos. Um número elevado de pontos levaria a um grande uso da memória ram do computador, já um número pequeno poderia levar a um tempo elevado de processamento. Os pontos discrepantes restantes eram removidos, retirando-se os spikes com até 50cm de altura, havendo a exportação das superfícies do Canal e do Dique em “txt”.

A próxima etapa foi a suavização de dados ou “*Smoothing*”. A aplicação dessa ferramenta foi realizada no software RiscanPro da empresa RIEGL, em razão da presença de erros remanescentes da calibração dos perfis. Primeiramente, foi realizada uma filtragem de pontos anômalos na nuvem de pontos, procedimento chamado de Filtro de Terreno ou “*Terrain Filter*”. Posteriormente, houve a aplicação da ferramenta “Smooth e Decimate”. Como descrito pelo manual do software, a função “*Smooth*” permitiria obter uma nuvem de pontos com uma superfície mais suave, preservando, ainda, a quantidade de polígonos e de pontos. Já a “*Decimate*” reduziria a quantidade de polígonos no grid. Esses procedimentos foram realizados

para as duas superfícies “Canal” e “Dique”. Finalmente, arquivos “.txt” foram exportados para ambas as nuvens de pontos.

Na última etapa, os arquivos “.txt” foram importados para o software PDS da empresa Teledyne Marine. Primeiramente, houve a realização de interpolação com a técnica de triangulação, com 2m de espaçamento entre os nós para ambas as superfícies. Com os grids interpolados, foi implementada uma interpolação circular para preencher regiões com baixas concentrações de pontos. Normalmente, a recomendação do manual é a aplicação dessa ferramenta para pequenos buracos nos dados, caso desta pesquisa. Por último, houve a redução dos dados em relação ao nível d’água do período do levantamento de dados batimétricos (90m), de tal modo que a profundidade do leito era de acordo com o nível d’água do reservatório.

4.2.2 Processamento de Dados de Perfilagem Sísmica de Alta Resolução

Os dados da Perfilagem Sísmica de Alta Resolução foram processados no software *Geo Marine All Works* da empresa *Geo Marine Survey Systems*. A primeira etapa teve como finalidade organizar as linhas, desenvolvendo nomenclatura para os perfis, com base em critérios como a direção do levantamento, localidade da linha em relação a pontos de referência e comprimento do perfil. Esses critérios são descritos a seguir:

- 1º Critério - Classificação da linha de acordo com a sua direção de levantamento, sendo que as linhas longitudinais (L) são paralelas ao rio e as transversais (T) perpendiculares ao fluxo do rio;
- 2º Critério - Localização das linhas em relação a certas regiões do reservatório e do rio Madeira. Para a segmentação das sete regiões, houve a divisão com base em áreas de referência que foram a Cachoeira de Jirau, Área Central da área de estudo e a região do Dique Fluvial. Essas sete regiões são: Montante Cachoeira de Jirau (MCJ), Cachoeira de Jirau (CJ), Jusante Cachoeira de Jirau (JCJ), Montante Área Central (MAC), Área Central (AC), Montante Área Dique (MAD) e Área Dique ou Dique (AD ou D). A nomenclatura das linhas também foi desenvolvida com base em referências em relação às margens. Regiões como a denominada de Jusante Cachoeira de Jirau (JCJ) apresentava 8 linhas

levantadas, sendo necessária a utilização de termos como Centro Esquerda (CE) ou Centro Direita (CD). Em relação à aplicação desse critério, verifica-se, na Figura 34, a presença dessas sete regiões ao longo da área de estudo. A Tabela 2 mostra a quantidade de linhas longitudinais (L) e transversais (T), com relação às regiões determinadas.

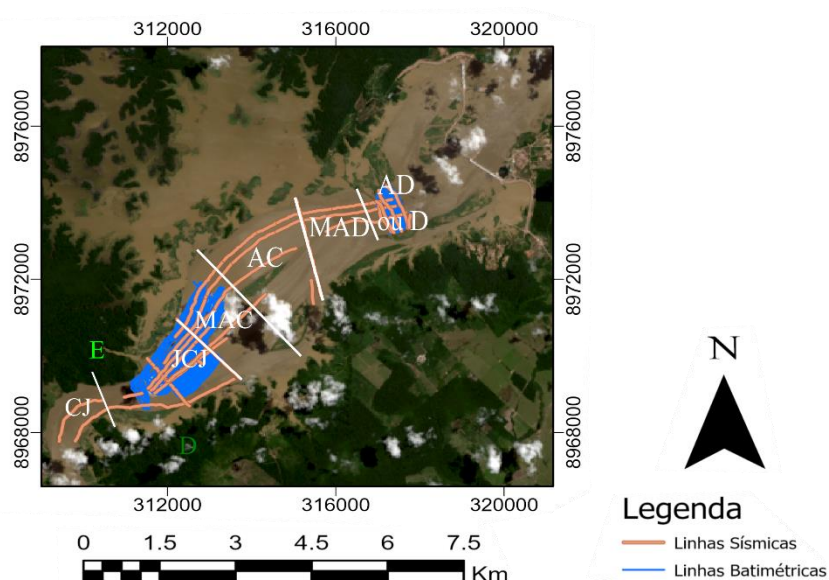


Figura 34 - Localização das regiões cujas áreas são demarcadas pela linha branca. Verifica-se, também, o ponto de referência das linhas em relação à margem. Fonte imagem atual: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGrid, IGN e a comunidade do usuário de SIG ou (“GIS User Community”). Fonte imagem 2006: USGS, Landsat 7

Tabela 2 - Representação do número de linhas longitudinais (L) e transversais (T) para cada região.

Regiões de Aquisição de Dados	Nº de Linhas Processadas
Montante Cachoeira de Jirau (MCJ)	1 (1 L)
Cachoeira de Jirau (CJ)	2 (2 L)
Jusante Cachoeira de Jirau (JCJ)	8 (7 L; 1 T)
Montante Área Central (MAC)	5 (4 L; 1 T)
Área Central (AC)	3 (3 L)
Montante Área Dique (MAD)	3 (2 L; 1T)
Área Dique (AD)	5 (1L ; 4T)

- 3º Critério - Outro critério foi devido à limitação computacional do levantamento de dados, uma vez que as linhas levantadas eram segmentadas durante a

aquisição de dados. Uma linha em uma mesma região, porém segmentada, tinha a atribuição de números para as linhas levantadas. Esse critério pode ser exemplificado na Linha Longitudinal Área Central (LLACC) que foi subdividida em LLACC, LLACC.001 e LLACC.002.

- 4º Critério - Algumas linhas eram curtas, porém tinham informações relevantes, assim, essa característica foi tratada em sua nomenclatura como exemplificado na Linha Longitudinal Curta Montante Área Central Centro (LLCMACC).

Sobre o processamento das linhas, ressalta-se que todas as linhas adquiridas foram processadas, porém a interpretação ficou limitada às linhas mais representativas.

Após a organização das linhas sísmicas de acordo com os critérios descritos, essas foram processadas no software Geo Suite All Works da empresa Geo Suite Marine Surveys, mesmo que muitas funções sejam mais adequadas para dados de Boomer e Sparker, já que o software tem como principal escopo os dados adquiridos por essas fontes. Além disso, o software apresenta nomenclaturas relativas ao meio oceânico como assoalho oceânico ou "*SeaFloor*".

O processamento de linhas sísmicas teve quatro etapas, descritas a seguir, com base no manual do software (Geo Marine Survey Systems, 2021):

A primeira etapa é denominada de Controle Automático de Ganho ou "*Automatic Gain Control*" (AGC). Essa função permitia aplicar para cada traço um ganho automático, cuja média absoluta das amplitudes se enquadrava no valor da amplitude inserida, no caso desta pesquisa 2000mV. Essa ferramenta, ainda, possibilitava delimitar a janela horizontal (número de tiros) e vertical (tempo) em que seria aplicada essa função. Além disso, era possível escolher o ganho e a porcentagem aplicados.

A segunda etapa foi a demarcação do fundo do rio nos perfis, utilizando-se a função "*SeaBed Multiple Finder*". Essa função demarca o fundo em razão da amplitude do refletor. Durante a aplicação dessa ferramenta, há a possibilidade de alterar a janela temporal em que será utilizada e, também, o grau de amplitude que o software demarcará o fundo. Em certos perfis, a ferramenta não foi eficaz na identificação do fundo do rio, tendo sido então necessário editar manualmente o fundo demarcado.

A terceira etapa foi a aplicação da função “*Mute*”, com a finalidade de retirar os ruídos e reverberações acima do fundo demarcado. Nessa ferramenta, era possível editar a janela horizontal (tiros) e a janela vertical (tempo).

A última etapa foi a transformação do dado de tempo (ms) para profundidade (m). Essa operação foi realizada baseando-se na equação do TWT (Equação 6). A velocidade utilizada foi a da água (1.500m/s), conforme realizado em outras pesquisas como a de Gasperini *et al.* (2020).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção será dividida em três subseções principais. Na primeira subseção, duas imagens da área de estudo, adquiridas por satélite, serão apresentadas. Essas imagens ilustram o período anterior (02/03/2004) e posterior (02/04/2021) à implementação da barragem de Jirau. Serão feitas comparações acerca das variações do fluxo do rio Madeira, acontecidas antes e após a inundação promovida pela implementação da barragem.

A segunda subseção consiste na apresentação dos modelos batimétricos do Canal e do Dique e a interpretação realizada sobre eles. Além disso, a morfologia encontrada nesses modelos será integrada às imagens de satélite, possibilitando a identificação de semelhanças entre a morfologia apresentada no modelo e a verificada, principalmente, no período anterior à implementação da barragem. Além dos dados batimétricos, serão apresentados perfis sísmicos com a finalidade de caracterizar a morfologia e estratigrafia em diferentes áreas do rio Madeira.

Por fim, na terceira subseção, será realizada uma discussão acerca das características morfológicas e estratigráficas encontradas nos resultados, tendo como finalidade compreender a deposição de sedimentos na área de estudo, identificar áreas mais suscetíveis ao assoreamento, além de correlacionar os dados geofísicos com seções batimétricas anteriores e, também, com dados da concentração de sedimentos em suspensão na área de estudo, obtidos pelo , projeto SPECTROSED.

5.1 Análise das Imagens de Satélite da Área de Estudo

Para realizar a comparação entre as imagens, essas foram selecionadas no período de alto fluxo de água, ou seja, no período em que o reservatório apresenta seu nível máximo (90m), semelhante ao encontrado durante a aquisição dos dados. As imagens do período anterior e posterior ao barramento foram adquiridas pelo satélite Landsat 5 com o sensor Thematic Mapper (TM) e Landsat 8 com os sensores Operational Land Imager (OLI)/ Thermal Infrared Sensor (TIRS) respectivamente, ambas as imagens apresentando 30 metros de resolução espacial. Apesar de o Landsat 7 ser mais recente que o Landsat 5, as imagens-satélite Landsat 7 não foram utilizadas. Essa

opção foi decorrente da falha no corretor da linha do scanner ou “Scan Line Correction” (SLC no satélite Landsat 7 Landsat 7, ocorrida no dia 31/05/2003 (USGS, 2022). A correção dos dados realizada pela a USGS levava à existência de regiões vazias (sem dados) nas imagens satélites. Atualmente, há filtros que permitem a remoção de tais regiões vagas como descrito por Lee *et al.* (2016). Entretanto, nesta pesquisa, as imagens de Landsat 5 foram utilizadas, uma vez que não seria necessária a aplicação de filtros, além da interpretação não ser prejudicada em razão de ser um satélite mais antigo. Durante a escolha da imagem de satélite relativa ao período anterior ao barramento, houve dificuldade em relação a seleção de uma imagem, devido, principalmente, à presença de nuvens na época da cheia do rio Madeira. Assim, a imagem escolhida é do dia 02/03/2004 bastante anterior à implementação do barramento.

Há dois níveis de correção das imagens: nível 1 ou “*Level 1*” e nível 2 ou “*Level 2*”. A correção “*Level 1*” é associada à precisão de terreno, já a “*Level 2*” permite a obtenção de produtos relativos à temperatura e à reflectância da superfície, além de realizar correções atmosféricas (USGS, 2022). Para obtenção da imagem de satélite com correções atmosféricas, foram aplicados os dois níveis para ambas. A imagem de 2021 (Figura 35b) apresentou correção de nível 1, já que quando foi realizada a correção de nível 2, ocorreram falhas na imagem em regiões com nuvens. Por fim, para a geração da imagem-satélite de 2004 em formato RGB (Figura 35a), foram selecionadas as bandas B3 (Vermelho), B2 (Verde) e B1 (Azul). Já para a geração da imagem de 2021, foram selecionadas as bandas B4 (Vermelho), B3 (Verde) e B2 (Azul). As bandas escolhidas são diferentes devido à presença de uma banda (Coastal Aerosol) com comprimento de onda menor que o azul no Landsat 8 (USGS, 2022). Por fim, verifica-se um aumento da área de inundação, levando a uma alteração no fluxo do rio.

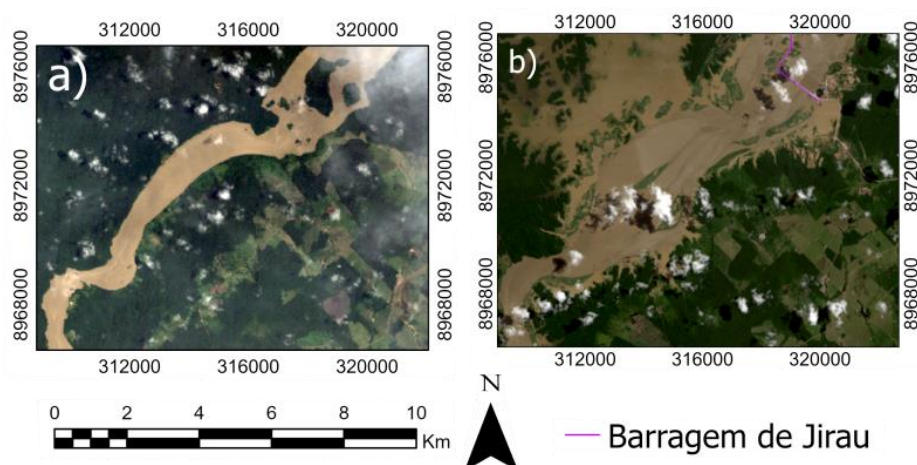


Figura 35 - a) Imagem Satélite do Período Pré-Barramento (02 de março de 2004) b) Imagem Satélite do Período Pós-Barramento (02 de abril de 2021)

5.2 Modelos Batimétricos e Perfis Sísmicos

Nesta seção serão caracterizados os modelos batimétricos de duas regiões do rio Madeira - Canal e Dique - com relação à variação morfológica encontrada nessas regiões. A caracterização dos perfis sísmicos se baseará na identificação das suas eco fácies e da variação morfológica.

5.2.1 Caracterização e Interpretação dos Modelos Batimétricos

Com base nas etapas de processamento retratadas na metodologia desta pesquisa, houve a geração de modelos batimétricos no software PDS, a partir da interpolação de dados usando triangulação (TIN). Dois modelos foram gerados referentes às regiões do Canal e do Dique Fluvial, com o espaçamento de 2m.

Nos modelos batimétricos do Canal e do Dique (Figura 36a e na Figura 38), verificam-se estruturas mais planas e outras com dimensões mais irregulares. Já em relação aos valores mínimos e máximos das escalas verticais, esses são referentes à elevação do terreno ao nível do reservatório, durante a aquisição dos dados (90m).

Na região do Canal a), verifica-se, inicialmente (a montante), uma intercorrência entre trechos com menores e maiores profundidades. Identifica-se a presença de estruturas inclinadas podendo ser associadas aos paredões rochosos da Cachoeira de Jirau entre as regiões mais profundas, estas denominadas de Sulcos Erosivos. Essas feições intercaladas podem ser associadas as cachoeiras “Multi Step”, como descrito

em National Geography (2023), identifica-se a presença de diversos sulcos erosivos intercalados. Na margem esquerda do rio Madeira, na região do Canal, são visualizadas feições truncadas que podem ser associadas à formação geológica São Lourenço-Caripunas, área designada na Figura 36b como Margem Esquerda. Na região direita da margem direita do rio Madeira, encontram-se estruturas semelhantes a afloramentos rochosos. Essa interpretação pode ser evidenciada pelo mapeamento geológico prévio da região que indicava a presença da formação São Lourenço-Caripunas na área. (Figura 36a), (Figura 36b). No modelo batimétrico, também, verifica-se uma estrutura com baixa variação topográfica (Figura 36a), área denominada de Terraço Fluvial no modelo interpretado. Esse ambiente morfológico pode estar associado a formação Jaci Paraná (Figura 36b).

A partir do trecho intermediário do modelo, há continuidade da região do Terraço ao longo da margem direita do rio (Figura 36b). Outras feições observadas são relativas ao Levee e à Planície de Inundação (Figura 36b). Como verificado, as planícies de inundação não são bem desenvolvidas. Segundo Campos e Teixeira (1988) *apud* Souza Filho *et al.* (1999), essa característica, além da presença de terraços erosivos entre outras feições morfológicas, remete à presença do compartimento morfoestrutural na região. Há após os sulcos erosivos, uma região com baixa variação de profundidade (Figura 36a), que foi denominada de Talvegue com Sedimentos, essa nomenclatura é referente a uma área já existente no período anterior à implementação da barragem que já apresentava uma expansão do canal fluvial. Além disso, essa região é mais propensa a deposição de sedimentos. Essa área era localizada a jusante após da região com estruturas inclinadas e paredões rochosos.

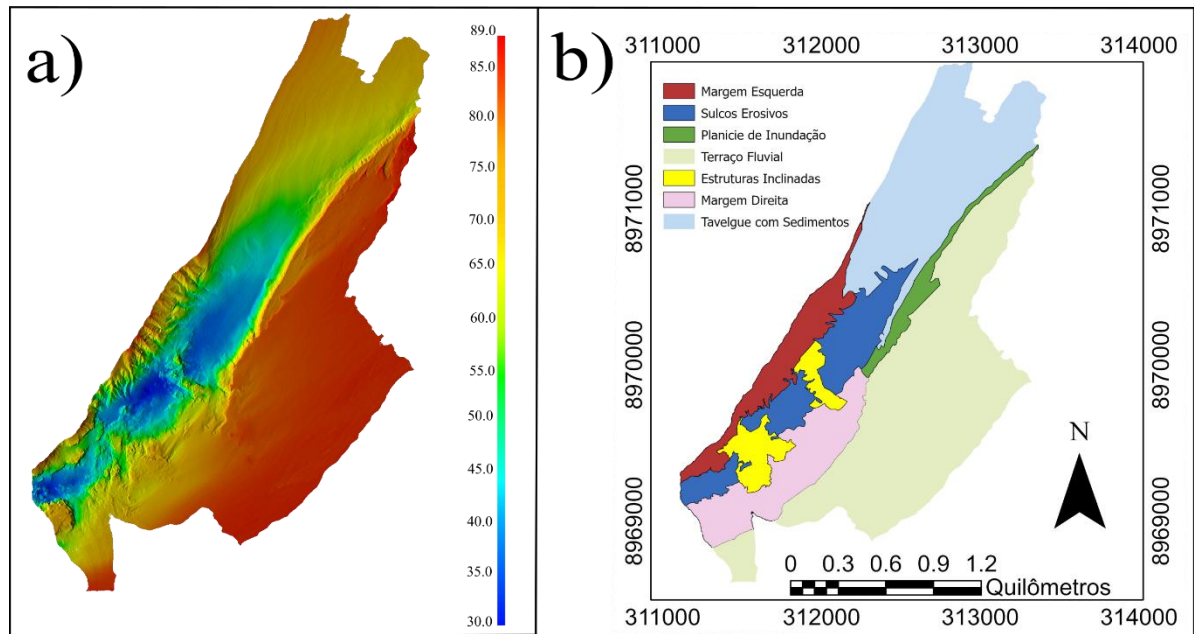


Figura 36 - a) Modelo batimétrico da região do Canal. Verifica-se a existência de uma variação morfológica nesta região. Os valores encontrados na escala vertical são referentes ao nível do reservatório durante à aquisição de dados (90m).b) Modelo Batimétrico do Canal interpretado. Sistema de coordenadas WGS84 zona 20S.

Na Figura 37, há coerência na comparação entre a morfologia da área do rio Madeira no período anterior à implementação da barragem (Figura 37a) e o modelo batimétrico (Figura 37b). A região interpretada como Terraço Fluvial (Figura 37b), majoritariamente, corresponde à margem direita do rio Madeira que não era inundada, mesmo nos períodos de alto nível e alto fluxo d'água do rio Madeira (Figura 37a). Já os ambientes interpretados como Margem Esquerda e Margem Direita são áreas inundadas desde o período anterior à implementação da barragem.

Quando se comparam os modelos batimétricos no ambiente morfológico – anterior (Figura 37b) e posterior (Figura 37c) à implementação do reservatório – no posterior a diferença mais evidente é a inundação da região do Terraço. Além dessa diferença, há também uma ilha que pode ser a continuação da margem direita (seta amarela) na Figura 37c, já que apresenta a mesma direção da antiga margem esquerda do rio Madeira.

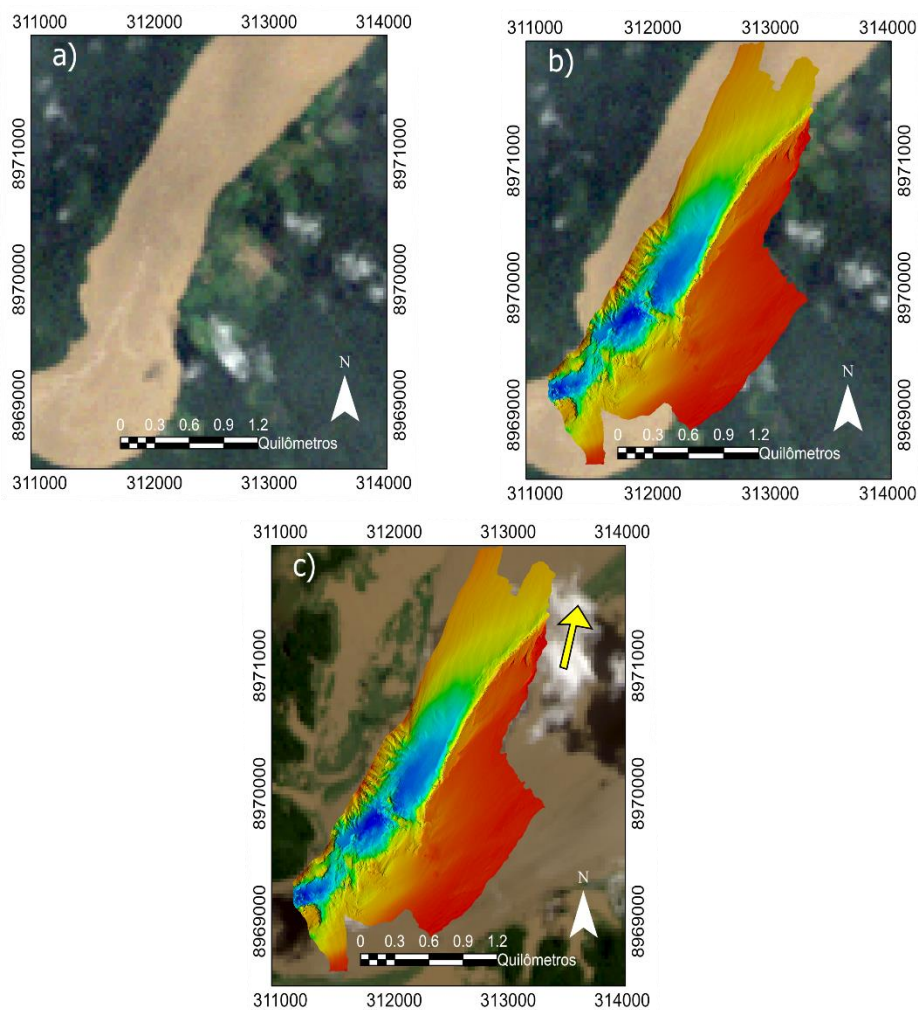


Figura 37 - Trecho da imagem satélite ilustrativa do período anterior à implementação da barragem (02/03/2004) com a) ausência e b) presença do modelo batimétrico. c) Modelo Batimétrico com a presença da imagem representando o período posterior ao barramento. A seta amarela aponta a presença da ilha.

A região do Dique, como pode ser observado na Figura 38, não apresenta tanta variabilidade morfológica como a do Canal. Essa região contém feições nomeadas como Estruturas Tabulares (Figura 37a e Figura 37b). Nessa área, no período anterior à implementação do reservatório, como já apontado pela Figura 23, se encontravam afloramentos da formação geológica São Lourenço-Caripunas. Essas feições rochosas apresentam áreas, comprimentos e elevações diferentes (Figura 38a). Já na parte superior do modelo, há uma região com inclinação acentuada, denominada Margem Esquerda (Figura 38b). Na parte inferior, há uma região também inclinada, mas com declividade menor do que a da Margem Esquerda (Figura 38a), denominada de Margem Direita (Figura 38b). Por fim, há uma área com profundidade reduzida

entre essas regiões, nomeada de Leito Fluvial Profundo, essa área apresenta rugosidades, não apresentando, provavelmente, a presença de sedimentos. Verifica-se ainda a presença de regiões mais profundas chamadas de Sulcos Erosivos (Figura 38b).

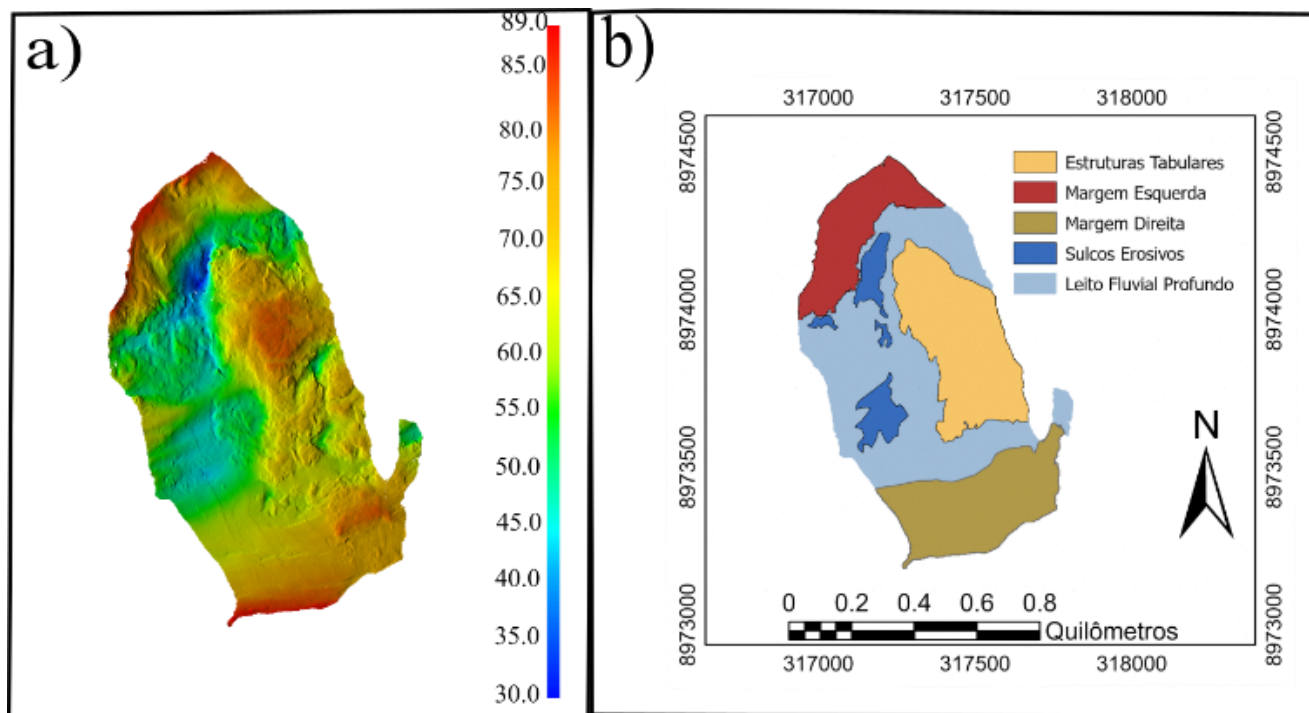


Figura 38 – a) Modelo Morfológico do Dique. Assim como aplicado para o canal, os valores mostrados na figura acima são referentes a elevação das feições em relação ao nível do reservatório no período de aquisição de dados (90m). b) Modelo Batimétrico do Dique interpretado. Sistema de Coordenadas WGS 84 Zona 20S.

Comparando-se o modelo batimétrico do Dique (Figura 39b) com a imagem do período anterior à implementação do barramento (Figura 39a), verificam-se dois ambientes elevados, delimitados por quadrados brancos na Figura 39a e Figura 39b, que podem estar relacionados à presença de duas ilhas. Já as regiões caracterizadas como Margem Esquerda e Margem Direita estavam submersas durante ambos os períodos.

Quando se compara a imagem anterior (Figura 39a) e a posterior à implementação do reservatório (Figura 39b), verifica-se a presença de dois diques artificiais (Figura 39b), como apontado pelas setas brancas.

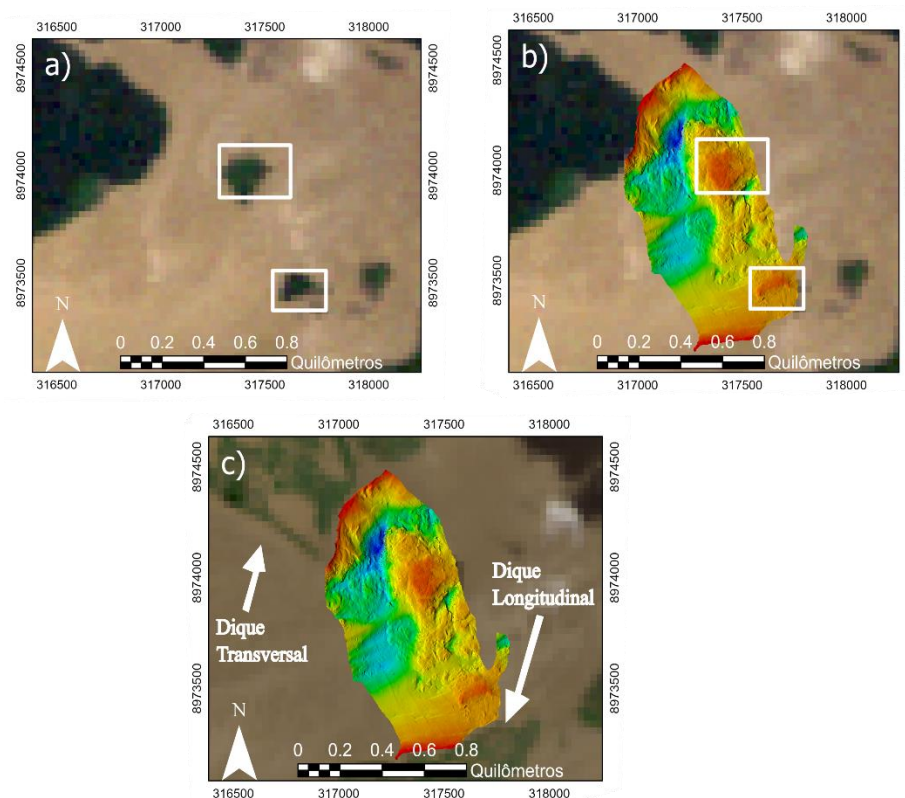


Figura 39 - Trecho da imagem satélite ilustrativa do período anterior à implementação da barragem (02/03/2004) com a) ausência do modelo batimétrico e b) presença do modelo batimétrico. c) Modelo batimétrico em cima da imagem representativa do período posterior ao barramento (02/04/2021), os diques artificiais são apontados.

5.2.2 Caracterização e Interpretação dos Perfis Sísmicos

Para a caracterização dos perfis sísmicos, primeiramente, foi realizada a classificação de seis ecofácies sísmicas. Após essa caracterização, dezessete perfis foram interpretados, sendo que doze estão apresentados nesta seção de Resultados e cinco se encontram no apêndice desta dissertação. Todos os perfis contêm sua localização no período anterior e posterior à implementação do barramento. Além disso, cada dado processado é mostrado nos perfis e onde havia refletores, croquis foram desenvolvidos.

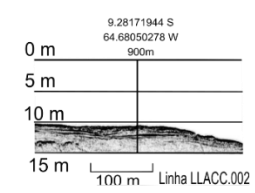
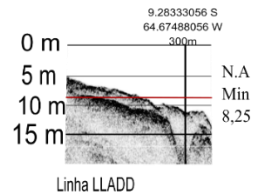
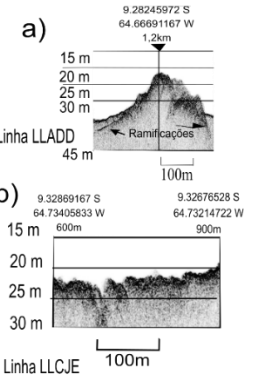
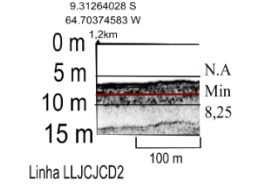
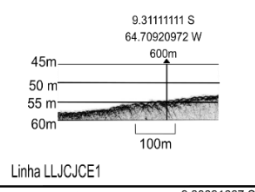
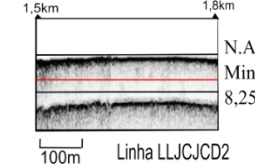
5.2.2.1 Classificação de Ecofácies

A classificação dos dados em fácies é aplicada em pesquisas que utilizam a abordagem da perfilagem sísmica de alta resolução, como verificado em Gasperini *et al.* (2020) e Lafferty *et al.* (2006). A classificação das fácies sísmicas foi realizada com

base em dados das pesquisas acima, além de informações sobre a interação das ondas acústicas com o meio, descritas em Reynolds (2011) e Dunbar *et al.* (1999).

A classificação das ecofácies é mostrada na Tabela 3. A primeira coluna, da esquerda para direita, apresenta o nome da ecofácies. A segunda descreve a correlação entre as características do sinal acústico e as características morfológicas e estratigráficas das feições. A terceira retrata as feições com base nos princípios físicos da interação da onda acústica com o meio. Já a última ilustra as feições sísmicas típicas para cada fácies.

Tabela 3 - Ecofácies tipificadas. As feições sísmicas foram retiradas de perfis sísmicos longitudinais ao canal do Rio Madeira. N.A Min equivale ao mínimo nível do Reservatório. Elaborada pelo Autor

Ecofície	Correlação entre feição sísmica e morfologia/estratigrafia do ambiente	Classificação da feição sísmica com base nos princípios físicos	Feições Sísmicas
E1	Essa feição é associada a ambientes com baixa energia, ambientes lacustres. Os refletores internos indicam o contraste entre deposições com granulometrias diferentes.	Nessa feição sísmica, refletores paralelos com amplitudes variadas são encontrados.	
E2	Entre o leito do rio e o refletor de alta amplitude, há uma feição homogênea sem a presença de interfaces internas. Essas feições homogêneas podem ser associadas a sedimentos finos.	Nesse tipo de feição sísmica, há uma camada transparente entre o leito do rio Madeira e um refletor de alta amplitude abaixo da camada.	
E3	Essa ecofácies é relacionada ao embasamento rochoso encontrado na área de estudo. Esse tipo de feição pode ser inclinado, podendo ser associado a um afloramento (a). No caso da figura há estruturas sedimentares próximas. O embasamento rochoso também pode ser associado a uma superfície rugosa com baixa penetração da onda acústica (b).	Essa feição sísmica apresenta interfaces que apresentam alta refletividade, não havendo penetração da onda acústica. A inclinação da estrutura é variada. Pode haver, também, estratos próximos ou não.	
E4	As feições caóticas, normalmente, estão relacionadas a deposições sedimentares associadas a ambientes de mais alta energia.	Verifica-se nessa feição sísmica, a presença de refletores caóticos com amplitudes variadas.	
E5	As feições com dimensão próxima ao comprimento da onda acústica incidente podem ser classificadas como refletores isolados. Presume-se que esse ambiente apresente granulometria mais grossa.	Essa feição apresenta hipérboles sobrepostas, que são relacionadas à difração das ondas acústicas.	
E6	Essa feição pode ser relacionada a um solo compactado. Diferentemente da E3, essa feição é plana e sem rugosidade.	Essa feição apresenta alta refletividade, não havendo assim, penetração da onda acústica.	

5.2.2.2 *Caracterização dos Perfis Sísmicos*

Como retratado anteriormente, os perfis sísmicos serão apresentados de montante a jusante do rio Madeira. Onze perfis serão apresentados nos resultados e outros cinco se encontram no apêndice desta dissertação. Entre os onze perfis aqui descritos há sete linhas longitudinais e quatro transversais.

5.2.2.3 *Perfil Linha Longitudinal Cachoeira de Jirau Esquerda (LLCJE)*

O primeiro perfil apresentado é a Linha Longitudinal Cachoeira de Jirau Esquerda ou LLCJE. Este perfil estava na região do canal do rio Madeira desde o período anterior ao barramento, conforme verificado nas Figura 40a (Imagem anterior ao barramento) e Figura 40b (Imagem Posterior ao Barramento). Esse perfil está localizado na Cachoeira de Jirau (CJ).

Nos seus primeiros 900m (Figura 40c), encontra-se um substrato do leito do rio Madeira que apresenta rugosidade. Identifica-se uma alta refletividade das ondas acústicas incidentes, fenômeno evidenciado por uma alta amplitude do leito no perfil sísmico. Essa feição se enquadra na Ecofácies E3 , apresentando baixa penetração da onda acústica

A partir do marco de 900m (Figura 40c), há estruturas com inclinações acentuadas, que, possivelmente, estão relacionadas à antiga Cachoeira de Jirau (CJ). Esse ambiente é relativo a ecofácies E3 e pressupõe-se que nessa região não há deposição sedimentar. Essa hipótese é evidenciada por Alves e Santos (2022), que indica ressuspensão de sedimentos na região da CJ. Esse perfil permanece inundado durante todo ano, uma vez que se encontra abaixo da linha vermelha mostrada na Figura 40

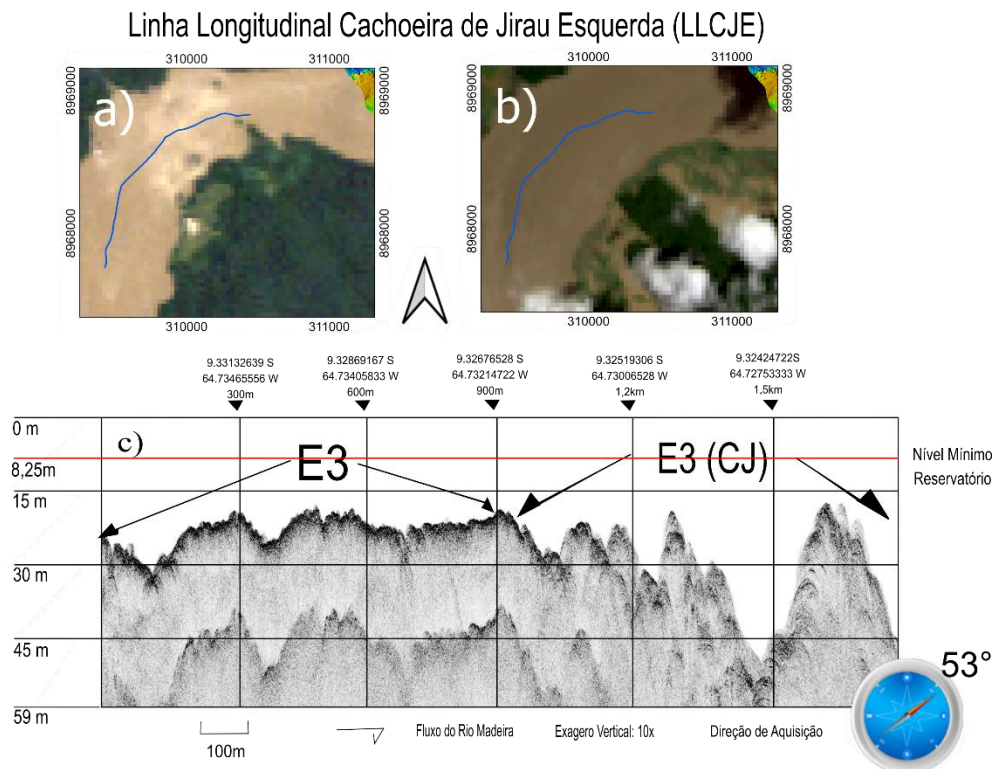


Figura 40 - Localização do Perfil Sísmico (LLCJE) representado pela linha azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021. c) Dado Processado com as eco fácies. Perfil é longitudinal ao fluxo do rio Madeira é longitudinal a este perfil. O exagero vertical é de 10x e a direção da navegação é de 53°. A linha vermelha no marco de 8,25m indica o nível mínimo do reservatório, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m.

5.2.2.4 Perfil Linha Longitudinal Cachoeira de Jirau Direita (LLCJD)

No período anterior à implementação da barragem de Jirau, trechos desse perfil eram emersos, sua localização era na antiga margem direita do rio Madeira, já outros perfis sempre estiveram na área do canal do rio Madeira (Figura 41a). Atualmente, esse perfil com 2,2 km é localizado inteiramente no canal do rio Madeira (Figura 41b), porém algumas regiões ficam emersas durante certas partes do ano, quando o nível do rio Madeira é reduzido.

Nos primeiros 300m do perfil (Figura 41c e Figura 41d), identifica-se, além do leito do rio Madeira, um refletor de alta amplitude e entre essas interfaces uma fina camada transparente. Essa configuração pode ser associada à ecofácies E2. Além disso, nesse trecho são encontradas vegetações, situadas na região prévia da Margem Direita do rio Madeira. Esse perfil está abaixo do traço vermelho, assim é emerso durante os períodos de menor nível d'água. Em relação ao refletor de alta refletividade,

como será visto para as próximas linhas, presume-se que essa interface demarque os sedimentos recentes dos depósitos anteriores.

Entre 300m e 900m (Figura 41c e Figura 41d), são encontrados refletores paralelos, que remetem à ecofácies E1. Essas deposições estão, normalmente, associadas a ambientes de baixa energia, tipo lacustre, como verificado em Gasperini *et al.* (2020), Lafferty *et al.* (2006) e McGlue e Woolery (2022). Além disso, como verificado no perfil, o refletor de alta amplitude já caracterizado continua nesse trecho. Abaixo dessa interface, verificam-se horizontes paralelos, indicando a presença de um ambiente deposicional de baixa energia desde o período prévio à implementação da barragem. Entre esses refletores paralelos (Figura 41c e Figura 41d), identifica-se, aproximadamente no marco de 900m, um ambiente homogêneo, associando-o a ecofácies E2, e apresentando, majoritariamente, sedimentos finos.

Entre 900m e aproximadamente 1,3km (Figura 41c e Figura 41d), há a presença de estruturas que remetem à ecofácies E3, semelhantes às encontradas na região da CJ (Figura 40c). Entre essas estruturas, há uma interface isolada, aproximadamente no marco de 1,2km, apresentando feição relacionada à ecofácies E2. Presume-se que essa região seja relacionada a uma parte da antiga margem do rio Madeira.

Entre aproximadamente 1,3 e 1,7km (Figura 41c e Figura 41d), verificam-se feições caóticas (Ecofácies E4), que podem ser relacionadas a ambientes de mais alta energia (Gasperini *et al.*, 2020 e McGlue e Woolery, 2022).

Já a partir de 1,8km (Figura 41c e Figura 41d), há a presença de um leito com rugosidade com características semelhantes ao encontrado no perfil LLCJE (Figura 40c), sendo classificadas como embasamento rochoso.

Linha Longitudinal Cachoeira de Jirau Direita (LLCJD)

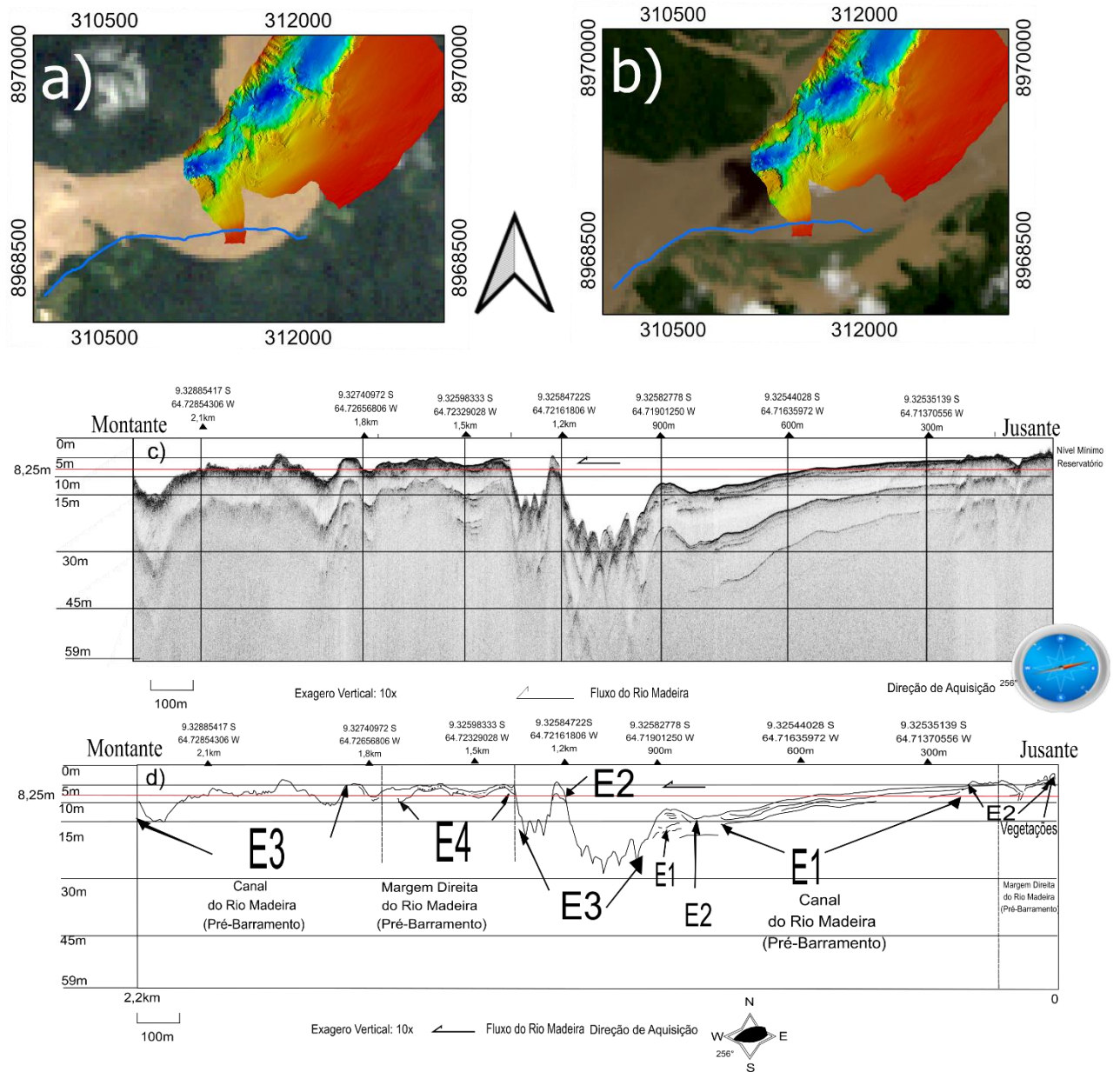


Figura 41 - Localização do Perfil Sísmico (LLCJD) representada pela linha azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021) .Linha LLCJD c) Processada d) Croqui apontando, principalmente as eco fácies presentes. Além disso, verifica-se o fluxo de rio Madeira, o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição de 256°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical O perfil referente à linha 8,25m é o nível mínimo do reservatório, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m

5.2.2.5 Perfil Linha Transversal Jusante Cachoeira de Jirau 2.001 (LTJCJ2.001)

Esse perfil tem extensão de 1,07 km e atravessa o modelo batimétrico (Figura 42a e Figura 42b), mostrando a variação morfológica do trecho estudado.

Nos primeiros 300m do perfil (Figura 42c e Figura 42d), verifica-se a presença de feições profundas no leito do rio Madeira, relacionadas à região dos sulcos erosivos no modelo interpretado (Figura 35). Esse trecho foi associado às ecofácies E3 devido à alta refletividade e baixa penetração das ondas acústicas, podendo ser considerado como embasamento rochoso, características evidenciadas em Dunbar *et al.* (1999).

Nesses primeiros 300m do perfil (Figura 42c e Figura 42d), há ainda a presença de feições inclinadas que também foram associadas às ecofácies E3. No modelo batimétrico (Figura 36b), a feição sísmica classificada como Margem Direita, tem suas estruturas associadas aos afloramentos da formação São Lourenço- Caripunas, sendo interpretada como Margem Direita. A integração desses dados permite caracterizar mais precisamente a região como embasamento rochoso. Alguns refletores internos, contrariando a ideia da não penetrabilidade da onda acústica (Dunbar *et al.*, 1999), podem indicar a presença de sedimentos. A presença de depósitos sedimentares nesse trecho é improvável, já que não há deposições em estruturas mais inclinadas do que 5°, conforme afirmam Flocks *et al.* (2014).

No trecho entre 300m aproximadamente e 900m (Figura 42c e Figura 42d), há refletores paralelos, sendo possível então classificar essa região como ecofácies E1. Os horizontes indicam contrastes entre diferentes períodos de deposições sedimentares. A variação da amplitude pode estar associada ao contraste de densidade dos sedimentos (Gasperini *et al.*, 2020) ou até à atenuação da onda acústica, principalmente, em reflexões mais profundas. É importante ressaltar que essa região (Figura 42b) é associada à área do Terraço Fluvial no modelo batimétrico interpretado (Figura 36)

No marco de 900m do perfil (Figura 42c e Figura 42d), verifica-se a presença de alguns refletores caóticos, associados às ecofácies E4. Além disso, a partir de 900m até o final do perfil (Figura 42c e Figura 42d), uma camada transparente foi verificada, sendo relativa às ecofácies E2. No final do perfil, diferentemente, há uma área com baixa penetração da onda acústica, sendo associada às ecofácies E6, devido ao ambiente plano. Assim como inferido para o perfil LLCJD (Figura 41), essa interface separa possivelmente os sedimentos em suspensão dos depósitos prévios.

Linha Transversal Jusante Cachoeira de Jirau 2.001 (LTJCJ2.001)

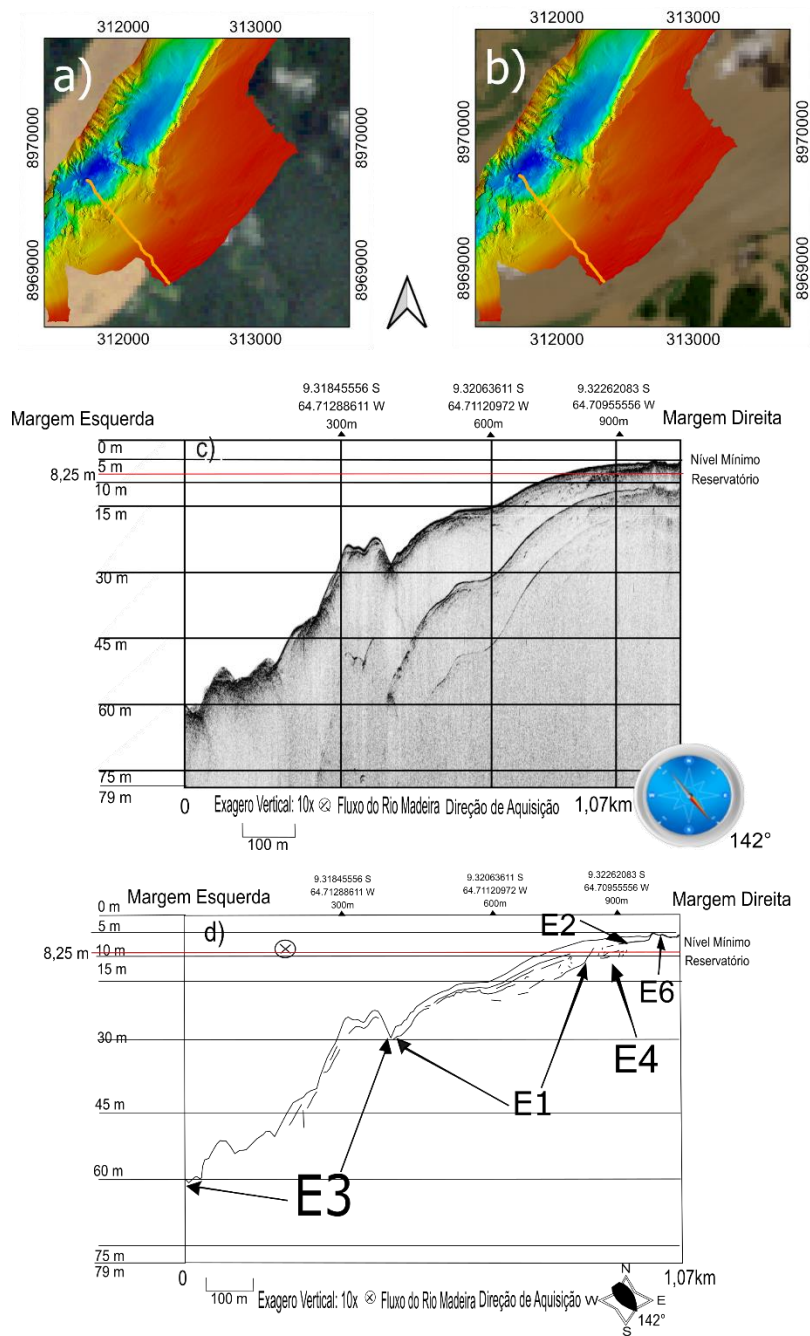


Figura 42 - Localização do Perfil Sísmico (LTJCJ2.001) representado pela linha laranja a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). Linha LTJCJ2.001 c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies presentes. Verifica-se o fluxo de rio Madeira, o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição de 142°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que considera-se o marco 0m como relativo ao nível de 90m.

5.2.2.6 Perfil Linha Longitudinal Jusante Cachoeira de Jirau Centro Direita 2 (LLJCJCD2)

Esse perfil tem extensão de 2,32 km. Anteriormente à implementação da barragem de Jirau, esse perfil estava, majoritariamente, na área referente à antiga margem direita do rio Madeira, como apontado na Figura 43a e Figura 43d (Figura 43a). Já, atualmente, esse perfil se encontra inteiramente no rio Madeira (Figura 43b). Verifica-se no modelo batimétrico, que essa região atravessa a área dos terraço fluvial (Figura 36).

Nos primeiros 300 m do perfil (Figura 43c e Figura 43d), verifica-se a presença de um refletor contínuo com amplitude elevada, com característica semelhante à vista nas ecofácies E2. Abaixo desse refletor, encontram-se feições caóticas, semelhantes às ecofácies E4. Esse refletor, possivelmente, contrasta deposições sedimentares características de ambientes de baixa energia (E2) com deposições relativas às áreas de mais alta energia (E4).

No trecho entre 300 e 600m (Figura 43c e Figura 43d), há uma estrutura aflorante, feição classificada como ecofácies E3.

No trecho entre 600m e, aproximadamente, 1,5 km (Figura 43c e Figura 43d), há a presença majoritária de feições caóticas, podendo ser associadas às ecofácies E4. Como já retratado anteriormente, essas feições são relacionadas a uma alta energia deposicional (Gasperini *et al.* 2020; McGlue e Woolery, 2022). Há, também, a presença de um ambiente referente às ecofácies E2, próximo ao marco de 900m (Figura 43c e Figura 43d). Além dessas informações, como inferido pela linha vermelha, essa área em determinados períodos do ano permanece exposta.

Além disso, a partir de 1,5 km (Figura 43c e Figura 43d), há uma região sem penetração da onda acústica, essa área foi associada às ecofácies E6, provavelmente, sendo um solo compactado. Nessa região, presume-se que não haja presença de sedimentos depositados. Esse trecho permanece emerso durante certos períodos do ano, já que está acima da linha vermelha, podendo assim o sedimento depositado ser varrido.

Linha Longitudinal Jusante Cachoeira de Jirau Centro Direita 2 (LLJCJCD2)

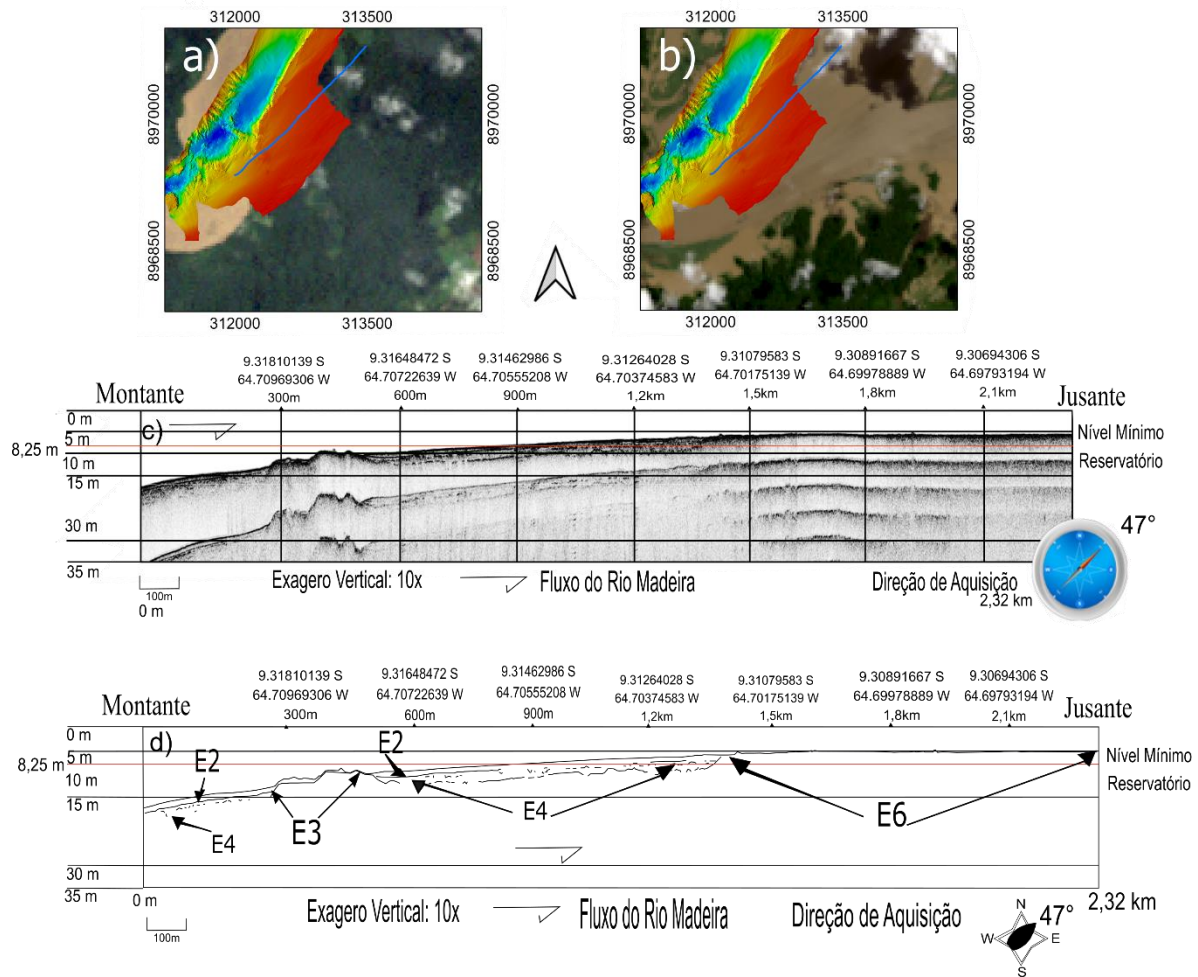


Figura 43 - Localização do Perfil Sísmico (LLJCJCD2) representado pela a linha azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). Linha LLJCJCD2 c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies presentes. Verifica-se o fluxo de rio Madeira, o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição de 47°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que considera-se o marco 0m como relativo ao nível de 90m.

5.2.2.7 Perfil Linha Longitudinal Jusante Cachoeira de Jirau Centro Esquerda 1 (LLJCJCE1)

Esse perfil esteve localizado no canal do rio Madeira no período anterior e posterior à implementação do barramento (Figura 44a e Figura 44b). Além disso, essa linha apresenta 1,01 km de extensão (Figura 44c e Figura 44d) e atravessa ambientes morfológicos variados, como verificado na Figura 44b. Nos primeiros 300 m do perfil (Figura 44c e Figura 44d), verifica-se presença de estruturas semelhantes que se enquadram nas ecofácies 3 (E3). Esse trecho, no modelo batimétrico interpretado, é

referente à área de estruturas inclinadas (Figura 36), assim, com base nessas informações presume-se que essa área apresente provavelmente feições rochosas (Figura 44c e Figura 44d).

No trecho entre 300 m e, aproximadamente, 900 m do perfil (Figura 44c e Figura 44d), houve classificação dessa área como ecofácies 5 (E5). Essas hipérboles indicam a presença de difrações em refletores pontuais, que podem estar associadas a sedimentos com granulometrias mais elevadas. Além disso, verifica-se que essa região é associada à região dos sulcos erosivos no modelo batimétrico (Figura 36).

Do marco de 900 m, aproximadamente, ao final do perfil (Figura 44c e Figura 44d), inicia-se a presença de um refletor contínuo, podendo ser associada às ecofácies E2, apresentando granulometrias mais finas (Gasperini et al., 2020). Essa região do perfil atravessa a área no modelo batimétrico relativa ao Talvegue com Sedimentos (Figura 36).

Linha Longitudinal Jusante Cachoeira de Jirau Centro Esquerda 1 (LLJCJCE1)

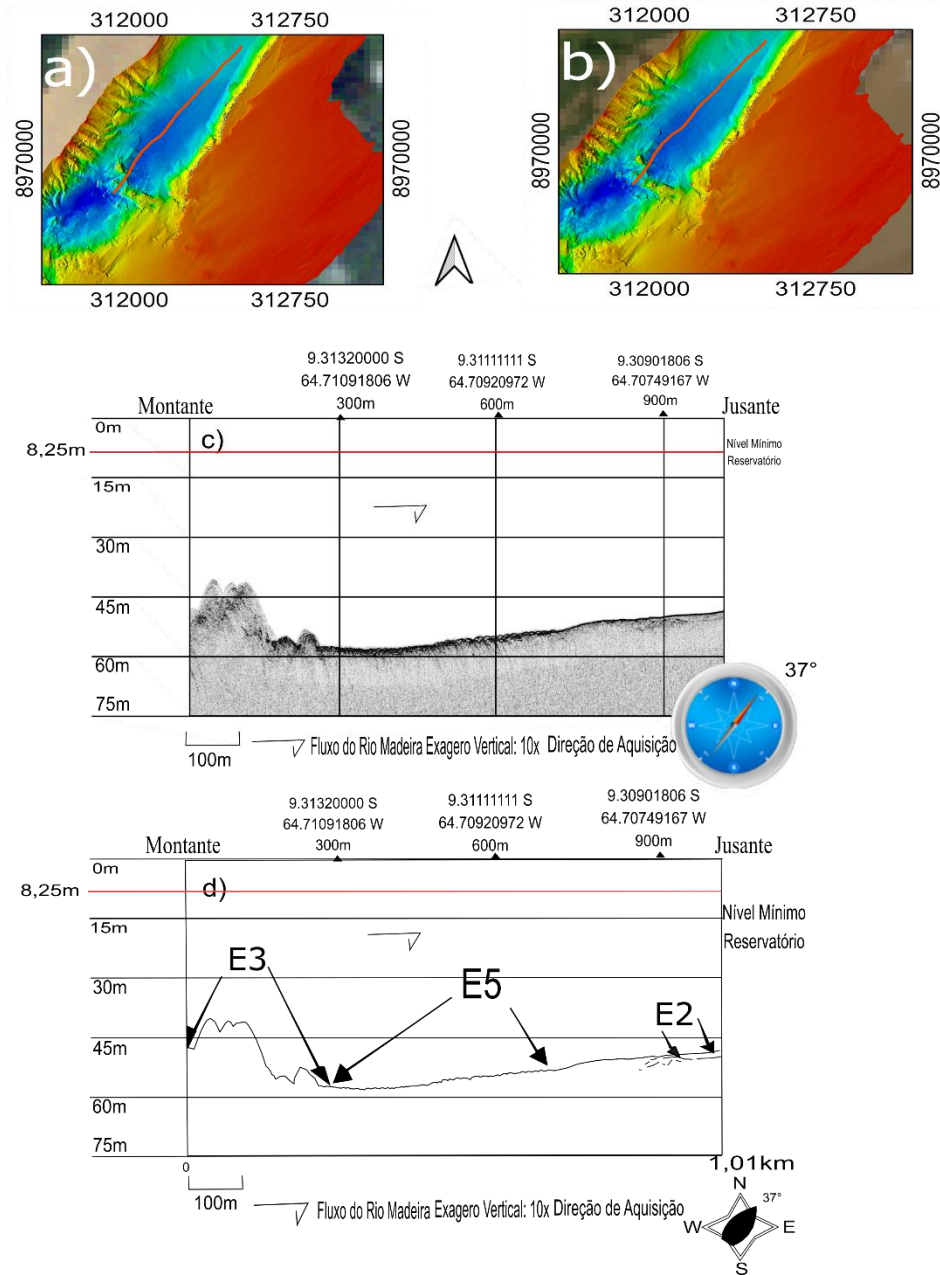


Figura 44 - Localização do Perfil Sísmico (LLJCJCE1) representado pela linha laranja. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S, b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). Linha LLJCJCE1 c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies presentes. Verifica-se o fluxo de rio Madeira longitudinal a linha do rio Madeira o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 37°. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m.

5.2.2.8 Perfil Linha Transversal Montante Área Central (LTMAC)

A LTMAC tem extensão de 2,23 km de comprimento. Anteriormente à implementação da barragem, esse perfil atravessava diferentes domínios morfológicos, se situando nas regiões do Canal do rio Madeira e da Margem direita do rio Madeira (Figura 45a). Atualmente, esse se encontra, inteiramente, na região do canal do rio (Figura 45b). Verifica-se nesse perfil uma variação morfológica, como descrito na Figura 45b.

Inicialmente, na região do Tavelgue com Sedimentos no modelo batimétrico (Figura 36), nos primeiros 300 m (Figura 45c e Figura 45d), identifica-se uma feição sísmica que pode ser associada às ecofácies E2. Além disso, nos primeiros 600m, são identificadas interfaces isoladas, presumindo-se que essas feições sejam referentes a estruturas rochosas. Já na região mais profunda do canal (Figura 45c e Figura 45d), no marco de 600 m aproximadamente, são identificadas feições associadas às ecofácies E1, mesmo que seja difícil de identificá-las na Figura 45c.

Entre 600 m e aproximadamente 800 m, no nível de 15m de profundidade (Figura 45c e Figura 45d), identifica-se uma região com alta refletividade da onda acústica, uma feição mais pontiaguda e fundo plano. Ressalta-se que esse trecho do perfil é associado à região demarcada como planície de inundação no modelo batimétrico (Figura 36). Essa feição é semelhante à classificada como uma planície de inundação pouco desenvolvida, como tratado por Briggs (2003), já que essa morfologia apresentaria sedimentos grossos e um *levee* mais pontiagudo.

No trecho entre 900 m até o final do perfil (Figura 45c e Figura 45d), em uma região com 5 m de profundidade aproximadamente, verificam-se, majoritariamente, feições caóticas (E4) em áreas com formato de canal e, também, regiões planas com baixa penetração da onda acústica, classificadas como ecofácies E6. Além dessas ecofácies, há no trecho entre 1,8 e 2,1km aproximadamente uma camada fina com feição típica das ecofácies E2, com uma região transparente, entre um refletor e o leito. No modelo batimétrico interpretado (Figura 36), esse trecho corresponde à área do Terraço Fluvial.

Linha Transversal Montante Área Central (LTMAC)

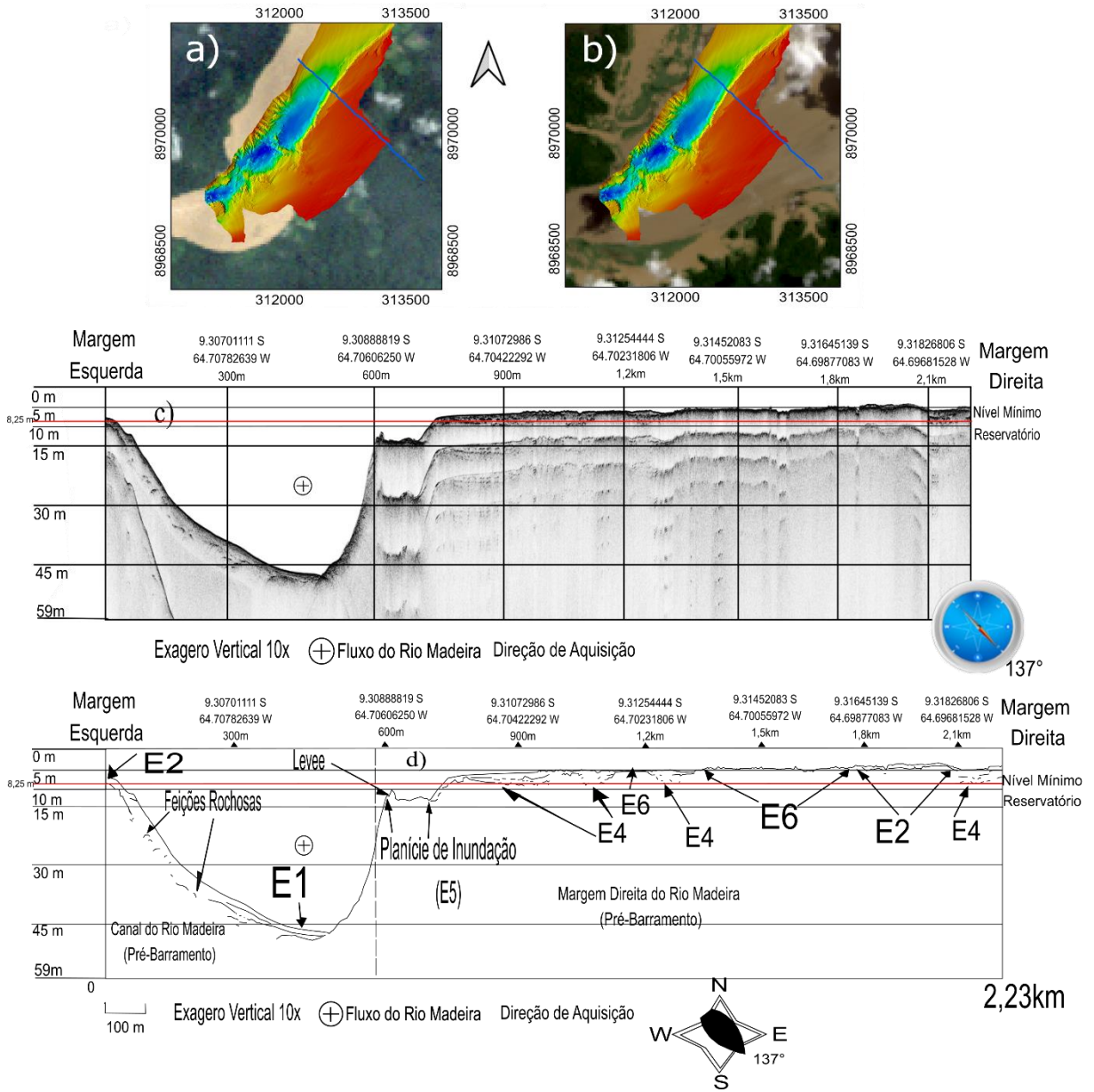


Figura 45 - Localização do Perfil Sísmico (LTMAC) representado pela linha azul. Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004) Fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). Linha LTMAC c) Processada d) Croqui apresentando as feições e as eco fácies presentes. Verifica-se o fluxo de rio Madeira transversal ao perfil sísmico, também, visualiza-se o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 137°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m.

5.2.2.9 Perfil Linha Longitudinal Área Central Centro (LLACC)

A LLACC possui 1,03 km de extensão. Esse perfil estava em uma região inundada desde da implementação da barragem de Jirau (Figura 46a e Figura 46b). Além disso, como verificado na Figura 46b, parte do perfil se encontra na região do Talvegue com sedimentos no modelo batimétrico interpretado (Figura 36).

Em todo o perfil (Figura 46c e Figura 46d), verificam-se interfaces paralelas entre si, com feições associadas às ecofácies E1, apresentando diferentes amplitudes e continuidades ao longo do perfil. A variação da amplitude pode estar relacionada ao contraste da granulometria dos sedimentos depositados e à atenuação da onda acústica, mais elevada em ambientes profundos do que os rasos. Além disso (Figura 46c e Figura 46d), verifica-se um refletor mais profundo que emerge ao longo do perfil. Esse refletor apresenta uma redução da sua profundidade de montante a jusante, simultaneamente, há um aumento gradual da amplitude desse horizonte. Essa interface pode representar o contraste entre os sedimentos recentes e as camadas prévias. Assim, os depósitos recentes seriam reduzidos ao longo do curso do rio, apresentando formato de cunha. Por fim, verifica-se que essas estruturas estão submersas mesmo durante o nível mais reduzido do reservatório, já que estão acima da linha vermelha.

Linha Longitudinal Área Central Centro (LLACC)

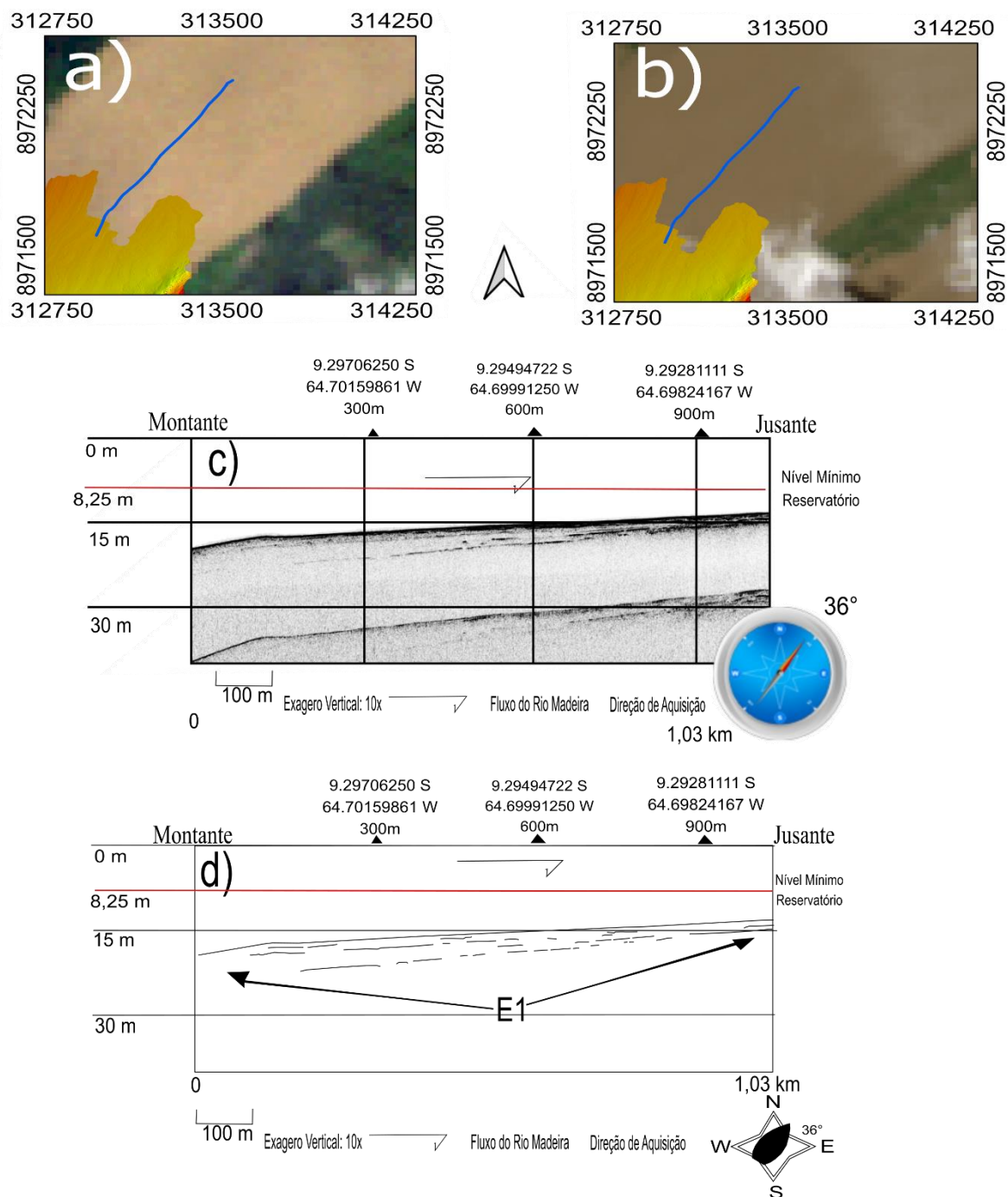


Figura 46 - Localização do Perfil Sísmico (LLACC) representado pela linha azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). Linha LLACC c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies presentes. Verifica-se o fluxo de rio Madeira longitudinal ao perfil sísmico, também, visualiza-se o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 36°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m.

5.2.2.10 Perfil Linha Longitudinal Área Central Centro 002 (LLACC.002)

O perfil LLACC.002 apresenta 1,32 km de comprimento. Como verificado na Figura 47a e Figura 47b, essa linha sempre esteve localizada na região do Canal do rio Madeira durante o período anterior e posterior à implementação da barragem de Jirau.

Além disso, como verificado nesse perfil (Figura 47c e Figura 47d), há a presença de dois domínios morfológicos distintos. Até 1 km, há a presença de topografia razoavelmente plana, já após esse marco, identifica-se feição com aclive acentuado.

No primeiros 800m do perfil, aproximadamente, (Figura 47c e Figura 47d), as feições presentes podem ser associadas às ecofácies E2. Já no trecho entre 800m e 1km aproximadamente, são identificadas feições associadas às ecofácies E1. Sobre as feições paralelas (E1), verifica-se a presença de refletores com amplitude elevada. Ressalta-se que o refletor de alta amplitude, provavelmente, demarque os sedimentos recentes das camadas depositadas previamente à implementação do reservatório.

No trecho entre 1,1 km, aproximadamente, e 1,32km, verifica-se um declive mais acentuado (Figura 47c e Figura 47d). Além disso, identifica-se um pequeno afloramento, feição que pode ser associada às ecofácies E3. Há dificuldade em inferir sobre a presença de ambientes sedimentares nessa região, já que como relatado por Flocks *et al.* (2014), em áreas com mais de 5° de inclinação dificilmente há deposição sedimentar.

5.2.2.11 Perfil Linha Transversal Montante Área Dique (LTMAD)

O terceiro perfil transversal (Figura 48a e Figura 48b) apresenta comprimento de 2,4 km. Esse perfil é próximo aos perfis adquiridos em Alves e Santos (2022) e Neto *et al.* 2018, sendo nomeado nessas pesquisas como SJ01. Neto *et al.* (2018) levantaram dados batimétricos monofeixes durante os anos de 2014 a 2017, já Alves e Santos (2022) adquiriram dados durante os anos de 2019 e 2020. Esses pesquisadores verificaram assoreamento nessa região.

Nessa linha, foram integrados dois perfis sísmicos (Figura 48c) com a finalidade de caracterizar o canal do rio Madeira mais adequadamente. Além disso, houve a inversão do perfil da esquerda para direita, diferentemente, do perfil, originalmente, exportado pelo *software*. Essa inversão foi realizada para comparar esse perfil batimétrico com as linhas presentes no banco de dados do projeto SPECTROSED, comparação realizada posteriormente.

Nos primeiros 300 m (Figura 48c e Figura 48d), há uma margem esquerda com declividade acentuada. No fundo do canal, há uma fina camada, podendo ser classificada como ecofácies E2.

Já a partir dos 300m (Figura 48c e Figura 48d), não se verificam mudanças consideráveis na profundidade do rio Madeira. Além disso, a partir do marco de 400 m, aproximadamente, verifica-se um refletor de alta amplitude e contínuo até o final do perfil. Além disso, quando se compara a topografia da área do canal em relação à linha LTMAC (Figura 45), identifica-se uma suavização da inclinação da margem direita do antigo canal do rio Madeira.

A camada entre o leito e o refletor apresenta feições relacionadas às eco fácies E1 e E2, havendo intercorrência entre essas feições. A presença de depósitos sedimentares indica conformidade com o observado nas pesquisas de Neto *et al.* 2018 e Alves e Santos (2022). Por fim, verifica-se que, atualmente, esse perfil tem algumas áreas emersas durante determinados períodos do ano, como verificado nas Figura 48c e Figura 48d.

Linha Transversal Montante Área Dique (LTMAD)

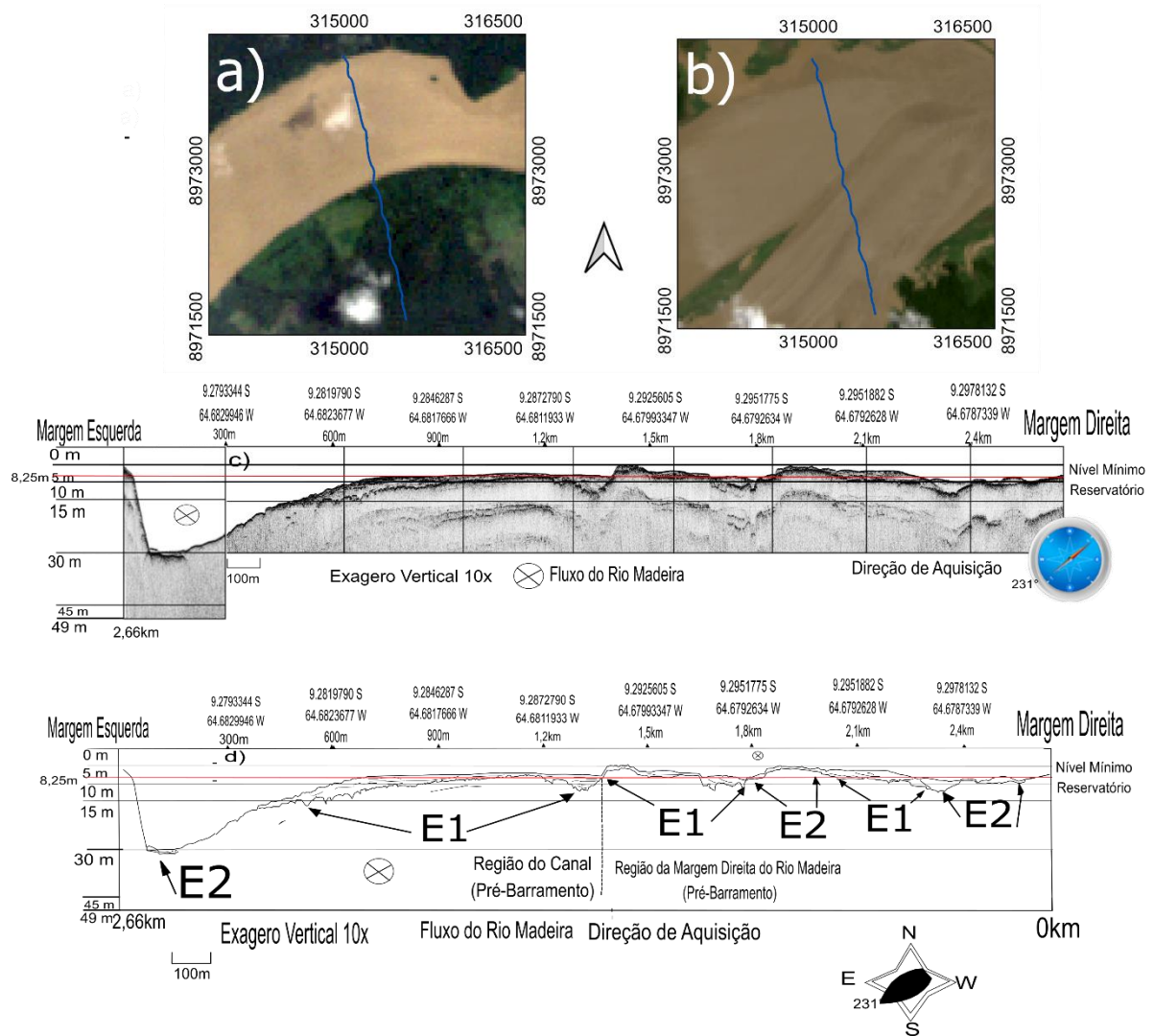


Figura 48 - Localização do Perfil Sísmico (LTMAD) representado pela linha azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021). Linha LTMAD c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies. Verifica-se o fluxo de rio Madeira transversal (entrando para dentro) à linha do rio Madeira o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 231°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m.

5.2.2.12 Perfil Linha Longitudinal Área Dique Direita (LLADD)

Esse perfil está localizado no canal do rio Madeira no período anterior e posterior à implementação da barragem (Figura 49a e Figura 49b). Como visto nas Figura 49a e Figura 49b, certa parte do perfil é representado no modelo batimétrico do Dique,

apresentando uma variabilidade morfológica. Verifica-se que, somente, os 300m iniciais do perfil permanecem emersos durante certos períodos do ano.

Inicialmente, nos primeiros 300 m do perfil (Figura 49c e Figura 49d), há a presença de uma área topograficamente elevada, relacionada às ecofácies E2. O refletor de alta amplitude diferencia os sedimentos recentes das camadas de sedimento anteriores à implementação do reservatório, como interpretado para outros perfis LLACC.002 (Figura 47) e LTMAD (Figura 48).

Semelhante ao encontrado na LLACC.002 (Figura 47), há um desnível acentuado nesse perfil, entre 300 e 600m (Figura 49c e Figura 49d). Presume-se que essas regiões sejam compostas de feições rochosas. Já aproximando-se de 600m, diferentemente, o leito do rio Madeira apresenta alta amplitude, sendo esse substrato relacionado às ecofácies E3 e assim a um ambiente rochoso plano.

No trecho entre 600 m e, aproximadamente, 1 km (Figura 49c e Figura 49d), verifica-se a presença das ecofácies E1, com horizontes descontínuos. Presume-se que haja uma camada de sedimentos sobre um refletor que, possivelmente, se apresenta como continuidade do horizonte relativo ao afloramento (E3).

A partir de 1,2 km (Figura 49c e Figura 49d), verifica-se a presença de uma região mais profunda e plana, apresentando alta refletividade, sendo associada às ecofácies E3. Essa região é, também, associada à Leito Fluvial Profundo e dos Sulcos Erosivos no modelo batimétrico interpretado do Dique (Figura 38). Infere-se que haja uma alta velocidade de fluxo, não apresentando sedimentação. Além dessa feição plana, verificam-se feições inclinadas com alta refletividade, sendo associadas ao elevado rochoso no modelo batimétrico (Figura 38).

Linha Longitudinal Área Dique Direita (LLADD)

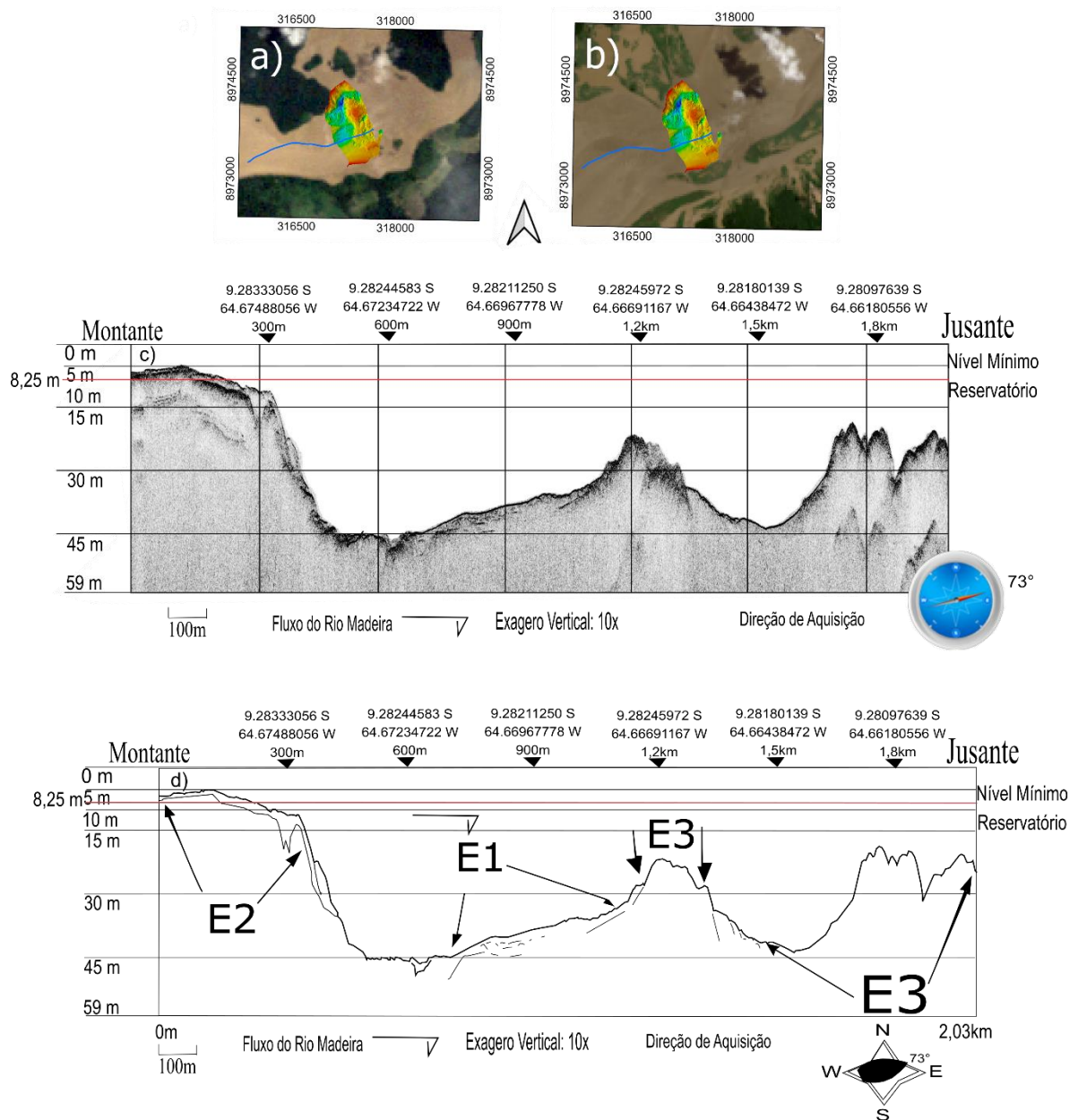


Figura 49 - Localização do Perfil Sísmico (LLADD) representado pelo perfil azul. a) Localização da linha na imagem do período pré-barramento (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período pós-barramento (02/04/2021) Fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S. Linha LLADD c) Processada d) Croqui apresentando os refletores e feições. Verifica-se o fluxo de rio Madeira longitudinal a linha do rio Madeira o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 73°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m.

5.2.2.13 Perfil Linha Transversal Dique 4 (LTD4)

Esse perfil tem 1,29 km de extensão. A região desse perfil sempre foi no Canal do rio Madeira (Figura 50a Figura 50b), porém no período anterior ao barramento do rio Madeira, havia algumas ilhas nessa área (Figura 39.). Atualmente, somente as partes iniciais e finais do perfil ainda permanecem emersas em períodos de menor nível do reservatório (Figura 50b). Esse perfil está presente no modelo batimétrico do Dique, atravessando diversos ambientes morfológicos.

Nos primeiros 900 m do perfil (Figura 50c e Figura 50d), verificam-se estruturas inclinadas com alta refletividade, sendo associadas à ecofácies E3. No modelo batimétrico interpretado (Figura 38), esse trecho é associado à região da Margem Direita e do Estruturas Elevadas.

No trecho entre 900 e 1,2 km do perfil (Figura 50c e Figura 50d), há uma região mais profunda, plana, com alta refletividade, que pode ser associada à ecofácies E3. Há também estruturas inclinadas. No modelo batimétrico, essa área é associada à região denominada LeitoFluvial Profundo. Infere-se assim, como realizado para o perfil LLADD (Figura 49), que essa região apresente um alto fluxo de água, não havendo deposição sedimentar.

A partir de 1,2 km, aproximadamente, até o final do perfil (Figura 50c e Figura 50d), há alguns refletores paralelos ao leito do rio Madeira, formando uma fácies sísmica semelhante à ecofácies E2, principalmente, em regiões mais planas. Já em regiões mais inclinadas, houve certa dificuldade em caracterizar os refletores como sedimentos, devido à alta inclinação da estrutura. Em regiões com mais de 5°, como observado em Flocks *et al.* (2014), não há deposição sedimentar. No modelo batimétrico, essa área é associada à região da Margem Esquerda.

Linha Transversal Dique 4 (LTD4)

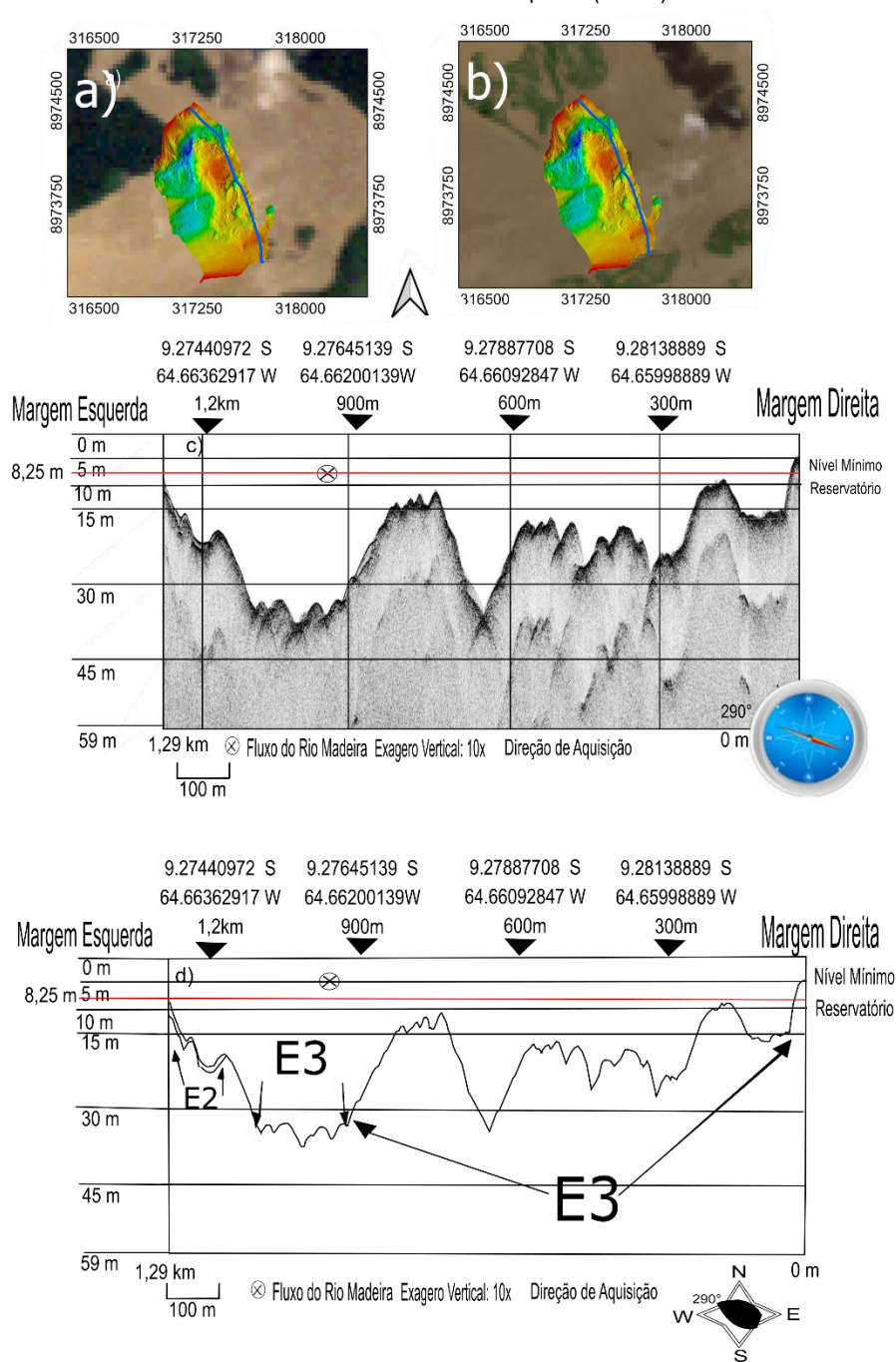


Figura 50 - Localização do Perfil Sísmico (LTD4) representado pelo perfil azul. a) Localização da linha na imagem do período anterior à implementação da barragem (02/03/2004), fonte: USGS e sistema de referência do mapa: UTM 20S b) Localização da linha na imagem do período posterior à implementação da barragem (02/04/2021). Linha LTD4 c) Processada d) Croqui apresentando as eco fácies. Verifica-se o fluxo de rio Madeira transversal a linha do rio Madeira o exagero vertical de 10x e a direção de aquisição do perfil de 290°. As linhas de 5 e 10m foram criadas pelo autor no software Inkscape com base na escala vertical. A linha vermelha indica o nível mínimo do reservatório: 8,25m de profundidade, já que se considera o marco 0m como relativo ao nível de 90m.

5.3 Discussão dos Resultados Obtidos

A aplicação das técnicas de batimetria multifeixe e de perfilagem sísmica de alta resolução com a fonte de tipo CHIRP permitiu a caracterização morfológica e estratigráfica de determinado trecho do reservatório de Jirau, localizado entre a atualmente submersa Cachoeira de Jirau (CJ) e a área com a presença de diques artificiais, próximo à barragem de Jirau.

Inicialmente, os resultados obtidos pelas duas técnicas apresentam boa correlação entre uns aos outros, possibilitando, assim, reduzir as ambiguidades encontradas para cada abordagem. Uma dessas congruências é evidenciada pela presença de estruturas com topografia mais acentuada no modelo batimétrico e trechos com feições inclinadas e alto contraste de amplitude nos perfis sísmicos, como pode ser visto nas linhas LTJCJ2 (Figura 42), LLJCJCE1 (Figura 44) e LTD4 (Figura 50), feições relacionadas provavelmente a formação São Lourenço-Caripunas. Além das estruturas rochosas, verificou-se, principalmente no perfil sísmico LTMAC (Figura 45) e no modelo batimétrico do Canal, uma planície de inundação com pequena extensão e, conseqüentemente, pouco desenvolvida. Essas estruturas seriam relativas às planícies com baixo desenvolvimento (Bridge, 2003), comprovando a descrição de Campos e Teixeira (1988) *apud* Souza Filho *et al.* (1999). O rio Madeira nessa região apresenta feição morfológica de vale encaixado. Outra correlação foi inferida entre regiões com sulcos erosivos e substratos rochosos no leito do rio, não havendo, provavelmente, deposição de sedimentos devido ao fluxo elevado de água.

Outra inferência foi acerca da dinâmica dos sedimentos em suspensão ao longo da área de estudo. Nesta pesquisa, houve a verificação de que a quantidade majoritária de sedimentos depositados é associada à área com maior inundação, ou região da Área Central (AC), como nomeada nesta pesquisa. Já em áreas próximas à região da antiga cachoeira ou do Dique, regiões com estruturas rochosas, inferiu-se uma baixa deposição de sedimentos. Além desses fatores, verifica-se que em algumas partes do rio Madeira, o leito é exposto em determinados períodos do ano.

Em relação às áreas que apontavam depósitos de sedimentos, com a presença das ecofácies E1, E2, E4 e E5, essas estariam relacionadas a ambientes deposicionais diferentes.

A ecofácies E5 é presente no perfil LLJCJCE1 (Figura 44). Essa feição é relacionada ao substrato do leito do rio Madeira com presença de hipérboles. Como relatado na Tabela 3, essas feições são produzidas a partir de difrações em refletores pontuais. Em regiões profundas, leitos com grãos de areia, blocos rochosos podem ser considerados pontuais, uma vez que a profundidade é relacionada à área ensonificada, princípio semelhante ao caracterizado na Figura 15. Em relação à interpretação realizada, presume-se que esses sedimentos apresentem granulometria mais grossa.

As feições caóticas, relativas às ecofácies E4, são visualizadas em parte nos perfis LLCJD (Figura 41) e LTJCJ2.001 (Figura 42), porém, principalmente, nos perfis LLJCJCD2 (Figura 43) e LTMAC (Figura 45). As fácies caóticas são retratadas como resultantes de deposições de alta energia nas pesquisas de Gasperini *et al.* (2020) e McGlue e Woolery (2022), porém caracterizadas em outros contextos. Infere-se que para esta pesquisa esses depósitos possam estar relacionados a inundações abruptas, como a cheia de 2014, descrita em Oliveira *et al.* (2021). Além disso, essas fácies podem ser resultado de alterações antrópicas na região da antiga margem do rio Madeira. Essa hipótese pode ser evidenciada, já que essas feições são presentes na antiga margem, como visto nas linhas LLJCJCD2, LTJCJ2.001 e LTMAC principalmente. Reitera-se, também, que as feições caóticas são presentes em estruturas de canal no perfil LTMAC (Figura 45). Essas, feições podem estar emersas durante determinados períodos do ano.

As feições paralelas, relativas às ecofácies E1, são visualizadas, majoritariamente, nos perfis próximos à Área Central (AC), indicando um ambiente deposicional de mais baixa energia. Há, também, esses refletores em linhas próximas à Cachoeira de Jirau (CJ). Como visto nos perfis LTMAC (Figura 45), LLACC (Figura 46), LLACC.002 (Figura 47) e LTMAD (Figura 48), o Rio Madeira, previamente, nessa região, já havia, no período anterior ao barramento, um aumento da área do rio Madeira quando comparada à largura do rio na região da Cachoeira. Atualmente, há uma inundação

mais proeminente invadindo a área do antigo terraço (Figura 36). Assim, possivelmente, já havia propensão à deposição de sedimentos nessa área. Porém, uma maior expansão levou a um aumento nessa quantidade. Já em relação à amplitude das interfaces das ecofácies E1, refletores com elevadas amplitudes encontrados nos perfis LLACC, LLACC.002 e LTMAD podem ser associados ao contraste elevado entre as granulometrias de diferentes pulsos sedimentares.

As feições associadas às ecofácies E2, normalmente, estão relacionadas a deposições sedimentares de baixa energia, porém diferentemente das ecofácies E1 são homogêneas, sem contraste entre granulometrias diferentes. Nos resultados, há feições transparentes entre um refletor de alta amplitude e o leito do rio Madeira, apresentando espessuras variadas, que podendo ser associadas a sedimentos finos como visto nos perfis LTMAD, LLADD por exemplo.

Além da classificação das fácies sísmicas, houve a demarcação de um refletor que, possivelmente, indicaria o contraste entre os sedimentos recentes e a camada prévia. A demarcação desse refletor foi realizada baseando-se em alguns fatos: o primeiro é relativo à alta amplitude da interface, indicando, provavelmente, o contraste de impedância acústica dos sedimentos recentes e as camadas anteriores. Outro fato é relacionado à continuidade desses refletores em regiões sem a presença de sedimentos (Ecofácies (E6) ou com baixa concentração, verificando-se certa concomitância com o leito do rio Madeira, como verificado na linha LTMAC (Figura 45) e LTMAD (Figura 48). A caracterização desse refletor permitiu identificar uma redução gradual da camada de sedimentos, conforme visualizado na linha LLACC (Figura 46).

A demarcação precisa dessa interface é importante para se obter a espessura dos sedimentos assoreados e, conseqüentemente, a taxa de assoreamento. Essa taxa seria obtida com base na divisão da espessura dessa camada em relação ao período da implementação da barragem. Para fundamentar a demarcação do refletor, procurou-se correlacionar esse refletor demarcado no software com curvas batimétricas de anos anteriores para datá-lo. Assim, utilizaram-se os dados do perfil LTMAD para comparar com as medidas das linhas SJ01. Para realizar a comparação de forma mais coerente, foram utilizadas como base curvas do período de maior nível do reservatório (Fevereiro, Março e Abril dos anos de 2014 a 2020), mostradas na

Figura 51. Apesar disso, somente a curva de 2020 apresentou maior correlação com os perfis desta pesquisa (Figura 52b). A curva de 2015 (Figura 52a) apresentou proximidade com o refletor próximo ao marco de 1500 m, porém, revelou discordância considerável em alguns pontos. Essas diferenças podem estar relacionadas ao processo de redução das curvas. Assim, esses empecilhos dificultaram a obtenção do valor da taxa de assoreamento.

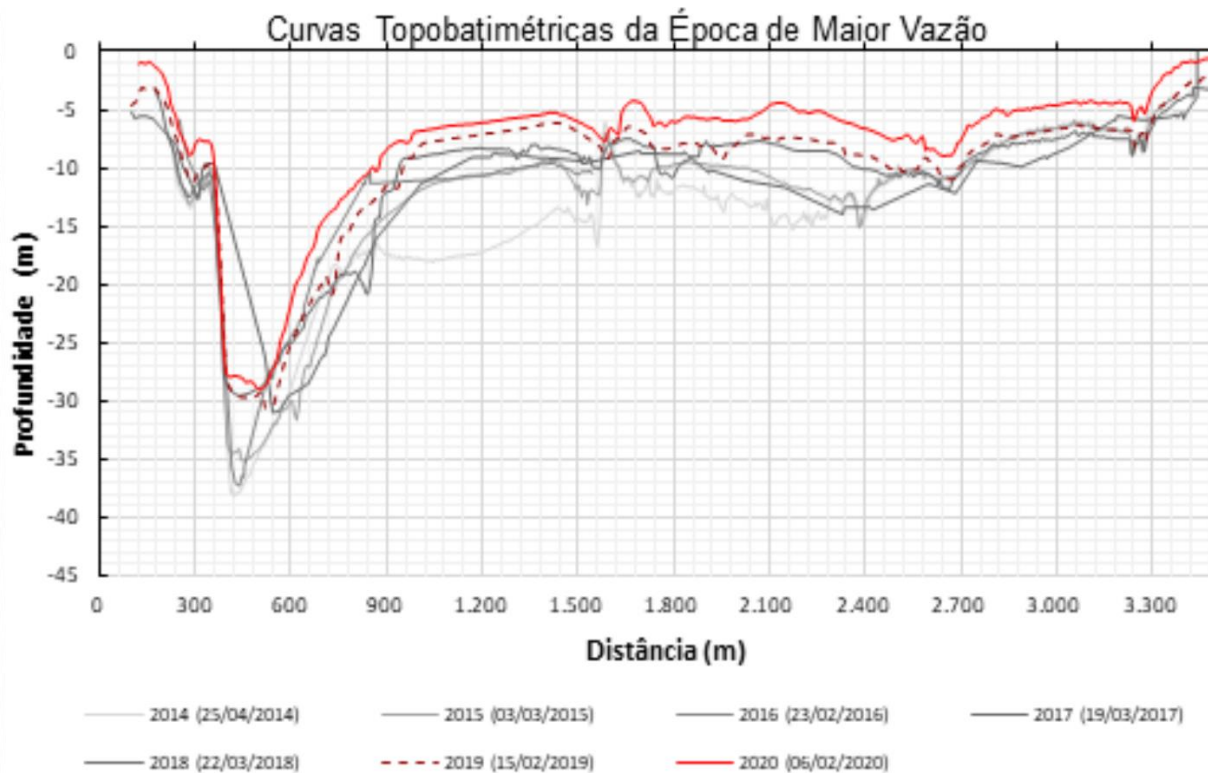


Figura 51 - Curvas topobatimétricas dos períodos de maior vazão do rio Madeira do ano de 2014 até 2020.

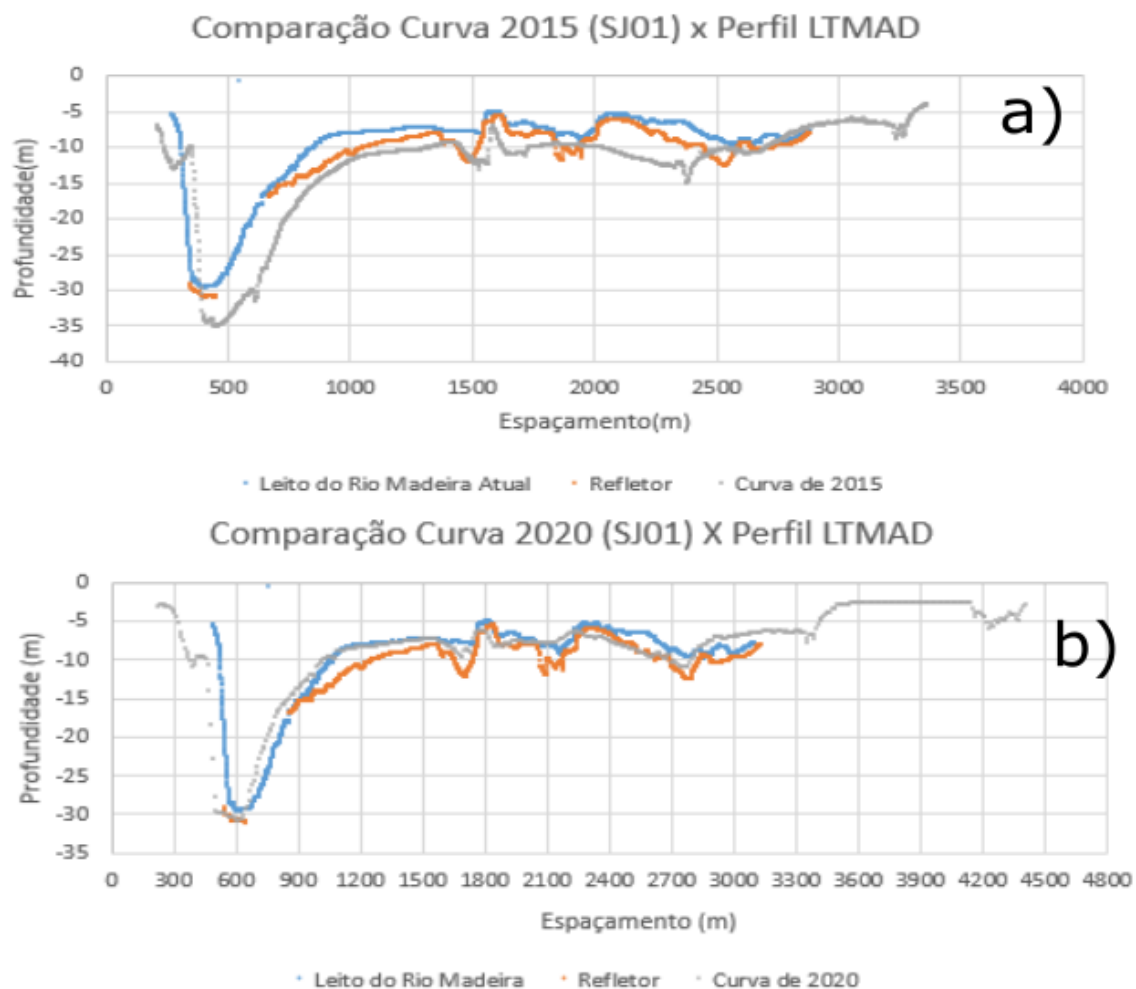


Figura 52 - a) Comparação da curva de 2015 com os horizontes do Leito do rio Madeira e do Refletor de Alta Amplitude obtidos pela linha sísmica. b) Comparação da curva de 2020 com os horizontes do leito do rio Madeira e do Refletor de Alta Amplitude

Além da demarcação do refletor, foi realizada a comparação dos dados da SSC da média anual de 2021 da área de estudo com os dados obtidos nesta pesquisa. A finalidade é fundamentar a caracterização da dinâmica dos sedimentos. A Figura 53 retrata a SSC somente na região do canal do rio Madeira, que permanece inundada durante o ano inteiro, uma vez que o dado é relativo à média anual.

Sobre a dinâmica dos sedimentos em suspensão, a Figura 53 evidencia a hipótese da ressuspensão de sedimentos na região da Cachoeira de Jirau e do Dique, associada com áreas de variabilidade morfológica acentuada, uma vez que se observa um alto valor de SSC em ambas as regiões. Em geral, verifica-se um aumento do SSC nas regiões referentes aos paredões rochosos e sulcos erosivos, quando se compara a

Figura 53a com a Figura 53b. Diferentemente, na região do terraço, no modelo batimétrico e da Área Central é evidente a deposição dos sedimentos.

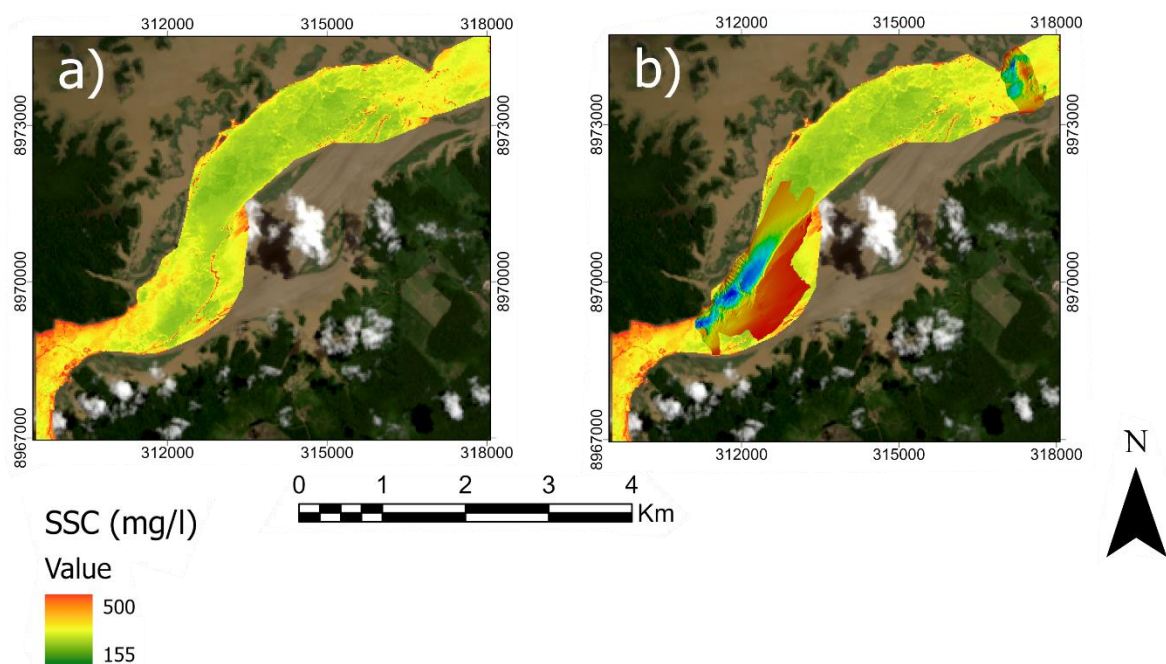


Figura 53 - a) Média do SSC (mg/l) durante o ano de 2021 para área de estudo b) Média de SSC com modelos batimétricos obtidos em cima dos valores de SSC.

5.4 Considerações Finais

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, houve a caracterização do assoreamento na barragem de Jirau. Essa descrição foi obtida pela análise morfológica e estratigráfica da região entre a Cachoeira de Jirau (CJ) e a região do Dique. A partir dos resultados obtidos, foi possível observar a distribuição de sedimentos depositados, utilizando-se para a análise também dados de concentração de sedimentos em suspensão, obtidos por sensoriamento remoto.

A aplicação do eco batímetro multifeixe ODOM MB1 foi eficaz na caracterização morfológica nos modelos do Canal e do Dique. Na área do Canal, identificaram-se estruturas como Paredões Rochosos e Sulcos Erosivos, que estariam relacionadas a áreas com fluxo mais elevado de água e, conseqüentemente, deposição reduzida de sedimentos. A partir do modelo batimétrico, também, foi possível caracterizar a estrutura de vale encaixado do canal do rio Madeira. Uma planície de inundação pouco desenvolvida como já retratado por Souza Filho *et al.* (1999), também, foi aferida a partir do modelo do Canal. Na região do Dique, descreveu-se uma área com baixa deposição de sedimentos, como foi evidenciado pelos perfis sísmicos (LTD4 e LLADD) e pela média anual do SSC ao longo da área de estudo.

A aplicação do equipamento Edgetech SB126S também foi eficaz na caracterização morfológica e estratigráfica da área de estudo. A inferência da concentração de sedimentos em suspensão com base na estrutura e amplitude das feições encontradas foi coerente com o encontrado nas informações batimétricas e, também, na SSC da região. Um fato que evidencia esse argumento é a deposição de sedimentos na área de estudo e a correlação desses dados na variação do SSC na Área Central do reservatório. Portanto, a partir dos resultados obtidos, foi possível discretizar as regiões mais vulneráveis ao assoreamento reservatório de Jirau.

A obtenção da taxa de assoreamento não foi possível, como já ressaltado na discussão de resultados, devido, principalmente, à dificuldade em datar os refletores observados nos perfis sísmicos. Como já retratado na discussão, as curvas batimétricas antigas da linha SJ01 destoaram dos horizontes interpretados por LTMAD. A curva de 2020 apresentou coerência, porém, ainda destoou em alguns

pontos. Já a curva de 2015 mostrou proximidade com o refletor próximo a 1,5km, mas apresentou diferenças consideráveis em todos os outros pontos. A compreensão da taxa de assoreamento permitiria prever o volume de sedimento que seria depositado nos próximos anos. Todavia, presume-se que as camadas sedimentares observadas foram formadas após o fechamento do barramento de Jirau, sendo, portanto, de recente formação.

A partir correlação dos sedimentos em suspensão, obtidos por técnicas de sensoriamento remoto em investigações anteriores, e dos sedimentos assoreados, estimados pelas técnicas multifeixe e da perfilagem sísmica de alta resolução nesta pesquisa, é possível analisar: a) a diminuição da carga em suspensão na parte central do reservatório, que corresponde à região onde as linhas sísmicas evidenciaram a presença de camadas sedimentares; b) a ressuspensão de sedimentos que ocorre nas regiões onde há as variações morfológicas mais abruptas, normalmente devido à presença de altos rochosos, como na região da cachoeira de Jirau e do Dique. Essa relação fundamenta as interpretações realizadas sobre a presença de sedimentos, já que na região onde se verificava uma redução de sedimentos em suspensão, há, simultaneamente, uma deposição de sedimentos. Antagonicamente, há feições que não indicam depósitos de sedimentos em áreas que apresentam altos valores de SSC.

A caracterização da superfície e da sub-superfície por meio das metodologias acústicas já mostrou eficácia nos ambientes lacustres, fluviais e de reservatório. Essa eficácia levou à escolha dessas abordagens para estimar o assoreamento no reservatório de Jirau e o potencial efeito sobre o transporte do rio Madeira, principal contribuinte do rio Amazonas. Por fim, essas abordagens permitiram compreender o fluxo de sedimentos a partir de informação de informações do leito e das camadas rasas. A compreensão obtida nesta pesquisa fundamenta a aplicação para barragens a fio d'água, que são reservatórios com áreas de inundações reduzidas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMY, A.; ROMANINI, S. J. **Geologia_Porto_Velho_Abuna.pdf**. Brasília: [s.n.] 1990. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/8305>>. 1990
- ALMEIDA, R. M. et al. **Limnological effects of a large Amazonian run-of-river dam on the main river and drowned tributary valleys**. Scientific Reports, v. 9, n. 1, p. 1 –11, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53060-1>
- ALMEIDA, R. M. et al. **Reducing greenhouse gas emissions of Amazon hydropower with strategic dam planning**. Nature Communications, v. 10, n. 1, 9p.2019. : <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12179-5>
- ALMEIDA, R. P. DE et al. **Large barchanoid dunes in the Amazon River and the rock record: Implications for interpreting large river systems**. Earth and Planetary Science Letters, v. 454, p. 92–102, 2016. : <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.08.029>
- ALVES E SANTOS, D. R. **Caracterização dos Padrões de Transporte Sedimentar no Reservatório da Usina Hidrelétrica de Jirau Através De Sensoriamento Remoto Utilizando Imagens Sentinel-2**. [s.l.] University of Brasilia, 2022.
- ANNANDALE, W. G.; MORRIS, L. G.; KARKI, P. **Extending the Life of Reservoirs**. Washington, DC: [s.n.]. 2016. ISBN: 9781464808388
- BARBOSA, F. DE A. DOS R. et al. **Relatório Técnico: Levantamento Batimétrico do Rio Madeira: Região Próxima ao Bairro Triângulo CPRM**. Porto Velho: [s.n.]. (2014) Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16669>. Visitado no dia 22/03/2022
- BARBOSA, F. DE A. DOS R. et al. **Relatório técnico: Levantamento Batimétrico do Rio Madeira. Porto Velho: (2015) [s.n.]. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/16712> >. Visitado no dia 22/03/2022**
- BASTOS, W. R. et al. **Dynamics of Hg and MeHg in the Madeira River basin (Western Amazon) before and after impoundment of a run-of-river hydroelectric dam**. Environmental Research, v. 189, n. May, 2020. : <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109896>
- BEJARANO, M. D. et al. **Tradeoff between economic and environmental costs and benefits of hydropower production at run-of-river-diversion schemes under different**

environmental flows scenarios. Journal of Hydrology, v. 572, n. March, p. 790–804, 2019.
: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.048>

BETTENCOURT, J. S. et al. **Metallogenic systems associated with granitoid magmatism in the Amazonian Craton: An overview of the present level of understanding and exploration significance.** Journal of South American Earth Sciences, v. 68, p. 22–49, 2016. : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2015.11.014>

BONTHIUS, C., **A Megariver under Threat: the Construction and Environmental Impacts of Dams on the Madeira River in Brazil, in Context of the Fluvial Geomorphology. Unpublished (Master's thesis).** The graduate School of The University of Texas at Austin, Austin, Texas. 166p, 2013. Disponível em < <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/31909>> Visitado em 23/03/2022

BRASIL, ELETROBRÁS (Centrais Elétricas do Brasil). **Plano 2010: Relatório Geral. Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010 (Dezembro de 1987)** ELETROBRÁS, Brasília, DF, Brazil. 100p, 1987. Disponível em < https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/anexo/and96652-88.pdf> Visitado em 18/03/2022

BRIDGE, J. S. **Rivers and Floodplains. Forms, processes, and sedimentary Records.** New York, Blackwell, 2003. ISBN 0-632-06489-7

BRIERLEY, G. J.; FERGUSON, R. J.; WOOLFE, K. J. **What is a fluvial levee?** Sedimentary Geology, v. 114, n. 1–4, p. 1–9, 1997. : [http://dx.doi.org/10.1016/S0037-0738\(97\)00114-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0037-0738(97)00114-0)

BUSCOMBE, D.; GRAMS, P. E.; KAPLINSKI, M. A. **Characterizing riverbed sediment using high-frequency acoustics: 1. Spectral properties of scattering.** Journal of Geophysical Research F: Earth Surface, v. 119, n. 12, p. 2674–2691, 2014. : <http://dx.doi.org/10.1002/2014JF003189>

CAMPOS, J. N. P.; TEIXEIRA, L. B. **Estilo tectônico da Bacia do Baixo Amazonas.** SBG. In: Congresso Brasileiro de Geologia. 1988. p. 2161-2172.

CARPIO, J.M. **Hidrologia e Sedimentos**, 23p, 2008. IN: Muddy Waters: impacts of damming the Amazon's Principal Tributary. International Rivers, 2008. Disponível em < <https://archive.internationalrivers.org/pt-br/resources/%C3%A1guas-turvas-alertas-sobres-as-conseq%C3%BC%C3%AAncias-de-barrar-o-maior-afluente-do-amazonas-3967>> Visitado em 20/03/2022

- CAZANA CLI, D.; SMITH, N. D. **A study of morphology and texture of natural levees- Cumberland Marshes, Saskatchewan, Canada.** *Geomorphology*, v. 25, n. 1–2, p. 43–55, 1998. : [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00032-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00032-4)
- CISNEROS, J. et al. **Dunes in the world’s big rivers are characterized by low-angle lee-side slopes and a complex shape.** *Nature Geoscience*, v. 13, n. 2, p. 156–162, 2020.: <http://dx.doi.org/10.1038/s41561-019-0511-7>
- COCHRANE, S. M. V. et al. **Landsat-based analysis of mega dam flooding impacts in the Amazon compared to associated environmental impact assessments: Upper Madeira River example 2006–2015.** *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 7, n. April, p. 1–8, 2017. : <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2017.04.005>
- CSIKI, S.; RHOADS, B. L. Hydraulic and geomorphological effects of run-of-river dams. **Progress in Physical Geography**, v. 34, n. 6, p. 755–780, 2010. : <http://dx.doi.org/10.1177/0309133310369435>
- DORIA, C. R. C. *et al.* **Understanding impacts of dams on the small-scale fisheries of the Madeira River through the lens of the Fisheries Performance Indicators.** *Marine Policy*, v. 125, n. November 2020, p. 104261, 2021. : <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.104261>
- DOS SANTOS, M. V. *et al.* **Morfologia fluvial e dinâmica de sedimentos: análise dos efeitos a jusante do complexo hidrelétrico do rio Madeira.** *Confins*, 15p. n. 46, 2020.: <https://doi.org/10.4000/confins.30852>
- DUNBAR, J. A.; ALLEN, P. M.; HIGLEY, P. D. **Multifrequency acoustic profiling for water reservoir sedimentation studies.** *Journal of Sedimentary Research*, v. 69, n. 2, p. 518–527, 1 mar. 1999. : <https://doi.org/10.2110/jsr.69.518>
- DUNNE, T. *et al.* **Exchanges of sediment between the flood plain and channel of the Amazon River in Brazil.** *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 110, n. 4, p. 450–467, 1998. **ISSN:** 0016-7606
- EAKIN, H.M; Brown, C.B; **Silting of Reservoirs.** Technical Bulletin No.524. K States Department of Agriculture, Washington, DC. 226p . Disponível em < <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT86200519/PDF> >. Visitado em 28/03/2022

- EDGETECH. **3100-P Portable Sub Bottom. User Hardware Manual**. EDGETECH. 66p. 2015. Disponível em https://www.edgetech.com/wp-content/uploads/2019/07/0004802_Rev_F.pdf . Visitado em 20/06/2022
- ESPINOZA VILLAR, R. *et al.* **A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images**. Journal of South American Earth Sciences, v. 44, p. 45–54, 2013. : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2012.11.006>
- FEARNSIDE, P. M. Brazil's Balbina Dam: Environment versus the legacy of the Pharaohs in Amazonia. **Environmental Management**, v. 13, n. 4, p. 401–423, 1989. : <http://dx.doi.org/10.1007/BF01867675>
- FEARNSIDE, P. M. **Hydroelectric Dams in the Brazilian Amazon as Sources of 'Greenhouse' Gases**. Environmental Conservation, v. 22, n. 1, p. 7–19, 1995. : <http://dx.doi.org/10.1017/S0376892900034020>
- FEARNSIDE, P. M. **Impacts of Brazil's Madeira River Dams: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia**. Environmental Science and Policy, v. 38, n. October, p. 164–172, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2013.11.004>
- FERRARI, LW.R. **Reconnaissance techniques for reservoir surveys**. PROCEEDINGS of the Eight Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC), n. April, p. 981–989, 2006. Disponível em < https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/mands-pdfs/ReconnaissanceTechniqueResSurveys04-2006_508.pdf>. Visitado no dia 10/03/2022
- FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. **Suspended sediment yields in the Amazon basin: An assessment using the Brazilian national data set**. Hydrological Processes, v. 23, n. 22, p. 3207–3215, 2009. : <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7394>
- FLOCKS, B. J. *et al.* **Seismic Profile Analysis of Sediment Deposits in Brownlee and Hells Canyon Reservoirs Near Cambridge**. U.S. Geological Survey Open-File Report 2014–1019, 14 p.: <https://doi.org/10.3133/ofr20141019>
- FÖEGER, L. B. *et al.* **Large-scale sediment modeling with inertial flow routing: Assessment of Madeira river basin**. Environmental Modelling and Software, v. 149, n. October 2021, 2022.: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105332>
- FREIRE, L.; LIMA, J.; SILVA, E. **Belo Monte: fatos e impactos envolvidos na implantação da usina hidrelétrica na região Amazônica Paraense**. Sociedade & Natureza, v. 30, n. 3, p. 18–41, 2019. : <https://doi.org/10.14393/sn-v30n3-2018-2>

- GASPERINI, L. *et al.* **Morphotectonics and late Quaternary seismic stratigraphy of Lake Garda (Northern Italy).** *Geomorphology*, v. 371, p. 107427, 2020.: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107427>
- GEO MARINE SURVEY SYSTEMS. **Geo Suite All Works 2020R2 Ultra High-Resolution Seismic Data Processing Interpretation and 3D Visualization Software.** User Manual (Revised 2020). Last Modified 2021.
- GIBBS, R. J. **The Geochemistry of the Amazon River System: Part I. The Factors that Control the Salinity and the Composition and Concentration of the Suspended Solids.** *GSA Bulletin*, v. 78, n. 10, p. 1203–1232, 1 out. 1967. ISSN: 0016-7606
- GUYOT, J. L. *et al.* **Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon.** IAHS-AISH Publication, v. 236, n. January, p. 55–63, 1996. ISSN 01447815
- GUYOT, J.L. (1993). **Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne.** Collection Etudes et Thèses, ORSTOM Paris, 251 p. Disponível em < https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_2/etudes_theses/38760.pdf> Visitado em 31/05/2022.
- HARJANNE, A.; KORHONEN, J. M. **Abandoning the concept of renewable energy.** *Energy Policy*, v. 127, n. September 2018, p. 330–340, 2019. : <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.029>
- HAYAKAWA, E. H.; ROSSETTI, D. F.; VALERIANO, M. M. **Applying DEM-SRTM for reconstructing a late Quaternary paleodrainage in Amazonia.** *Earth and Planetary Science Letters*, v. 297, n. 1–2, p. 262–270, 2010. : <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.06.028>
- IANNIRUBERTO, M. *et al.* **A field study of the confluence between Negro and Solimões Rivers. Part 2: Bed morphology and stratigraphy.** *Comptes Rendus -Geoscience*, v. 350, n. 1–2, p. 43–54, 2018. : <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2017.10.005>
- IGREJA, H. L.S.; CATIQUE, J. **Análise Neotectônica do Lineamento de Itacoatiara Centro-Leste do Estado do Amazonas.** In: VI SIMP. NAC. DE ESTUDOS. Tectônicos. Pirenópolis-GO. SBG/JG-UNB, p. 131-133. 1997.

- IRADUKUNDA, P.; BWAMBALE, E. **Reservoir sedimentation and its effect on storage capacity—A case study of Murera reservoir, Kenya**. Cogent Engineering, v. 8, n. 1, 2021. : <http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2021.1917329>
- JACKSON, D. R., e M. D. RICHARDSON, **High-Frequency Seafloor Acoustics**. Springer, New York. Jackson, 2007.442p. : <https://doi.org/10.1007/978-0-387-36945-7>
- JIANG, X. et al. **Examining impacts of the Belo Monte hydroelectric dam construction on land-cover changes using multitemporal Landsat imagery**. Applied Geography, v. 97, n. May, p. 35–47, 2018. : <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.05.019>
- JOHNSON, G. . et al. **Hydroacoustic Evaluation of Juvenile Salmonid Passage at The Dalles Dam Sluiceway** , 2005. Pacific Northwest National Laboratory, v. 1, n. May, p. 102, 2006. Disponível em https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-15540.pdf. Visitado no dia 17/03/2022.
- KEAREY, P et al. **An Introduction to Geophysical Exploration**. Blackwell. Third Edition. 2002. ISBN: 978-0-632-04929-5
- KELLY-RICHARDS, S. et al. **Governing the transition to renewable energy: A review of impacts and policy issues in the small hydropower boom**. Energy Policy, v. 101, n. November 2016, p. 251–264, 2017. : <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.035>
- KURIQI, A. et al. **Ecological impacts of run-of-river hydropower plants—Current status and future prospects on the brink of energy transition**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 142, n. February, 2021.: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.110833>
- KURIQI, A. et al. **Flow regime aspects in determining environmental flows and maximizing energy production at run-of-river hydropower plants**. Applied Energy, v. 256, p. 113980, 2019. : <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113980>
- KURIQI, A. et al. **Trade-off between environmental flow policy and run-of-river hydropower generation in Mediterranean climate**. European Water, v. 60, n. July, p. 123–130, 2017. : <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23257.21608>
- LA ROVERE, E.L.. Mendes, F.E.. **Tucuruí Hydropower Complex, Brazil, A WDC Case Study Prepared as an Input to the World Commission on Dams**. World Commission on Dams, Cape Town, 2000. Disponível em <
<https://archive.internationalrivers.org/sites/default/files/attached-files/csbrmain.pdf>>. Visitado em 19/03/2022

- LAFFERTY, B.; QUINN, R.; BREEN, C. **A side-scan sonar and high-resolution Chirp sub-bottom profile study of the natural and anthropogenic sedimentary record of Lower Lough Erne, northwestern Ireland.** Journal of Archaeological Science, v. 33, n. 6, p. 756–766, 2006. . : <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.10.007>
- LATRUBESSE, E. M. et al. **Damming the rivers of the Amazon basin.** Nature, v. 546, n. 7658, p. 363–369, 2017. : <https://doi.org/10.1038/nature22333>
- LEBLANC, L. R. et al. **Marine sediment classification using the chirp sonar.** Journal of the Acoustical Society of America, v. 91, n. 1, p. 107–115, 1992.: <https://doi.org/10.1121/1.402758>
- LEE, S.; CHO, M.; LEE, C. **An effective gap interpolation and filtering (GIF) method for landsat 7 ETM+ SLC-off Data.** Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, v. 27, n. 6, p. 921–932, 2016. <https://doi.org/10.3319/TAO.2016.07.18.02> :
- LEME ENGENHARIA LTDA. **Aproveitamentos Hidrelétricos Santo Antônio e Jirau”, Estudo de Impacto Ambiental – EIA.** 191p. 2005
- LI, D. et al. **Examining water area changes accompanying dam construction in the Madeira River in the Brazilian Amazon.** Water (Switzerland), v. 12, n. 7, 2020. : <https://doi.org/10.3390/w12071921>
- LI, S. et al. **Automatic Detection of Pipelines from Sub-bottom Profiler Sonar Images.** IEEE Journal of Oceanic Engineering, v. 47, n. 2, p. 417–432, 2022.: <https://doi.org/10.3390/w12071921>
- LOKIN, L. R. et al. **River Dune Dynamics during Low Flows.** Geophysical Research Letters, v. 49, n. 8, p. 1–9, 2022. : <https://doi.org/10.1029/2021gl097127>
- LUNA, Denise. Cronologia – **Facões, artistas e contradições cercam Belo Monte.** Reuters, São Paulo, 2010. Disponível em <https://www.reuters.com/article/negocios-energia-belomonte-cronologia-idBRSPE63I0QO20100419> . Acesso em: 20 de Março de 2022
- MAHMOOD, K. **Reservoir sedimentation: impact, extent, and mitigation.** Technical paper. United States: N. p., 1987. Web.
- MAINA, C. W. et al. **Sediment distribution and accumulation in Lake Naivasha, Kenya over the past 50 years.** Lakes and Reservoirs: Research and Management, v. 24, n. 2, p. 162–172, 2019. <https://doi.org/10.1111/lre.12272>

- MARINEAU, M. D.; WRIGHT, S. A.; LOPEZ, J. V. **Storage capacity and sedimentation characteristics of the San Antonio Reservoir, California, 2018**. Scientific Investigations Report. [s.l.: s.n.]. Disponível em: < <https://pubs.er.usgs.gov/publication/sir20195151> >. Visitado em 10/04/2023
- MARTINELLI, L. A. et al. **Suspended sediment load in the Madeira river**. Transport of Carbon and Nutrients in Lakes and Estuaries, Part 6 SCOPE/UNEP Sonderband.41-51. Hamburg: 1993
- MARTINEZ, J. M. et al. **Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data**. Catena, v. 79, n. 3, p. 257–264, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.011>
- MCGEE, T. M. **High-resolution marine reflection profiling for engineering and environmental purposes Part B: Digitizing analogue seismic signals**. Journal of Applied Geophysics, v. 33, n. 4, p. 287–296, 1995. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90047-0](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90047-0)
- MCGLUE, M. M.; WOOLERY, E. W. **High-resolution seismic profiling reveals basin floor morphology, sedimentary processes, and shallow stratigraphy at Convict Lake (California, USA)**. Quaternary International, v. 621, n. June 2019, p. 37–49, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.09.014>
- MEADE, R. H. **SUSPENDED SEDIMENT IN THE AMAZON RIVER AND ITS TRIBUTARIES IN BRAZIL** U.S. GEOLOGICAL SURVEY Open-File Report 85-492 Prepared in cooperation with the Denver, Colorado. Atlantic, p. 1–44, 1985. Disponível em <https://pubs.usgs.gov/of/1985/0492/report.pdf>> Visitado no dia 12/05/2022
- MEADE, R. H. et al. **Storage and remobilization of suspended sediment in the lower amazon river of Brazil**. Science, v. 228, n. 4698, p. 488–490, 1985. <https://doi.org/10.1126/science.228.4698.488>
- MEADE, R. H. **Suspended sediments of the modern Amazon and Orinoco rivers**. Quaternary International, v. 21, n. C, p. 29–39, 1994. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(94\)90019-1](https://doi.org/10.1016/1040-6182(94)90019-1)
- MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE RÔNDONIA (MPRO). **Relatório de Análise dos Conteúdos dos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) dos Aproveitamentos Hidrelétricos de Santo Antonio e Jirau, no**

- Rio Madeira**, Estado de Rôndônia. Cobrape- Cia. Brasileira de Projetos e Empreendimentos. Dezembro, 2006
- MIZE, S. V. et al. **Suspended-sediment concentrations and loads in the lower Mississippi and Atchafalaya rivers decreased by half between 1980 and 2015**. Journal of Hydrology, v. 564, n. April 2017, p. 1–11, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.068>
- MOLINIER, M. et al. **Hydrologie Du Bassin De L'Amazone. M.** Grands Bassins Fluviaux, p. 22–24, 1993.
- NETO, P. DE S. G.; SOUTO, C. DA S. S.; DA TRINDADE, P. A. **A Evolução De Seções De Controle Hidrossedimentológico No Rio Madeira No Período De 2014 a 2017**. XIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Anais...2018. Disponível em < <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=4059>> Visitado no dia 29/03/2022
- NITTROUER, J. A. et al. **The lowermost Mississippi River: A mixed bedrock-alluvial channel**. Sedimentology, v. 58, n. 7, p. 1914–1934, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2011.01245.x>
- OLIVEIRA, W. L. et al. **Mega-dams and extreme rainfall: Disentangling the drivers of extensive impacts of a large flooding event on Amazon Forests**. PLoS ONE, v. 16, n. 2 February, p. 1–25, 2021. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0245991>
- PESTANA, I. A. et al. **The impact of hydroelectric dams on mercury dynamics in South America: A review**. Chemosphere, v. 219, p. 546–556, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.035>
- PINHEIRO, J. A. C. P. et al. Relatório técnico: Levantamento Batimétrico do Rio Madeira III. Porto Velho: [s.n.]. Disponível em: < <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16614>>; Visitado no dia 22/03/2022
- PLOSKEY,G et al. **Optimization of Hydroacoustic Deployments at John Day Dam. United States: N. p., 2002.** 44p Disponível em https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-14062.pdf
Visitado no dia 17/03/2022
- RESERVOIR. **Education. National Geography**, 2023. Disponível em < <https://education.nationalgeographic.org/resource/reservoir/>> Acesso no 08/05/2023
- REYNOLDS, J.M. **An Introduction to Applied Geophysics**. Second Edition. Wiley-BlackWell.712p.ISBN 978-0-471-48535-3 (hardback) 978-0-471-485360 (paperback). 2011

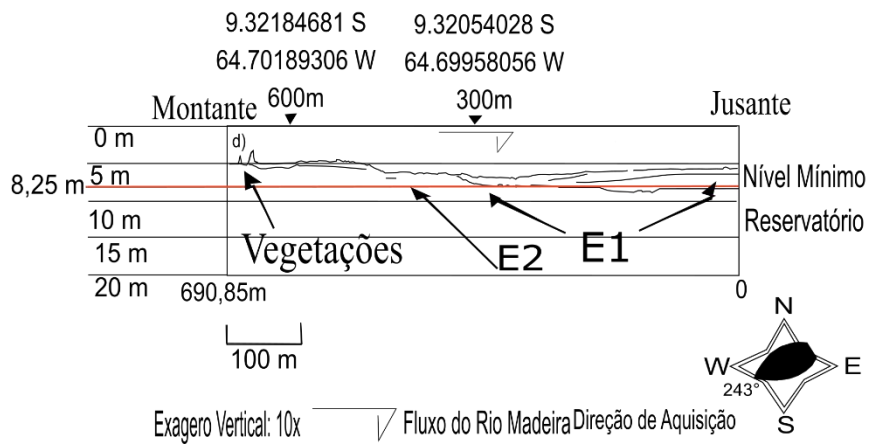
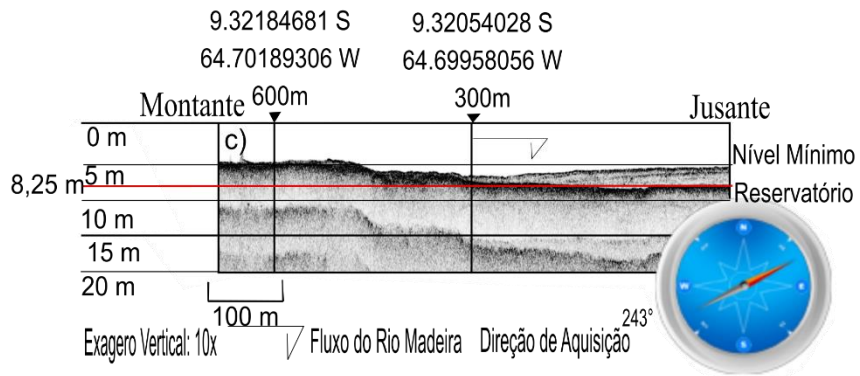
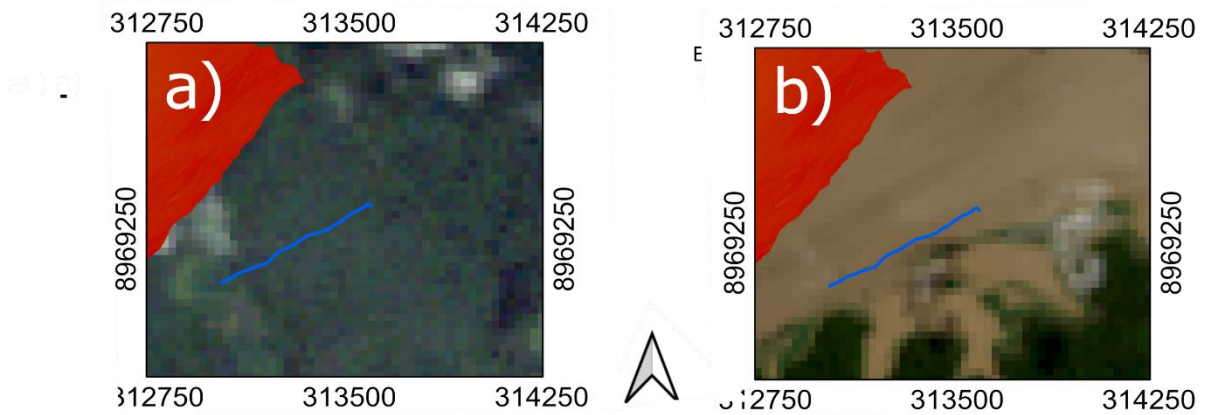
- RIVERA, I. A. et al. **Decline of fine suspended sediments in the Madeira River basin (2003-2017)**. Water (Switzerland), v. 11, n. 3, 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/w11030514>
- RIZOTTO, G. J. et al. Projeto Rio Madeira: Levantamento de Informações para Subsidiar o Estudo de Viabilidade do Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) do Rio Madeira AHE Jirau Relatório Final. Porto Velho: [s.n.]. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/15522/2/Relatorio_AHE_JIRAU.pdf> Visitado em 25/05/2023
- RONDEAU, B., Cossa, D., Gagnon, P. and Bilodeau, L. (2000), **Budget and sources of suspended sediment transported in the St. Lawrence River, Canada**. Hydrol. Process., 14:21-36. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(200001\)14:1<21::AID-HYP907>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(200001)14:1<21::AID-HYP907>3.0.CO;2-Z)
- ROSSETTI, D. F. **The role of tectonics in the late Quaternary evolution of Brazil's Amazonian landscape**. Earth-Science Reviews, v. 139, p. 362–389, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.009>
- ROSSI, L.; MAMMI, I.; PELLICCIA, F. **UAV-derived multispectral bathymetry**. Remote Sensing, v. 12, n. 23, p. 1–20, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12233897>
- SARTAIN, S. **Impacts of Mining and Dam-Building on the Sediment Flux of the Madeira River in the Amazon River Basin.2021**. Bachelor Arts of Earth Sciences. Hannover, New Hampshire. Disponível em < https://cpb-us-e1.wpmucdn.com/journeys.dartmouth.edu/dist/a/5442/files/2021/09/Sartain_thesis.pdf> . Visitado no dia 30/03/2022
- SAVINI, A.; CORSELLI, C. **High-resolution bathymetry and acoustic geophysical data from Santa Maria di Leuca Cold Water Coral province (Northern Ionian Sea-Apulian continental slope)**. Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, v. 57, n. 5–6, p. 326–344, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.08.014>
- SEABEAM. **Multibeam Sonar Theory of Operation L-3 Communications SeaBeam Instruments**. L-3 Communications SeaBeam, p. 107, 2000. Disponível em < <https://www3.mbari.org/data/mbsystem/sonarfunction/SeaBeamMultibeamTheoryOperation.pdf>> Visitado em 15/04/2022
- SHERIFF, R.E; GELDART, L.P. **Exploration Seismology**. Cambridge University Press. Second Edition. 0-521-46826-4. 624p.1995. . ISBN 0-521-46282-7.

- SOTIRI, K. et al. **Implementation of comparative detection approaches for the accurate assessment of sediment thickness and sediment volume in the Passaúna Reservoir.** Journal of Environmental Management, v. 287, n. February, p. 1-2698, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112298>
- SOUZA FILHO, P. W. M. E. et al. **Compartimentação Morfoestrutural E Neotectônica Do Sistema Fluvial Guaporé-Mamoré-Alto Madeira, Rondônia-Brasil.** Revista Brasileira de Geociências, v. 29, n. 4, p. 469–476, 1999. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1999294469476>
- SOUZA, L. A. P. DE. **Revisão crítica da aplicabilidade dos metodos geofisicos na investigação de areas submersas rasas.** Tese de Doutorado. São Paulo (SP) p. 311, 2006. Disponível em <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21133/tde-30102006-171206/publico/TESE_Laps_2006.pdf> Visitado em 15/04/2022
- SWITKES, G., 2008. **Muddy Waters: impacts of damming the Amazon's Principal Tributary. International Rivers.** Disponível em: <https://archive.internationalrivers.org/pt-br/resources/%C3%A1guas-turvas-alertas-sobre-as-conseq%C3%BC%C3%AAs-de-barrar-o-maior-afluente-do-amazonas-3967> Visitado em 20/03/2022
- TELEDYNE ODOM HYDROGRAPHIC. **MB1 HARDWARE MANUAL** Version 1.8. Baton Rouge, Louisiana. 2013. 37p < http://www.a2marinesolution.com/manual/Manual_MB1.pdf > Visitado em 20/06/2022
- TUCCI, C. E. M. **ANÁLISE DOS ESTUDOS AMBIENTAIS DOS EMPREENDIMENTOS DO RIO MADEIRA.** Sumário. p. 1–19, 2007 < http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Dossie/Mad/Outros%20documentos/tucci.pdf> Visitado em 19/03/2022
- UNITED NATIONS (UN). **The Energy Challenge for Achieving the Millennium Development Goals.** UN-Energy.20p.2005 Disponível em < https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/The%20Energy%20Challenge%20for%20Achieving%20the%20MDGs_2005.pdf > Visitado em 25/03/2023
- VAUCHEL, P. et al. **A reassessment of the suspended sediment load in the Madeira River basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, based on 10 years of data from the HYBAM monitoring programme.** Journal of Hydrology, v. 553, p. 35–48, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.018>

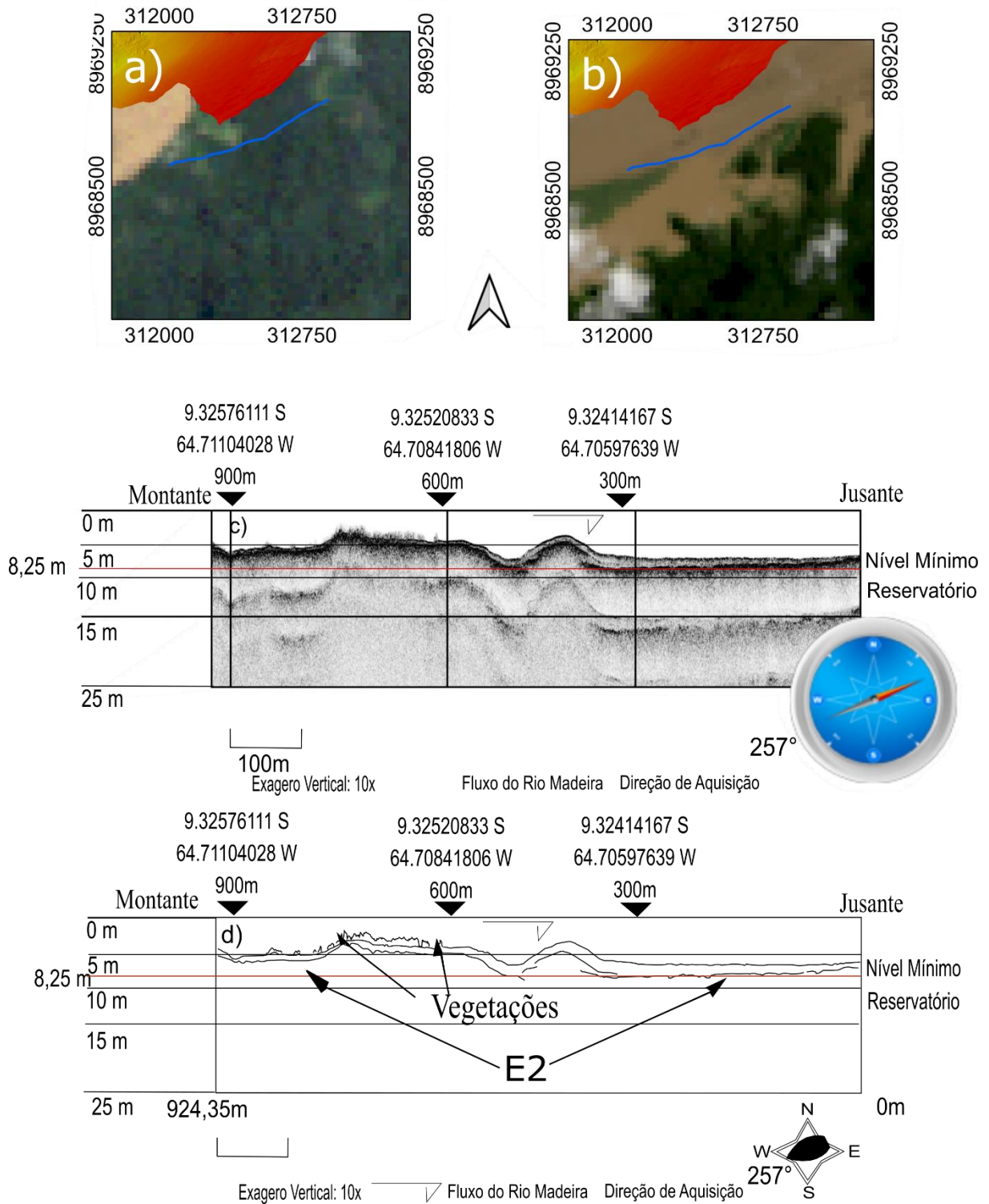
- VERBEEK, N. H.; MCGEE, T. M. **Characteristics of high-resolution marine reflection profiling sources**. Journal of Applied Geophysics, v. 33, n. 4, p. 251–269, 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90045-4](http://dx.doi.org/10.1016/0926-9851(95)90045-4)
- WANG, Y. et al. **Impacts of large dams on the complexity of suspended sediment dynamics in the Yangtze River**. Journal of Hydrology, v. 558, p. 184–195, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.027>
- .WATERFALL. **Education. National Geography**, 2023. Disponível em <<https://education.nationalgeographic.org/resource/waterfall>>Acesso no dia 16/05/2023
- WEIT, A. et al. **Combined usage of geophysical methods in continental water bodies, their benefits and challenging issues: A special focus on sediment deposits in dam reservoirs**. Journal of Applied Geophysics, v. 213, n. February, p. 105036, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105036>
- What are the band designations for the Landsat satellites? **USGS**,2022 <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites>. Visitado em 29/03/2023
- What is Landsat 7 ETM+ SLC-off data?.**USGS**, 2022. <https://www.usgs.gov/faqs/what-landsat-7-etm-slc-data>. Visitado em 29/03/2023
- WORLD COMMISSION ON DAMS (WDC). **Dams and Development**. Earthscan Publishers, London, 446p, 2000. <https://doi.org/10.4324/9781315541518>
- ZOEPPRITZ, K. **“Erdbebenwellen vii”, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse**. Tese de Doutorado.

7. APÊNDICE

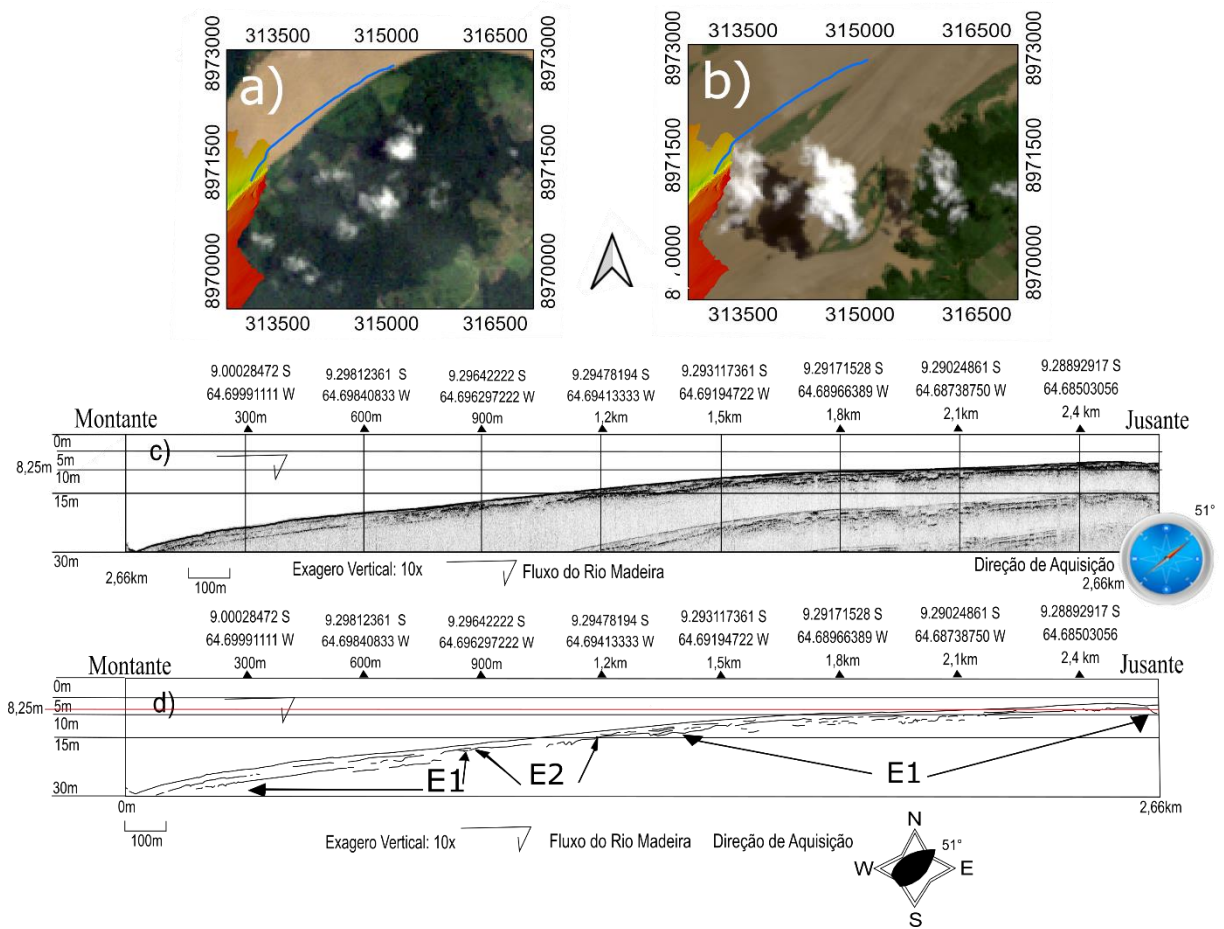
Linha Longitudinal Jusante Cachoeira de Jirau Direito (LLJCJD)



Linha Longitudinal Jusante Cachoeira de Jirau Direito.002 (LLJCJD.002)



Linha Longitudinal Área Central Direita (LLACD)



Linha Longitudinal Montante Área Dique Centro (LLMADC)

