

LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO DO RIO MADEIRA

REGIÃO PRÓXIMA AO BAIRRO TRIÂNGULO



Residência de Porto Velho - REPO

**Porto Velho - Rondônia
2014**

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL

RELATÓRIO TÉCNICO

***LEVANTAMENTO BATIMÉTRICO DO RIO MADEIRA:
REGIÃO PRÓXIMA AO BAIRRO TRIÂNGULO***

Residência de Porto Velho - REPO

PORTO VELHO
Novembro/2014

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro de Estado

Edison Lobão

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

Diretor Presidente

Manoel Barretto da Rocha Neto

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial

Thales de Queiroz Sampaio

Chefe do Departamento de Hidrologia - DEHID

Frederico Cláudio Peixinho

RESIDÊNCIA DE PORTO VELHO - REPO

Chefe da Residência

Helena da Costa Bezerra

Coordenador Executivo

Ruy Benedito Calliari Bahia

Assistente de Produção da Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial

Francisco de Assis dos Reis Barbosa

CRÉDITOS

Equipe Técnica

Francisco de A dos Reis Barbosa – Pesquisador em Geociências – M Sc.

Franco Turco Buffon – Pesquisador em Geociências – Especialista

Paulo Correa Gramacho – Técnico em Geociências

Sebastião Rodrigues Bezerra – Técnico em Geociências

Wladimir Ribeiro Gomes – Técnico em Geociências

Apoio

Terceirizados da CPRM

Fábio Silva de Carvalho - Auxiliar de campo

Joab Figueiredo dos Santos – Alimentador de Dados

Ludimila Cavalcante Neves de Moraes - Alimentadora de Dados

Manoel Junior Vale Nascimento - Auxiliar de campo

Estagiários

Guilherme Jordão Cardoso – Estudante de Engenharia Civil

Lohanna Damasio Ugo - Estudante de Engenharia Civil

Foto da Capa

Vista aérea do rio Madeira na cidade de Porto Velho por Francisco Barbosa
(Data: Abril/2014)

SUMÁRIO

1.	APRESENTAÇÃO	1
2.	INTRODUÇÃO	2
3.	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	3
4.	ÁREA DE ESTUDO	4
4.1	Bacia Hidrográfica do rio Madeira até Porto Velho.....	4
4.2	Localização do bairro Triângulo	5
4.3	Análise da cheia de 2014	5
5.	METODOLOGIA UTILIZADA	7
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	9
6.1	Levantamentos batimétricos (Seção – Torres de Energia).....	9
6.2	Levantamentos batimétricos (Campanha de campo – abril de 2013)	15
6.3	Análise das medições (Campanha de campo – abril de 2013)	16
6.4	Levantamentos batimétricos (Campanha de campo – outubro de 2014) ...	21
6.5	Análise das Medições (Campanha de campo – outubro de 2014)	22
7.	CONSIDERAÇÕES	29
8.	RECOMENDAÇÕES	32
9.	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	33

FIGURAS

Figura 1 – Alterações que sofre um rio a jusante de barragem (Alvarez, 1986 citado por Carvalho, 2008).	3
Figura 2 – Localização das estações da CPRM/REPO na bacia hidrográfica do rio Madeira. 4	
Figura 3 – Localização da área de estudo (Imagem do Google Earth).....	5
Figura 4 – Série histórica de cotas máximas anuais da estação Porto Velho (15400000).....	6
Figura 5 – Medições de descarga líquida na estação Porto Velho (15400000).	6
Figura 6 – Medição com ADCP Rio Grande 300 kHz na estação Porto Velho (15400000). ...	7
Figura 7 – Equipamentos utilizados para a realização da batimetria e medição de vazão.	8
Figura 8 – Pontos de monitoramento fluviométrico do Rio Madeira em Porto Velho/RO.....	9
Figura 9 – Seção de monitoramento próxima à UHE Santo Antônio Energia.	10
Figura 10 – Comparação entre os perfis transversais levantados nos anos de 2012, 2013 e 2014.	11
Figura 11 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 01.03.2012....	12
Figura 12 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 31.05.2012....	12
Figura 13 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 14.09.2012....	12
Figura 14 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 03.12.2012....	13
Figura 15 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 10.04.2013....	13
Figura 16 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 26.04.2013....	13
Figura 17 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico no dia 16.07.2014.	14
Figura 18 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 02.09.2014....	14
Figura 19 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico no dia 29.10.2014.	14
Figura 20 – Localização da área de estudo com detalhamento das seções de medição – Estudo realizado em Abril/2013 (Imagem do Google Earth).....	15
Figura 21 – Perfil Longitudinal (margem direita do rio Madeira).	17
Figura 22 – Perfil Longitudinal (margem esquerda do rio Madeira).....	18
Figura 23 – Perfil Transversal do rio Madeira.	18
Figura 24 – Perfil Transversal do rio Madeira	18
Figura 25 – Perfil Transversal do rio Madeira	19
Figura 26 – Perfil Transversal do rio Madeira	19
Figura 27 – Perfil Transversal do rio Madeira	19
Figura 28 – Curvas de Nível e Perspectiva tridimensional das seções analisadas.....	20

Figura 29 – Localização da área de estudo com detalhamento das seções de medição – Estudo realizado em Outubro/2014 (Imagem do Google Earth).....	22
Figura 30 – Perfil Longitudinal (margem direita).....	23
Figura 31 – Perfil Longitudinal (margem esquerda).	24
Figura 32 – Perfil Longitudinal (margem direita).....	24
Figura 33 – Perfil Longitudinal (margem esquerda).	24
Figura 34 – Perfil Longitudinal (margem direita).....	25
Figura 35 – Perfil Longitudinal (margem direita).....	25
Figura 36 – Perfil Transversal do rio Madeira.	25
Figura 37 – Perfil Transversal do rio Madeira.	26
Figura 38 – Perfil Transversal do rio Madeira.	26
Figura 39 – Perfil Transversal do rio Madeira.	26
Figura 40 – Perfil Transversal do rio Madeira.	27
Figura 41 – Curvas de Nível e Perspectiva tridimensional das seções analisadas.....	28
Figura 42 – Comparação entre perfis transversais levantados nos anos de 2013 e 2014....	29
Figura 43 - Comparação entre perfis transversais levantados nos anos de 2013 e 2014.....	30
Figura 44 - Comparação entre perfis transversais levantados nos anos de 2013 e 2014.....	30
Figura 45 – Modelo digital de elevação do leito do rio Madeira (ano de 2013).....	31
Figura 46 – Modelo digital de elevação do leito do rio Madeira (ano de 2014).....	31

TABELA

Tabela 1 – Resumo dos levantamentos batimétricos na seção de monitoramento.	10
Tabela 2 – Parâmetros das seções transversais de medição	16
Tabela 3 – Parâmetros das seções longitudinais de medição.....	16
Tabela 4 – Parâmetros das seções transversais de medição	21
Tabela 5 – Parâmetros das seções longitudinais de medição.....	21

1. APRESENTAÇÃO

O rio Madeira, dentre os afluentes amazônicos, é o maior tributário, contribuindo com aproximadamente 15% da descarga líquida total do rio Amazonas (Martinelli et al., 1989). Também é o rio com maior carga de transporte de sedimentos do mundo e está em permanente processo de agradiação e erosão fluvial, o que reflete em constantes mudanças de grande magnitude na geometria do canal e na formação de ilhas. Além disso, este rio possui uma grande oscilação sazonal de níveis e vazões, intensificando os processos de sua dinâmica fluvial.

Complementando esse complexo sistema, recentemente foram implantadas duas usinas hidrelétricas no rio Madeira, a montante da área urbana da cidade de Porto Velho, capital de Rondônia. Seus reservatórios e vertedouros agora atuam na dinâmica fluvial, provocando alterações no comportamento natural do transporte de sedimentos do rio, tanto a montante quanto a jusante dos barramentos.

No ano de 2014 ocorreu a maior enchente já registrada no rio Madeira, com vazões superiores a $60.000\text{m}^3/\text{s}$ causando velocidades superiores a 4m/s no canal do rio. Em determinadas medições de descargas líquidas, realizadas pela equipe técnica do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, Residência de Porto Velho, a vazão de fundo móvel estimada foi superior a $6.000\text{m}^3/\text{s}$. Após a ocorrência deste evento, provavelmente houve a aceleração de alguns desses processos dinâmicos do rio, originando assim uma campanha especial da equipe da CPRM, com a finalidade de identificar alterações na calha do rio em seu trecho urbano.

Neste relatório é apresentado o levantamento batimétrico realizado pela equipe técnica da CPRM, no trecho compreendido entre as Torres de Energia (localizadas 3,0 km à jusante do barramento da Usina Hidrelétrica Santo Antônio Energia - UHE/SAE) e o Terminal do Cai N'água, abrangendo um trecho longitudinal de aproximadamente 3,0km.

2. INTRODUÇÃO

Visando subsidiar ações de planejamento e tomadas de decisão por partes de órgãos gestores, o Serviço Geológico do Brasil – CPRM, dentro da sua missão de “*Gerar e difundir o conhecimento geológico e hidrológico básico necessário para o desenvolvimento sustentável do Brasil*”, vem realizando monitoramento sistemático do rio Madeira no trecho mais urbano do município de Porto Velho/RO.

Esta demanda origina-se do problema local de alagamentos no período de cheia que atinge boa parte da população ribeirinha de Porto Velho. O trecho estudado compreende o bairro Triângulo, local onde já houve realocação de famílias, as quais sofriam ano a ano com os prejuízos causados pelos alagamentos, inclusive com desbarrancamento de encostas.

O estudo apresentado neste relatório refere-se aos dados gerados através de levantamento batimétrico para o período de março/2012 a outubro/2014.

Na estrutura do relatório será apresentada a descrição da área de estudo e informações das características do rio Madeira, a metodologia de trabalho adotada e, por fim, serão discutidos e analisados os resultados.

3. TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O transporte de sedimentos é uma das fases do processo de sedimentação e se processa nos cursos d'água, sendo que a maior quantidade de transporte (70% a 90%) ocorre na época chuvosa. Considerando que a ocorrência de maior ou menor erosão é função de muitos fatores, com forte influência das chuvas, é importante que as etapas de medições considerem estes aspectos (CARVALHO, 2008).

A distribuição de sedimentos num curso d'água varia ao longo de uma seção vertical, numa seção transversal, ao longo do curso d'água e no tempo. A natureza procura um equilíbrio próprio, considerando estável para o rio. Se há mudança na quantidade de descarga sólida, o rio reage conforme as alterações impostas. Se a carga sólida é grande, haverá uma tendência de depósitos, ocorrendo a “agradação” (assoreamento) do leito do rio. Por outro lado, se a carga sólida é pequena, o rio responde com a “degradação” (erosão) do leito.

Ainda, segundo CARVALHO (2008), quando há uma mudança drástica no regime natural do rio, por exemplo, construção de barragem e formação de reservatório, essa mudança reflete na formação de depósitos de sedimentos no reservatório. Isso corresponde a uma agradação do leito, ou seja, assoreamento do trecho à montante da barragem. Também, a jusante da barragem ocorre mudanças violentas, por efeito da redução de descarga sólida e mudança de regime, as águas começam a degradar o leito e as margens (Figura 1).

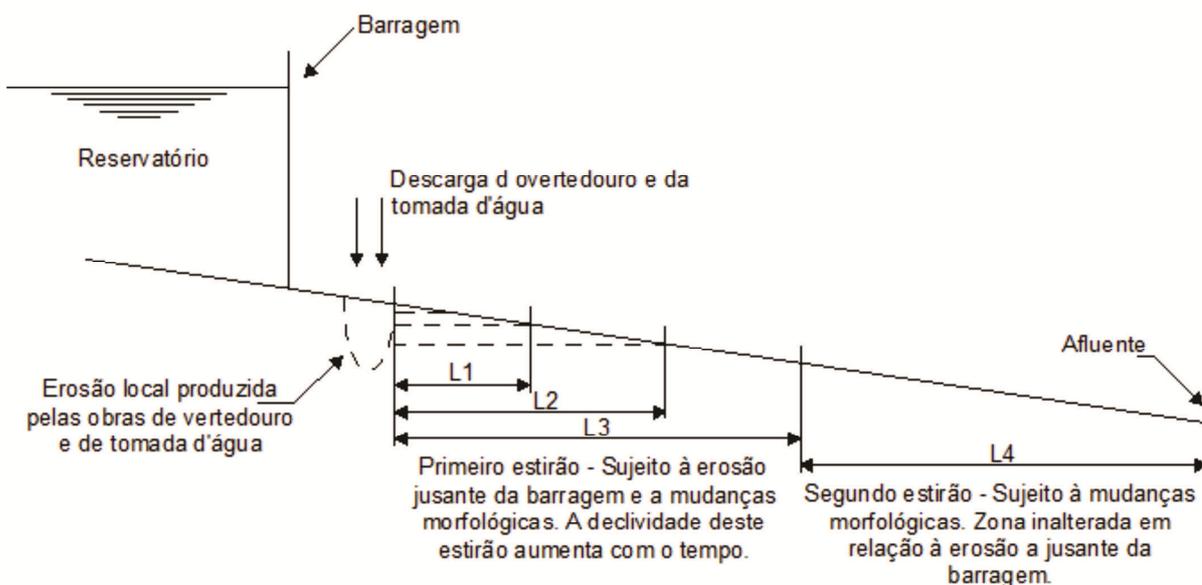


Figura 1 – Alterações que sofre um rio a jusante de barragem (Alvarez, 1986 citado por Carvalho, 2008).

De maneira geral, no reservatório o curso d'água tem as áreas de seções transversais aumentadas, enquanto as velocidades da corrente decrescem, criando condições de deposição de sedimentos (ANNEL, 2000). No trecho à jusante ocorrem processos erosivos e mudanças morfológicas. No primeiro caso, a água limpa, sem sedimentos, bem como a modificação do regime de vazões, aumenta o poder erosivo do escoamento, provocando degradação, com aprofundamento da calha do rio e erosão das margens.

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1 Bacia Hidrográfica do rio Madeira até Porto Velho

O rio Madeira tem como seus principais formadores os rios Guaporé, Mamoré e Beni. Todos estes rios têm suas nascentes na Bolívia e Peru, sendo que o último, boa parte nas vertentes da Cordilheira dos Andes, com cotas que podem atingir valores de 6.000m de altitude.

A CPRM, Residência de Porto Velho, realiza o monitoramento das cotas diariamente nas estações de Príncipe da Beira (rio Guaporé), Guajará Mirim (rio Mamoré), Morada Nova (rio Abunã), Abunã (rio Madeira) e Porto Velho (rio Madeira), que podem ser visualizadas na Figura 2. A bacia hidrográfica do rio Madeira até o município de Porto Velho tem aproximadamente 970.000 km².

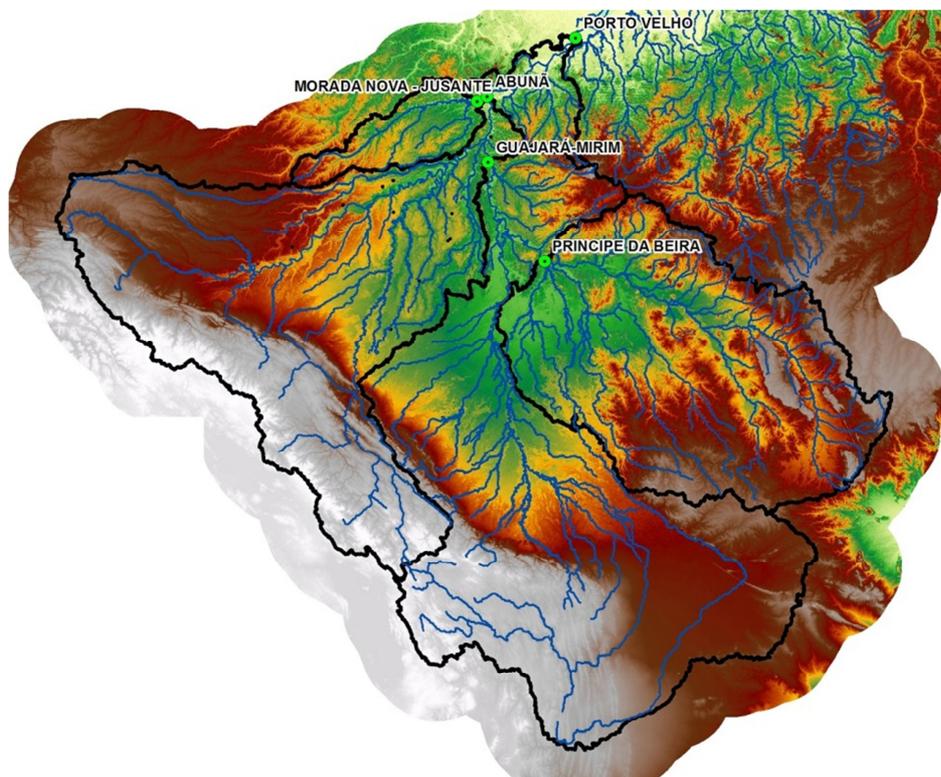


Figura 2 – Localização das estações da CPRM/REPO na bacia hidrográfica do rio Madeira.

4.2 Localização do bairro Triângulo

O bairro Triângulo está localizado na área central do município de Porto Velho, na margem direita do rio Madeira (Figura 3) e sua delimitação inicia-se nas coordenadas 8°47'39"S e 63°55'27"O aproximadamente 4,0 km à jusante da UHE de Santo Antônio Energia. O bairro é permeado pela Estrada de Ferro Madeira-Mamoré e pela Estrada de Santo Antônio.



Figura 3 – Localização da área de estudo (Imagem do Google Earth).

4.3 Análise da cheia de 2014

Em 2014, o rio Madeira atingiu o nível máximo já registrado desde que se iniciaram as atividades de seu monitoramento. A Figura 4 apresenta as cotas máximas anuais registradas em cada ano, desde 1967 até 2014. A cheia ocorrida no ano de 2014 fez com que a equipe técnica da CPRM intensificasse as campanhas para coleta e registro de informações, de modo a possibilitar a caracterização e posterior análise do evento que estava ocorrendo. Na Figura 5 podem ser visualizadas as vazões medidas e suas respectivas cotas na estação de Porto Velho (15400000) durante a cheia de 2014.

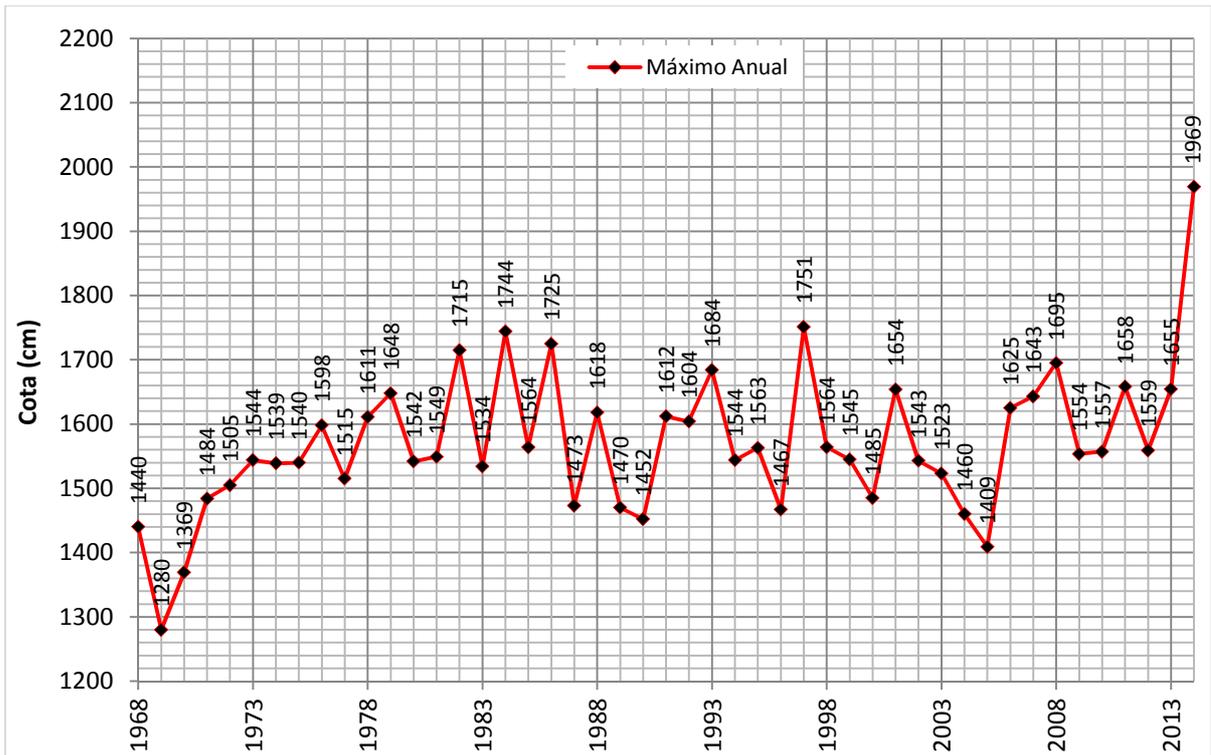


Figura 4 – Série histórica de cotas máximas anuais da estação Porto Velho (15400000).

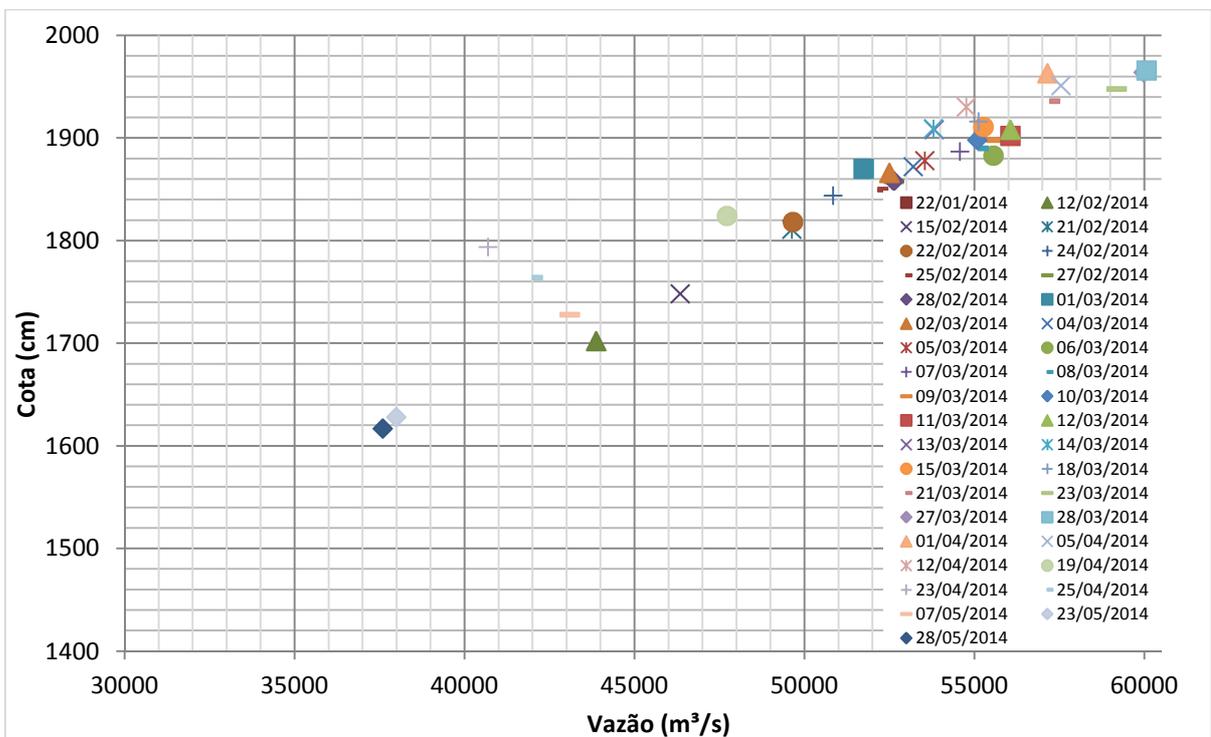


Figura 5 – Medições de descarga líquida na estação Porto Velho (15400000).

As medições de descarga líquida foram realizadas utilizando-se de Medidores Acústico Doppler (ADCP) acoplados a DGPS. Estes equipamentos são capazes de estimar a vazão de fundo móvel de um rio através de interpolação, que pode ser visualmente entendido como a área branca entre as velocidades medidas e a profundidade do rio, como apresentado na Figura 6. Em diversas medições durante a cheia de 2014 foram estimadas vazões de fundo móvel superiores a 6.000 m³/s, indicando um grande transporte de sedimentos através da movimentação do leito no fundo do rio.

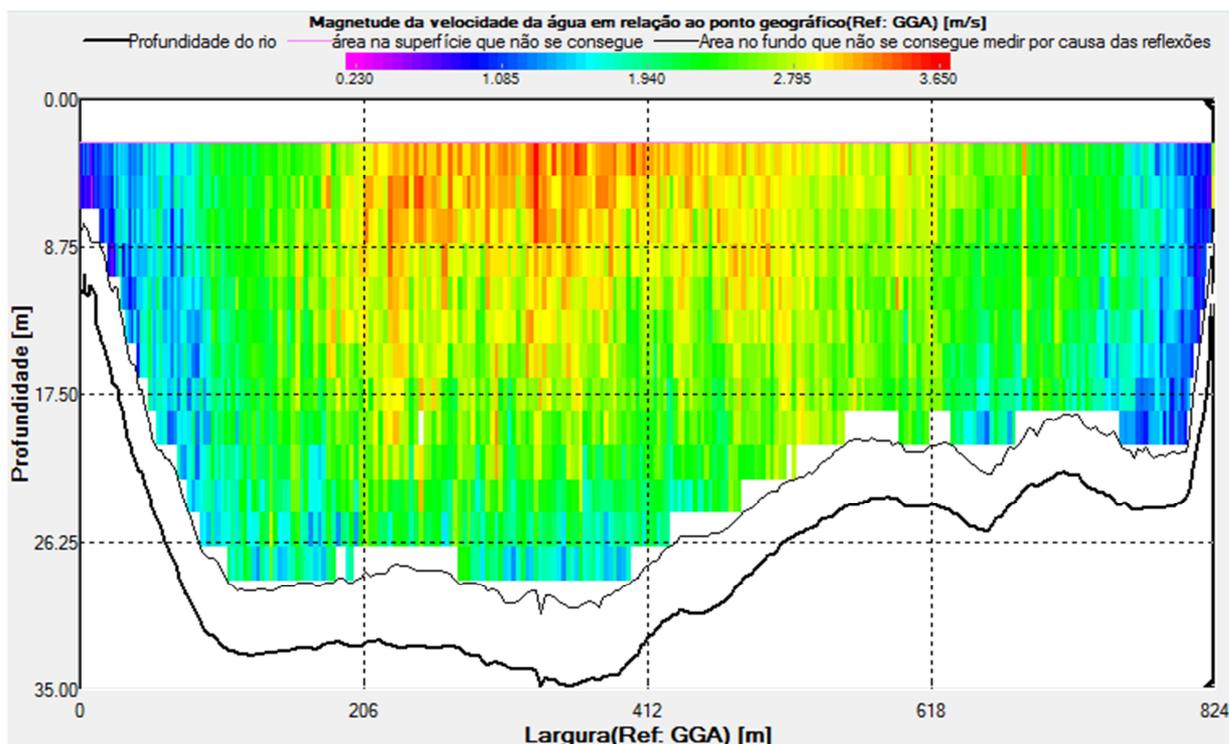


Figura 6 – Medição com ADCP Rio Grande 300 kHz na estação Porto Velho (15400000).

5. METODOLOGIA UTILIZADA

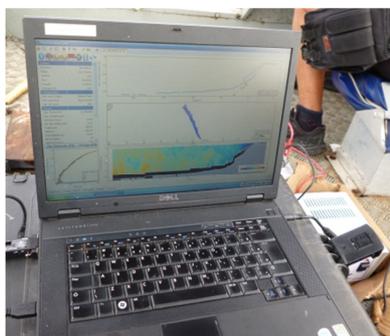
As atividades de campo realizadas e apresentadas neste relatório incluem apenas os levantamentos batimétricos, não considerando, portanto, as medições de descarga líquida (vazão) nas seções estudadas. Os levantamentos batimétricos são realizados com a utilização de um equipamento denominado ecobatímetro, capaz de medir a profundidade do rio a cada ponto monitorado.

Um grande avanço em equipamentos desta categoria são os medidores acústicos, em inglês “Acoustic Doppler Current Profiler” (ADCP). O método acústico baseia-se na medição e integração de áreas e velocidades, obtidas pela análise do eco de pulsos de ultrassom (ondas acústicas de alta frequência), refletidas pelas partículas sólidas em suspensão na massa líquida e pela superfície sólida do fundo (SANTOS et al, 2001).

Os equipamentos utilizados para a realização deste trabalho foram o Acoustic Doppler Profiler ADP-RiverSurveyor-M9 (ADP-M9) e o Rio Grande ADCP. O primeiro possui oito feixes diagonais que realizam o perfilamento das velocidades da água, e um feixe perpendicular (ecobatímetro) para a medição da profundidade (Figura 7b). Já o Rio Grande possui 04 feixes e frequências variáveis, este último utilizado em função das características locais do rio. Para o rio Madeira são utilizados os aparelhos com frequência de 600 kHz e 300 kHz (Figura 7c). Este último empregado, principalmente, na época de cotas altas.

Para a determinação do posicionamento do equipamento durante o levantamento batimétrico, utilizou-se um Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS) ou GPS Diferencial e um receptor GPS de base instalado na margem do rio. A associação destes equipamentos permite conhecer a diferença entre a posição obtida através do receptor de GPS de base e a posição real do equipamento, possibilitando a correção diferencial do erro.

O procedimento de medição de vazão e levantamento batimétrico segue uma sequência padrão, onde se acopla o equipamento na embarcação (Figura 7e), realizam-se as travessias e acompanha-se o processo de medição em um monitor de notebook que informa a cada pulso lançado pelo equipamento, as velocidades do barco e da água; as vazões calculadas por vertical; as posições geográficas; o delineamento do perfil de fundo, dentre outras informações necessárias ao cálculo de vazão total do trecho analisado.



(a) Microcomputador para registrar os dados coletados em tempo real.



(b) ADP-RiverSurveyor-M9 (ADP-M9) – Fabricante Sontek.



(c) ADCP Rio Grande 600 kHz
Fabricante RD Instruments



(d) GPS-RTK instalado na margem do rio.



(e) DGPS – Instalado na embarcação.

Figura 7 – Equipamentos utilizados para a realização da batimetria e medição de vazão.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Levantamentos batimétricos (Seção – Torres de Energia)

O Serviço Geológico do Brasil - CPRM, através da Residência de Porto Velho monitora desde 1967 a estação fluviométrica (régua linimétrica) localizada na margem direita do Rio Madeira, 3 km à jusante da área de estudo deste trabalho. Ainda em sentido jusante, a cerca de 6 km, está localizado o ponto de medição de descarga líquida, descarga sólida e levantamento do perfil transversal. Estas atividades são realizadas sistematicamente a cada três meses pela equipe da CPRM (Figura 8).

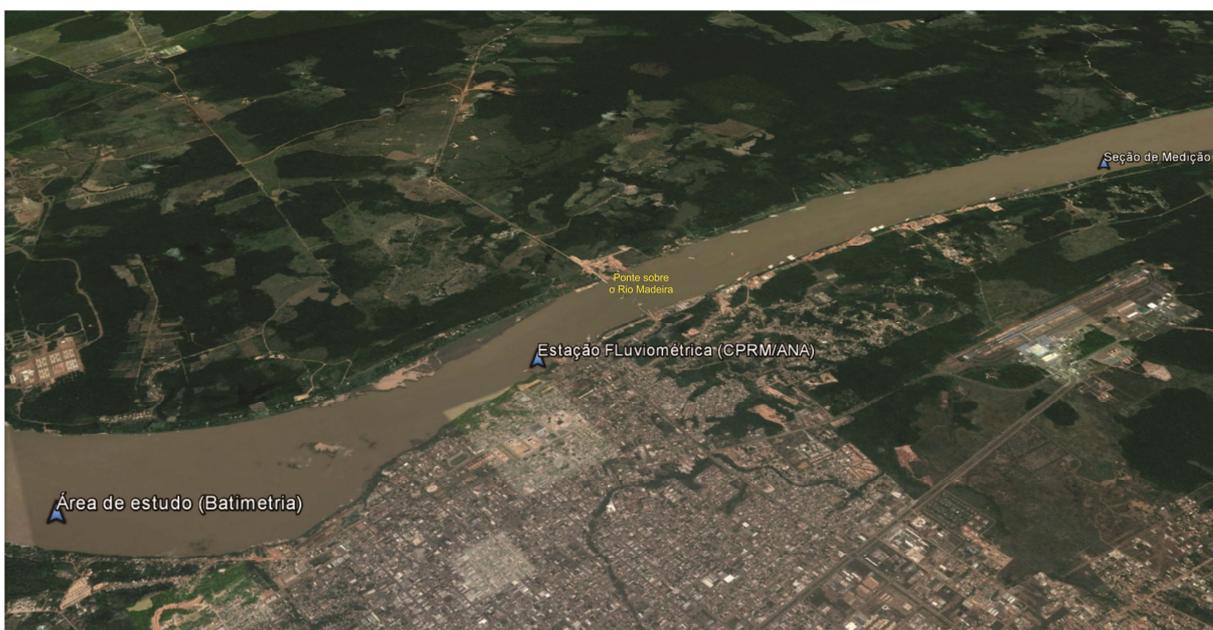


Figura 8 – Pontos de monitoramento fluviométrico do Rio Madeira em Porto Velho/RO.
(Imagem do Google Earth)

Em virtude da construção do empreendimento hidrelétrico Santo Antônio Energia, localizado 5 km à montante da área urbana de Porto Velho/RO, a CPRM passou a monitorar desde o ano de 2012, uma seção específica do rio, através de realização de levantamento batimétrico. Este ponto localiza-se 3 km à jusante do barramento (Figura 9). A Tabela 1 apresenta um resumo dos levantamentos batimétricos realizados na seção de monitoramento (torres de energia).

Tabela 1 – Resumo dos levantamentos batimétricos na seção de monitoramento.

Data	Equipamento utilizado (ADCP)	Cota da régua (m)	Cota Altimétrica (m)	Largura do canal (m)	Profundidade Média (m)	Área (m ²)
01/03/2012	Rio Grande	15,09	57,59	988,64	21,68	21.585,16
31/05/2012	Rio Grande	13,60	56,10	949,06	23,66	21.947,40
14/09/2012	M9	3,39	45,89	835,00	12,67	10.856,70
03/12/2012	Rio Grande	7,79	50,29	891,04	17,43	15.545,19
10/04/2013	M9	15,92	58,42	968,21	25,19	23.791,00
26/04/2013	M9	15,72	58,22	935,69	26,75	24.330,40
16/07/2014	Rio Grande	11,90	54,40	923,76	39,84	37.552,49
02/09/2014	Rio Grande	5,42	47,92	897,00	39,42	34.321,61
29/10/2014	Rio Grande	4,21	46,71	900,00	35,40	31.896,83
Média				920,93	26,89	24.647,42
Desvio Padrão				46,27	9,55	8.683,47



Figura 9 – Seção de monitoramento próxima à UHE Santo Antônio Energia.

(Imagem do Google Earth)

Os levantamentos batimétricos foram realizados em períodos diferentes ao longo dos anos, ou seja, em cotas altas e baixas. A coluna “Cota Altimétrica” mostrada na Tabela 1 representa a cota com relação ao nível do mar, cujo zero da régua utilizado foi de 42,50m. Esta correção se faz necessário, considerando que a leitura da régua linimétrica “Cota da

régua” possui um referencial arbitrário e, para que fosse possível comparar os perfis gerados em cotas diferentes houve a necessidade da correção.

Analisando os dados da tabela, observa-se que a largura do canal não variou ao longo do tempo. Isso provavelmente deve-se ao enrocamento (muro de contenção) feito no ano de 2012 pela UHE-SAE, ao longo das margens direita e esquerda do rio. A média da largura encontrada foi de 920,00 m. Com relação à profundidade média, o que se observa é um aprofundamento do canal, identificadas principalmente nas medições realizadas no ano de 2014. Foram observadas profundidades próximas de 60,0 m, em cotas baixas (setembro/2014), quando antes a profundidade máxima, em cotas altas (março/2012), não passava de 30,0 m. Se comparadas às medições realizadas em 14/09/2012 e 29/10/2014, cujas cotas altimétricas estão bem próximas, é possível observar uma variação de profundidade média em torno de 27,0 m (aumento de 279%). Com relação à área da seção transversal, houve um aumento de 294% (aumento de quase três vezes), cuja área medida em setembro/2012 foi de 10.856,70 m² enquanto que no mês de outubro/2014 o valor encontrado foi de 31.896,83 m².

A Figura 10 apresenta os perfis levantados nos anos de 2012, 2013 e 2014, em períodos diferentes. Pode-se observar uma mudança mais abrupta no ano de 2014.

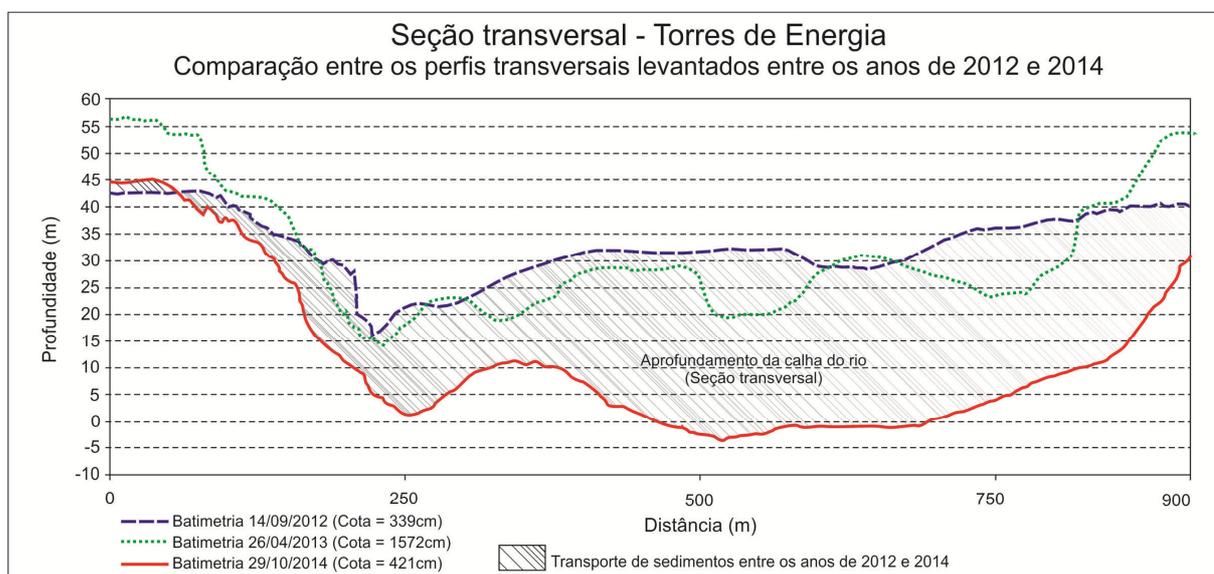


Figura 10 – Comparação entre os perfis transversais levantados nos anos de 2012, 2013 e 2014.

As Figuras de 11 a 19 mostram a variação da seção transversal ao longo do tempo, desde a 1ª medição no dia 01/03/2012 até a última realizada em 29/10/2014. A profundidade está na mesma referência, isto é, mesma cota altimétrica.

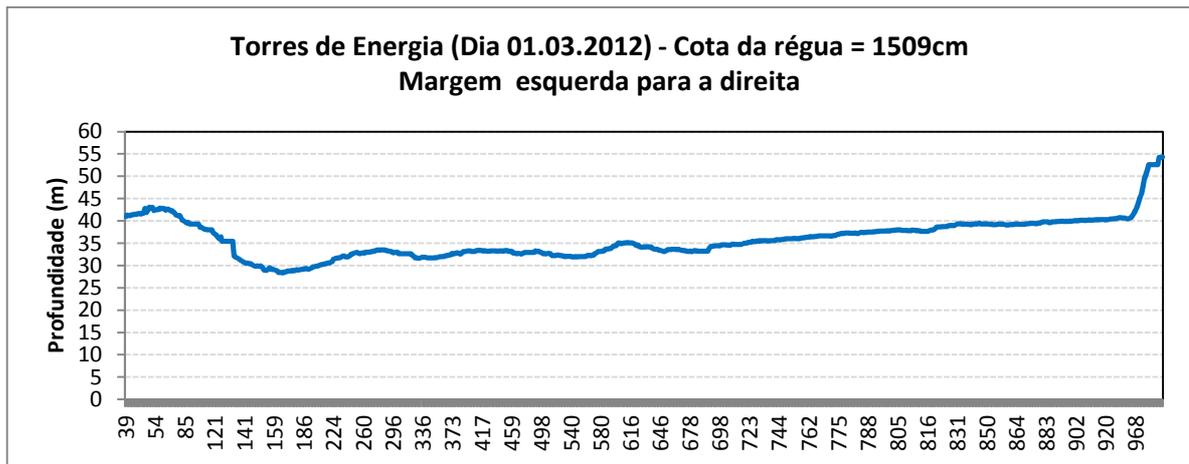


Figura 11 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 01.03.2012.

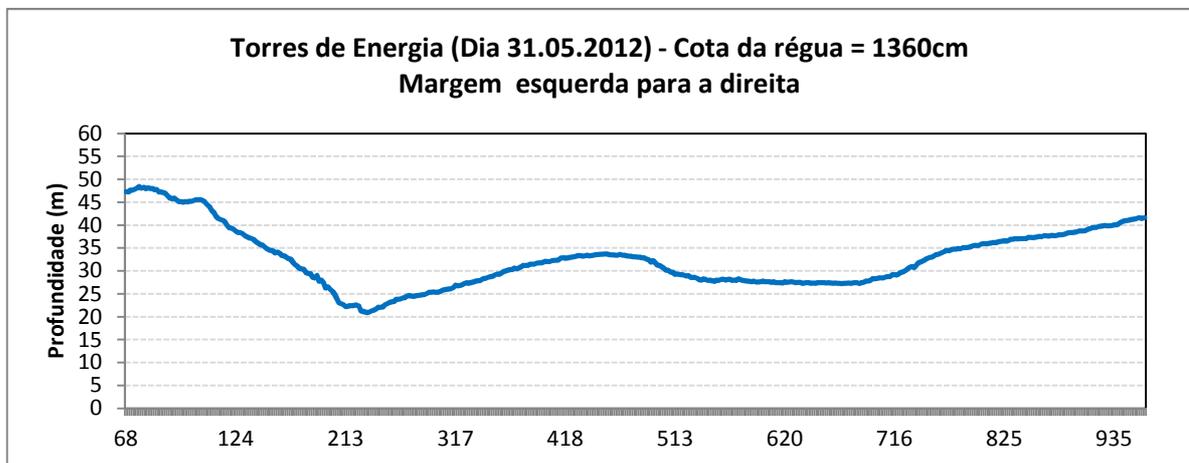


Figura 12 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 31.05.2012.

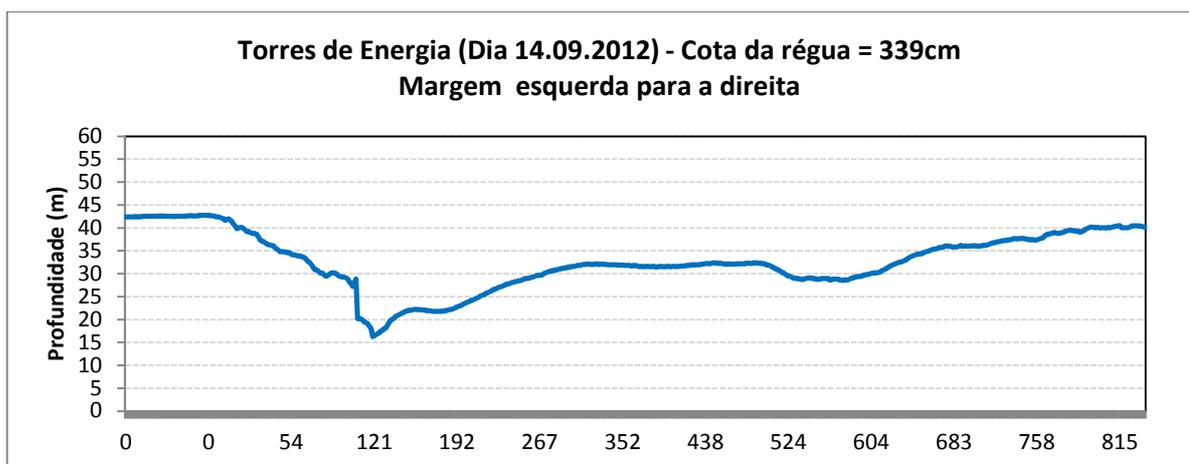


Figura 13 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 14.09.2012.

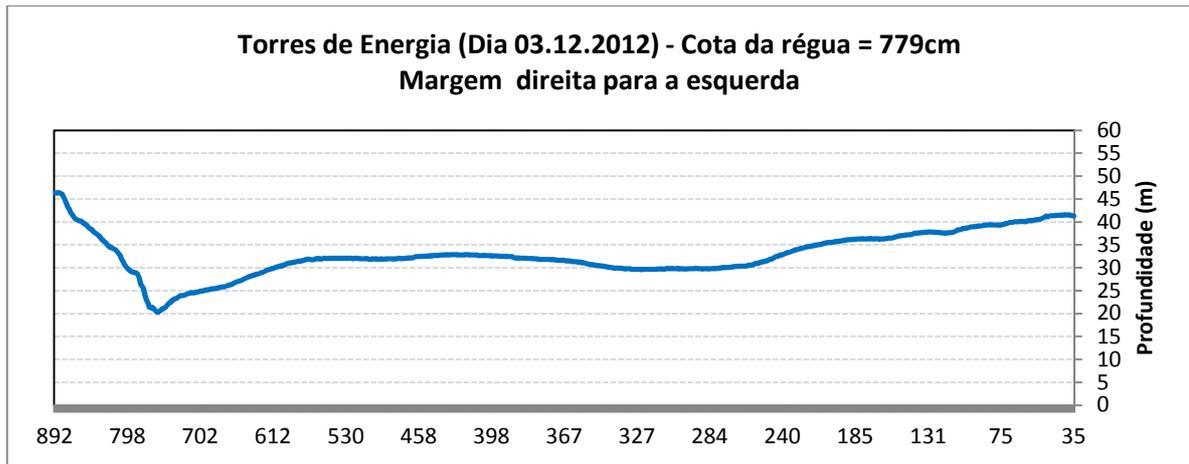


Figura 14 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 03.12.2012.

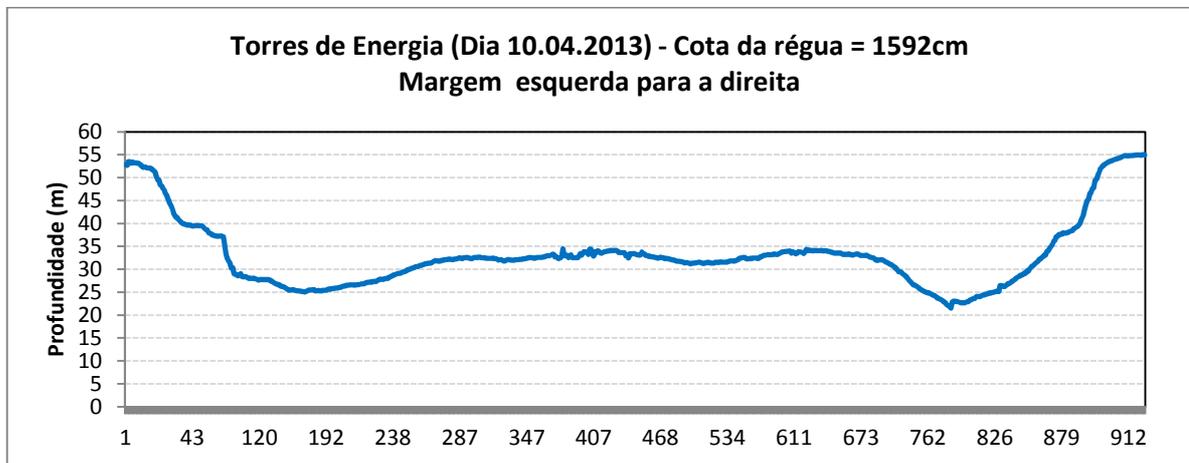


Figura 15 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 10.04.2013.

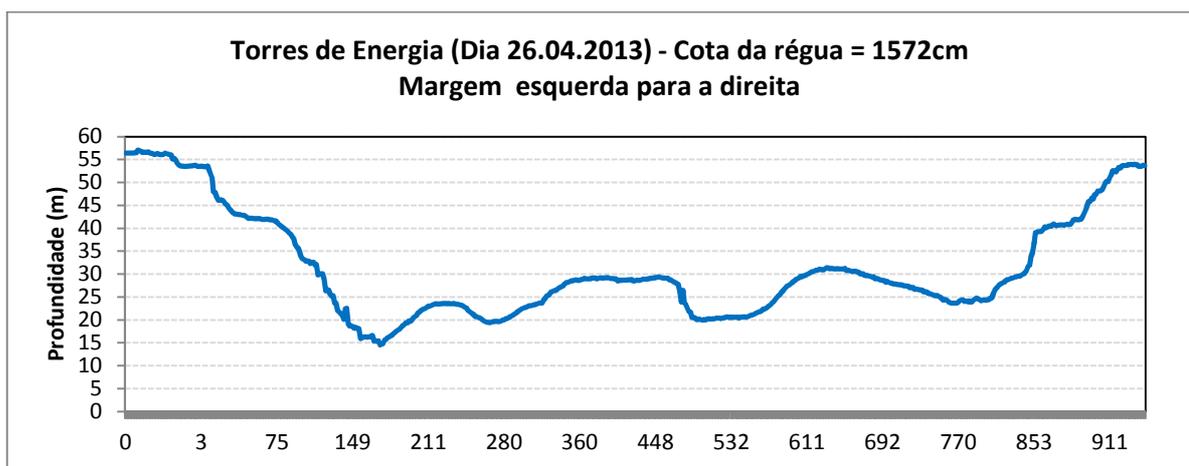


Figura 16 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 26.04.2013.

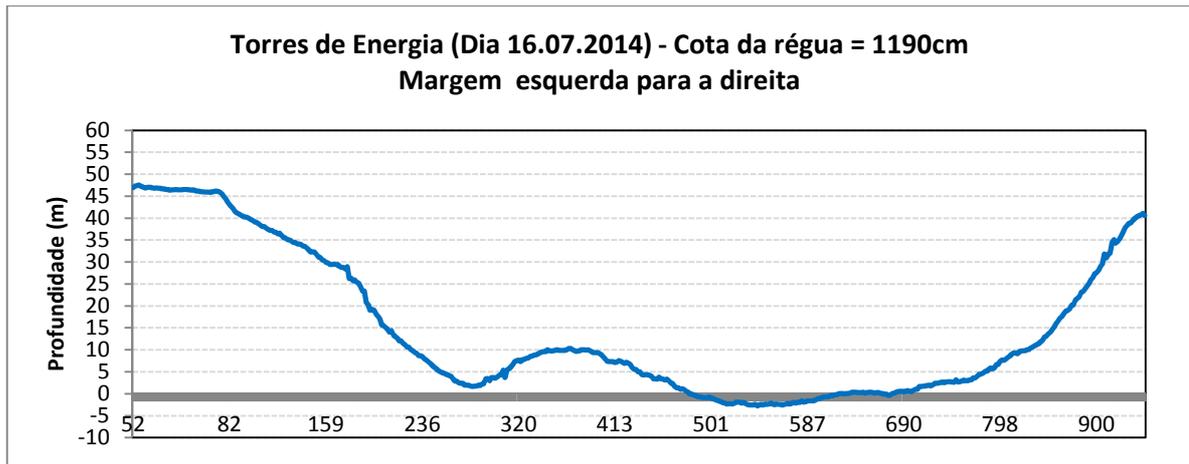


Figura 17 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico no dia 16.07.2014.

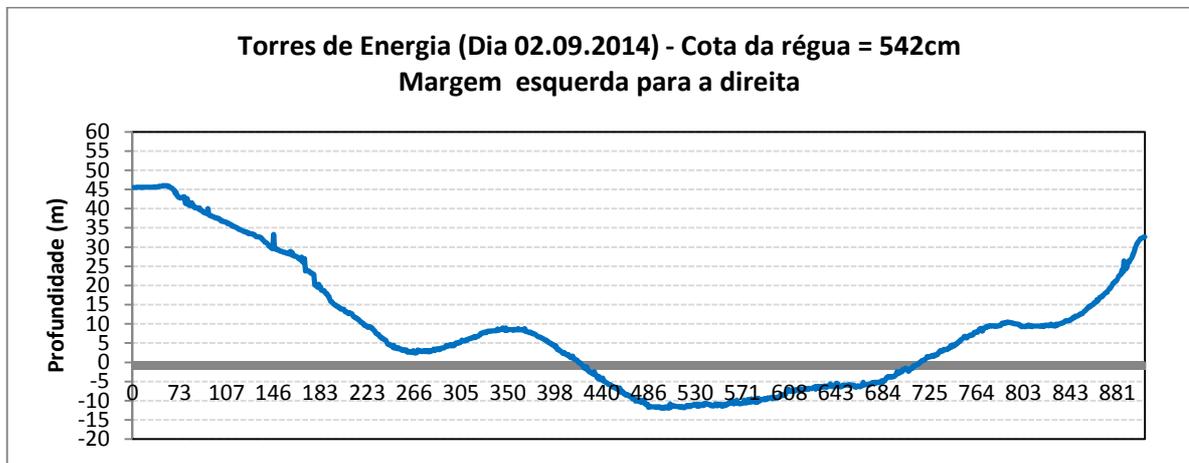


Figura 18 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico dia 02.09.2014.

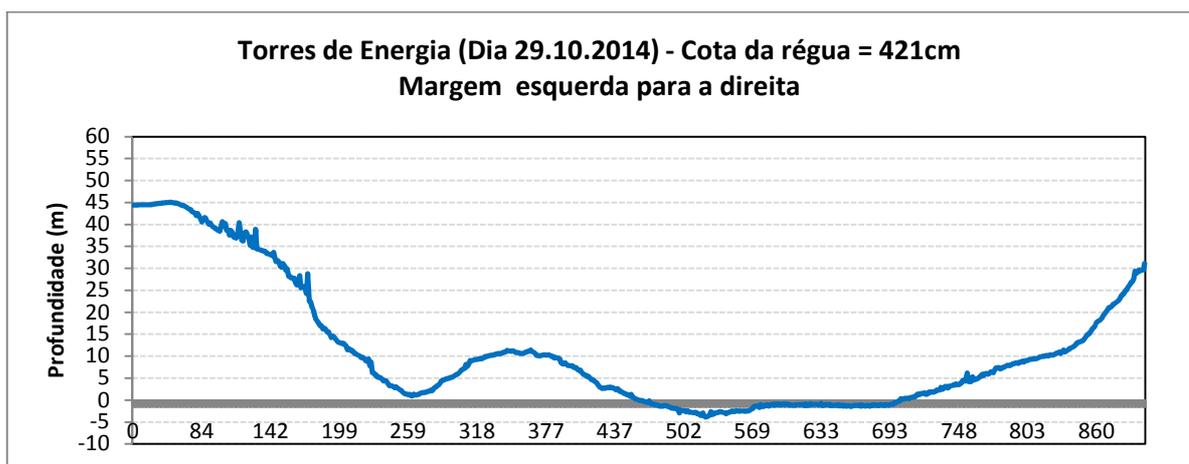


Figura 19 – Perfil transversal do rio Madeira - Levantamento batimétrico no dia 29.10.2014.

6.2 Levantamentos batimétricos (Campanha de campo – abril de 2013)

Os dados batimétricos foram obtidos com o emprego do ADP-RiverSurveyor-M9 (ADP-M9), medido através do seu feixe vertical. Para isso, foi adotada inicialmente na configuração do sistema a referência de profundidade como sendo este feixe. A Tabela 2 apresenta as informações das seções transversais de medição. Pode-se observar uma largura média do rio de 1.393,46 m e uma área média de 25.431,90 m².

A Figura 20 a seguir apresenta a localização da área de estudo, com detalhamento das seções transversais e longitudinais realizadas. Para o trabalho aqui apresentado, percorreu-se, inicialmente a seção localizada na Torre de Energia (1ª seção ST-01; transversal; 914,00 m). Em seguida o deslocamento se deu a partir de um polígono iniciado à margem direita do rio em sentido jusante (1ª seção SL-01; longitudinal; 721,55 m), partindo-se para a margem esquerda do rio (2ª seção ST-02; transversal; 1.445,63 m). Este procedimento se deu nas demais seções (2ª seção SL-02; longitudinal; 800,41 m; 3ª seção ST-03; transversal; 1.477,47 m; 4ª seção ST-04; transversal; 5ª seção ST-05; transversal). Por fim, para a última seção, o deslocamento se deu da margem direita para a esquerda (6ª seção ST-06; transversal).



Figura 20 – Localização da área de estudo com detalhamento das seções de medição – Estudo realizado em Abril/2013 (Imagem do Google Earth).

A Tabela 3 apresenta as informações referentes à medição de batimetria nas seções longitudinais do rio. Neste caso, o programa do equipamento entende que ainda está sendo realizada medição na seção transversal, ou seja, adotando o procedimento de medição de vazão padrão. Assim, mesmo percorrendo 721 metros pela margem direita e 800 metros pela margem esquerda do rio, o programa identificou apenas uma extensão média de 557 metros. Porém, como o objetivo desta medição foi apenas a obtenção da batimetria às margens do rio, o resultado batimétrico continua satisfatório.

Tabela 2 – Parâmetros das seções transversais de medição

Seções Longitudinais	Data	Hora	Duração	Largura (m)	Área (m ²)
1ª Seção	10/04/2013	10:40:25	0:12:05	968,21	23.791,00
2ª Seção	10/04/2013	10:52:16	0:11:05	1.465,21	25.775,60
3ª Seção	10/04/2013	11:12:23	0:09:37	1.270,92	25.719,30
4ª Seção	10/04/2013	11:28:48	0:09:20	1.389,02	25.043,80
5ª Seção	10/04/2013	11:40:08	0:09:28	1.402,29	24.894,20
6ª Seção	10/04/2013	11:52:27	0:09:24	1.439,85	25.726,90
		Média	0:09:47	1.393,46	25.431,90

Tabela 3 – Parâmetros das seções longitudinais de medição

Seções Longitudinais	Data	Hora	Duração	Largura (m)	Área (m ²)
1ª Seção	10/04/2013	10:47:19	0:04:48	577,88	5.510,90
2ª Seção	10/04/2013	11:04:23	0:07:41	537,74	2.791,10
		Média	0:06:14	557,81	4.151,00

6.3 Análise das medições (Campanha de campo – abril de 2013)

Para a determinação da batimetria de fundo do rio Madeira, no trecho do bairro Triângulo (Figura 20), foram estudadas 08 seções, sendo duas longitudinais (margem direita-MD e margem esquerda-ME) e 06 transversais.

Sobre os perfis transversais é importante destacar que, embora as travessias tenham sido feitas alternadamente da margem direita para a esquerda e vice-versa, o perfil apresentado pelo equipamento permanece com as margens esquerda e direita em seu local correto, sem alteração. Com relação à seção ST-01 (Figura 15), que corresponde ao trecho na Torre de energia, esta já foi analisada no item 6.1 deste capítulo.

A largura média das seções transversais foi de aproximadamente 1.400 metros. Em quase todas as seções transversais verifica-se um grande rebaixamento de fundo pela margem direita do rio, de aproximadamente 29 metros, chegando a 33 metros de profundidade na 3ª seção de medição, localizada no início do polígono analisado (8°46'39"S; 63°54'45"O). Os perfis transversais apresentam uma configuração semelhante, não sofrendo altas quedas e subidas de nível de uma margem a outra, possuindo em média 18 metros de

profundidade a partir dos primeiros 400 metros distantes da margem direita. Na margem esquerda as profundidades são bem menores em relação à margem oposta, em torno de 16 metros. Somente no perfil da 5ª seção, pela margem esquerda, é possível verificar um aumento na profundidade semelhante ao que ocorre na margem direita do rio, chegando a medir 28 metros de profundidade à 200 metros da margem. Este comportamento destoante parece, à primeira vista, ser de caráter pontual. Este fato somente poderá ser confirmado com a realização de novas sondagens no local.

O perfil longitudinal da margem direita do rio Madeira (1ª seção; Figura 21) mostra grandes variações, de 2,78 a 20 metros de profundidade numa extensão de 720 metros. Comportamento este esperado para margens de rios amazônicos, como o rio Madeira. Já analisando o perfil longitudinal da margem esquerda, verifica-se a ocorrência de inúmeras interferências no sinal do equipamento de medição, causadas provavelmente pelo excesso de partículas em suspensão, presença de fundo móvel e turbulências. A turbulência à margem esquerda é alta e este fato é comprovado pela ocorrência de maiores velocidades da água, em torno de 1,5 a 2,0 m/s.

Os detalhamentos dos perfis longitudinais são mostrados a seguir nas Figuras 21 e 22 (gráficos em vermelho) e os perfis transversais estão expostos nas Figuras de 23 a 27 (gráficos em azul).

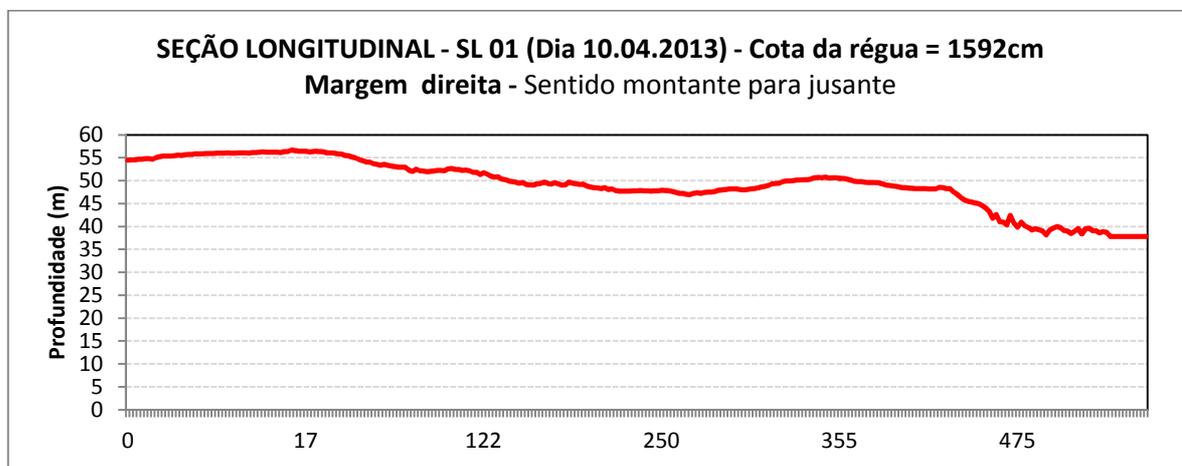


Figura 21 – Perfil Longitudinal (margem direita do rio Madeira).

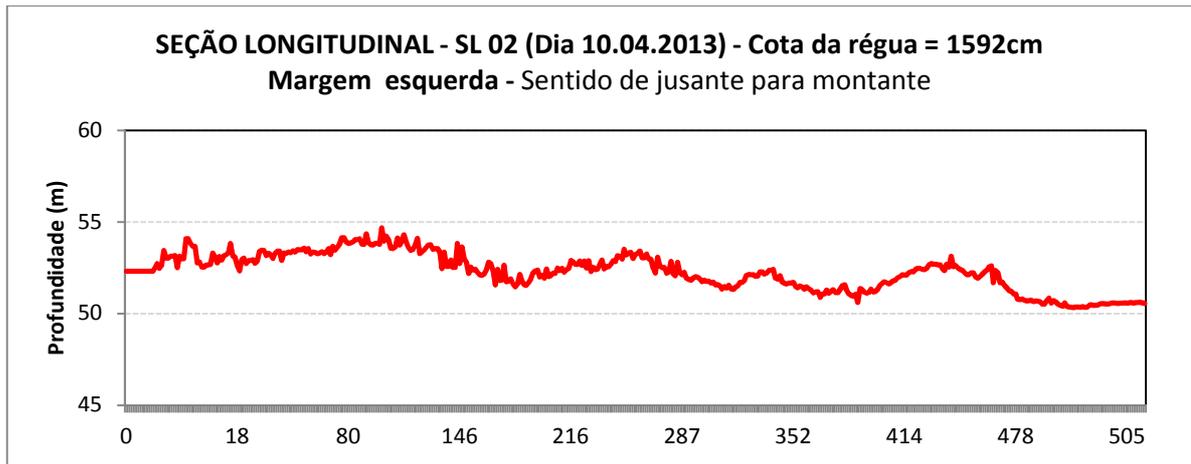


Figura 22 – Perfil Longitudinal (margem esquerda do rio Madeira)

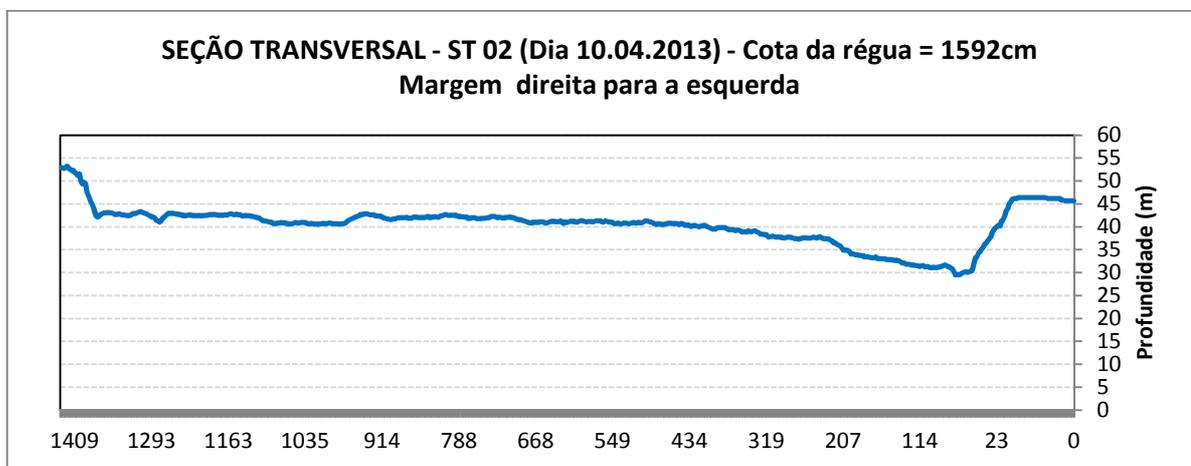


Figura 23 – Perfil Transversal do rio Madeira.

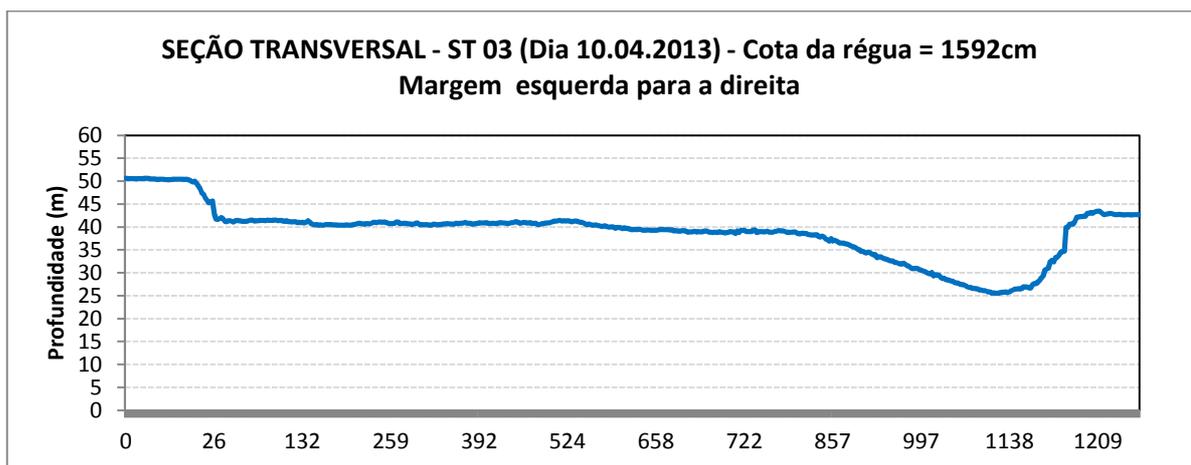


Figura 24 – Perfil Transversal do rio Madeira

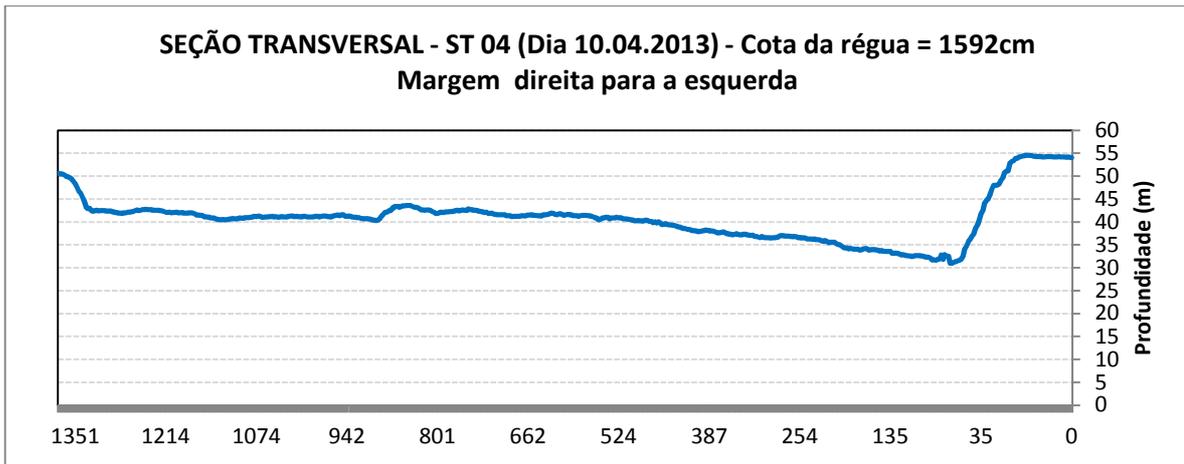


Figura 25 – Perfil Transversal do rio Madeira

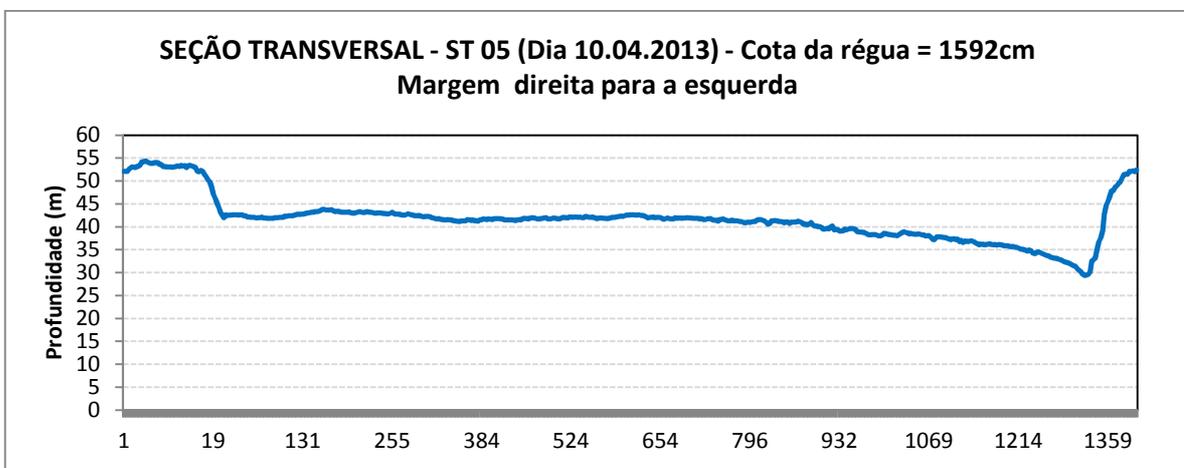


Figura 26 – Perfil Transversal do rio Madeira

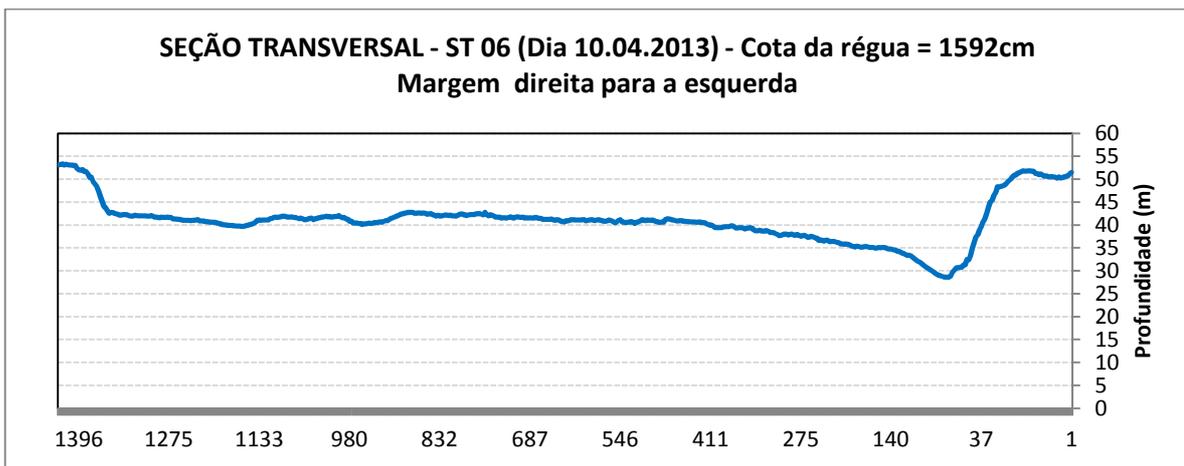


Figura 27 – Perfil Transversal do rio Madeira

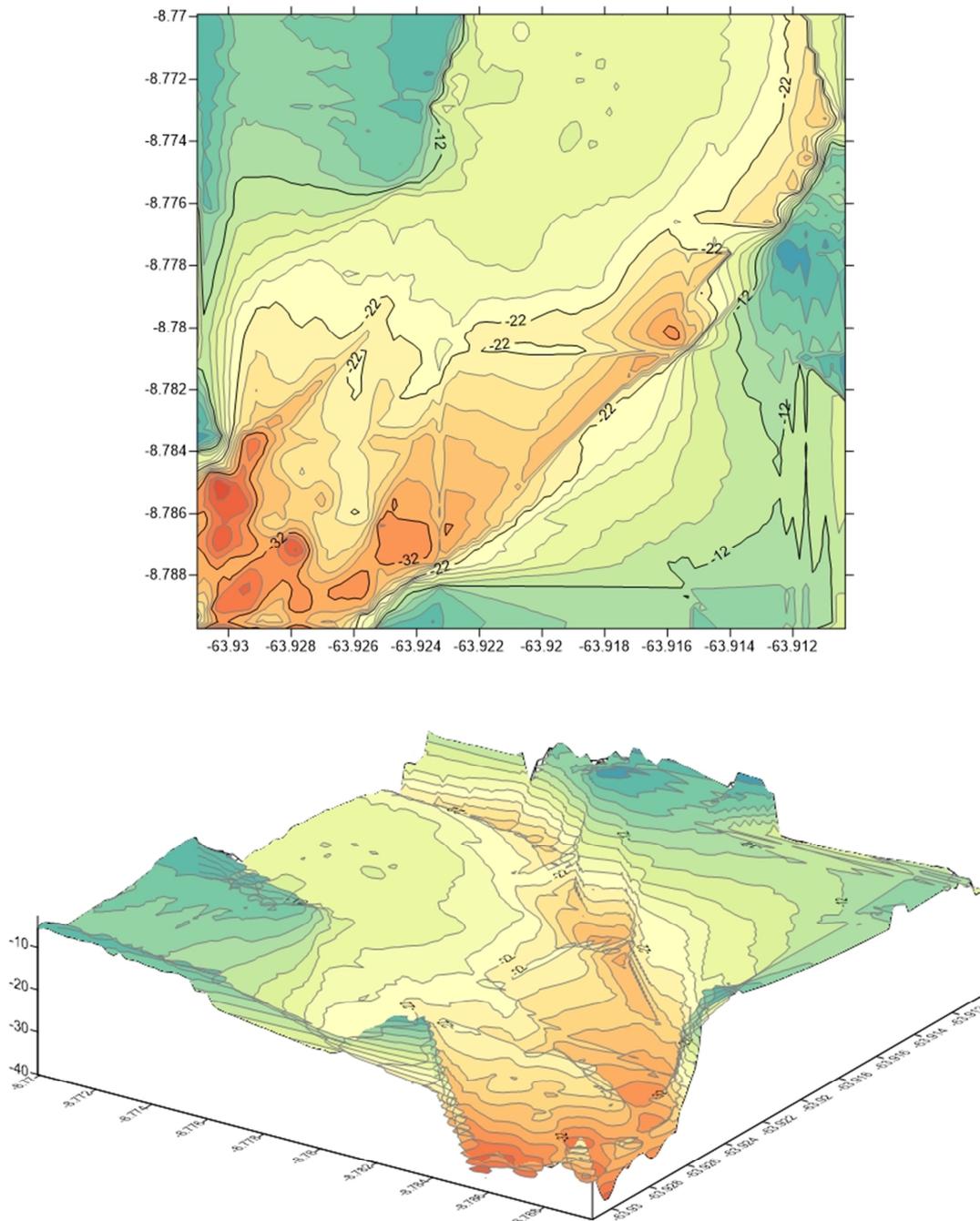


Figura 28 – Curvas de Nível e Perspectiva tridimensional das seções analisadas

A Figura 28 mostra a interpolação de todos os perfis batimétricos levantados no estudo, apresentando as curvas de nível do fundo do rio, além de uma visão em perspectiva tridimensional, sendo uma importante ferramenta para futuras intervenções de obras civis.

6.4 Levantamentos batimétricos (Campanha de campo – outubro de 2014)

Os dados batimétricos foram obtidos com o emprego do ADCP Rio Grande – frequência 600 kHz, integrado ao GPS. A Tabela 4 apresenta as informações das seções transversais de medição. Pode-se observar uma largura média do rio de 1.230,03 m e uma área média de 16.939,33 m². A Tabela 5 apresenta as informações referentes à medição de batimetria nas seções longitudinais do rio. Foram levantadas 06 seções longitudinais, sendo 02 na margem esquerda e 04 na margem direita. Esta escolha se deu pelo fato de haver pouca variação de profundidade na margem esquerda, com média aproximada de 5,0m. Já na margem direita pode-se observar uma variação maior de profundidade.

Tabela 4 – Parâmetros das seções transversais de medição

Seções Transversais	Data	Hora	Duração	Largura (m)	Área (m ²)
1ª Seção	29/10/2014	13:03:49	0:26:00	898,52	31.897,00
2ª Seção	29/10/2014	13:29:23	0:27:00	1.014,00	16.930,00
3ª Seção	29/10/2014	13:46:06	0:21:00	1.190,35	11.702,00
4ª Seção	29/10/2014	14:07:27	0:22:00	1.251,20	12.925,00
5ª Seção	29/10/2014	14:29:34	0:33:00	1.501,34	13.914,00
6ª Seção	29/10/2014	14:52:21	0:23:00	1.524,77	14.268,00
		Média	0:25:33	1.230,03	16.939,33

Tabela 5 – Parâmetros das seções longitudinais de medição

Seções Longitudinais	Data	Hora	Duração	Comprimento (m)	Margem
1ª Seção	29/10/2014	13:21:52	0:19:00	542,00	Direita
2ª Seção	29/10/2014	13:40:28	0:21:00	669,00	Esquerda
3ª Seção	29/10/2014	14:01:13	0:22:00	543,00	Direita
4ª Seção	29/10/2014	14:23:52	0:23:00	555,00	Esquerda
5ª Seção	29/10/2014	14:46:43	0:28:00	631,00	Direita
6ª Seção	29/10/2014	15:14:08	0:35:00	3.023,00	Direita
		Média	0:24:40	993,83	

A Figura 29 a seguir apresenta a localização da área de estudo, com detalhamento das seções transversais e longitudinais realizadas. Neste levantamento, percorreu-se um polígono iniciado à margem esquerda do rio (torres de energia - 1ª seção ST-01; transversal; 898,52m); partindo-se da margem direita em sentido jusante (1ª seção SL-01; longitudinal; 542,00 m). Este procedimento se deu nas demais (2ª seção ST-02; transversal; 1.014,00 m; 2ª seção SL-02; longitudinal; 669,00 m; 3ª seção ST-03; transversal; 1.190,35 m; 3ª seção SL-03; longitudinal; 543,00 m; 4ª seção ST-04; transversal; 1.251,20 m; 4ª seção SL-04; longitudinal; 555,00 m; 5ª seção ST-05; transversal; 1.501,34 m; 5ª seção SL-05; longitudinal; 631,00 m; e por fim a 6ª seção ST-06; transversal; 1.524,77 m. Para concluir o trabalho, optou-se por fazer um trecho longitudinal iniciando nas proximidades da Praça

Estrada de Ferro Madeira-Mamoré em sentido montante até as torres de energia (6ª seção SL-06; longitudinal; 3.023,00 m).



Figura 29 – Localização da área de estudo com detalhamento das seções de medição – Estudo realizado em Outubro/2014 (Imagem do Google Earth).

6.5 Análise das Medições (Campanha de campo – outubro de 2014)

Para a determinação da batimetria de fundo do rio Madeira, no trecho do Bairro Triângulo (Figura 29), foram estudadas 12 seções, sendo 06 longitudinais e 06 transversais.

Cabe ressaltar que esta campanha de medição foi realizada no período de cotas baixas do rio. No dia de realização do trabalho o nível do rio estava em 421 cm.

Sobre os perfis transversais é importante destacar que, embora as travessias tenham sido feitas alternadamente da margem direita para a esquerda e vice-versa, o perfil apresentado pelo equipamento permanece com as margens esquerda e direita em seu local correto, sem alteração. Com relação à seção ST-01 (Figura 29), que corresponde ao trecho na Torre de energia, esta já foi analisada no item 6.1 deste capítulo.

A largura média das seções transversais foi de aproximadamente 1.230,00 metros. A seção transversal ST-02, localizada 500,0 m à jusante das torres de energia, apresenta um

comportamento muito parecido com a ST-01, ou seja, um aprofundamento do canal mais significativo na margem direita. Na margem esquerda as profundidades são menores. Nos demais perfis transversais observa-se um canal bem identificado na margem direita (perfis ST-03 e ST-05). Em média, 55% da largura do canal, partindo da margem esquerda para a direita) apresentou cotas variando em torno de 5,0 m de profundidade e, em alguns pontos este valor chegou a apenas 2,0 m, o que forçou a equipe deslocar o barco durante o procedimento de medição para profundidades maiores, de modo a garantir a segurança da tripulação. Durante a medição a equipe observou bancos de areia superficiais próximas às seções ST-05 e ST-06. Com relação aos perfis longitudinais, os dois localizados na margem esquerda (ST-02 e ST-04) retratam todo o trecho monitorado, ou seja, pouca variação de profundidade em torno de 2,0 a 5,0 m. Com relação à margem direita, apenas a seção SL-05 apresentou variação mais significativa de profundidades de até 20,0m, com uma distância da margem de 35,0 m. O perfil longitudinal SL-06, representado pela Figura 35, mostra a variação de profundidade no trecho de 3,0 km, com a seção iniciando próximo à Praça Madeira-Mamoré até a Torre de Energia.

Os detalhamentos dos perfis longitudinais são mostrados a seguir nas Figuras de 30 a 35 (gráficos em vermelho) e os perfis transversais estão expostos nas Figuras de 36 a 40 (gráficos em azul).

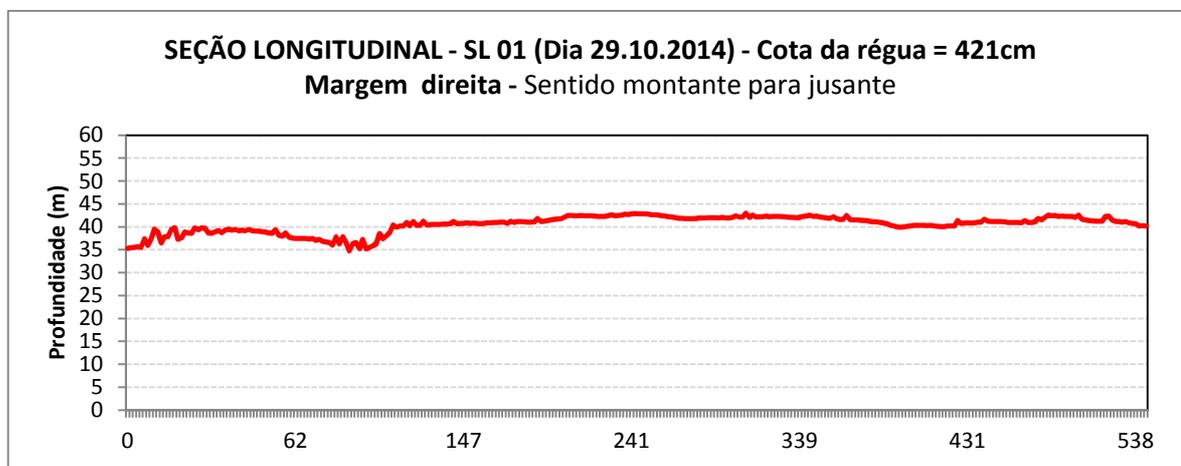


Figura 30 – Perfil Longitudinal (margem direita).

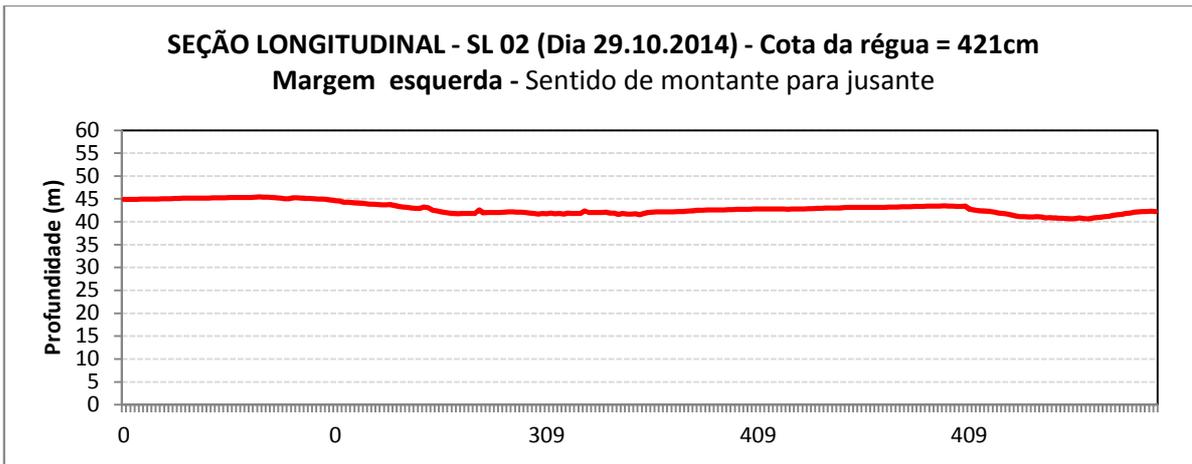


Figura 31 – Perfil Longitudinal (margem esquerda).

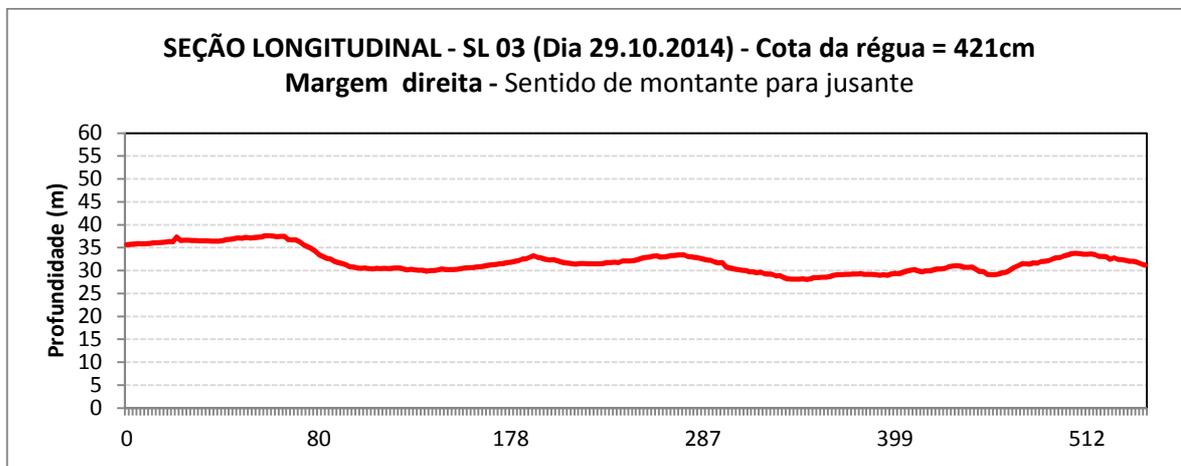


Figura 32 – Perfil Longitudinal (margem direita).

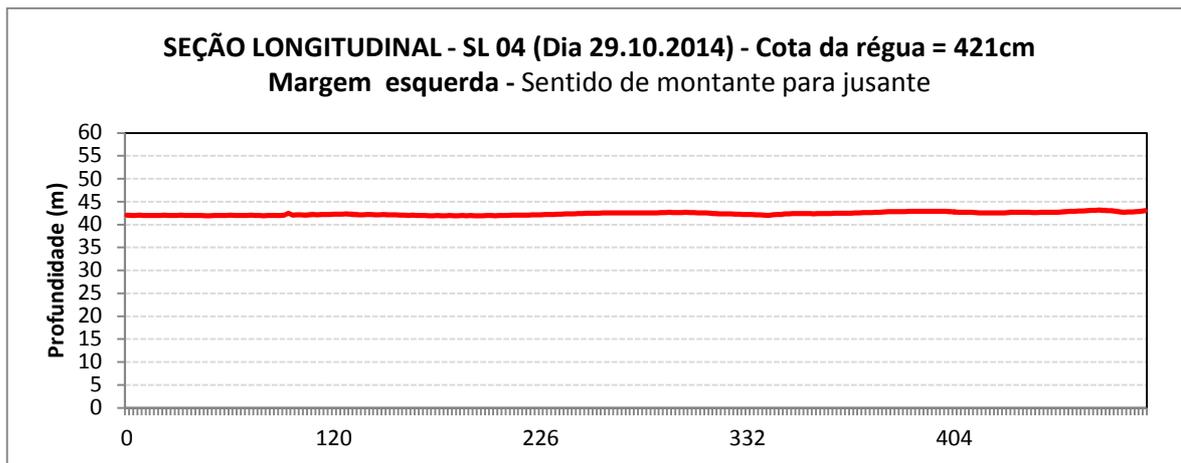


Figura 33 – Perfil Longitudinal (margem esquerda).

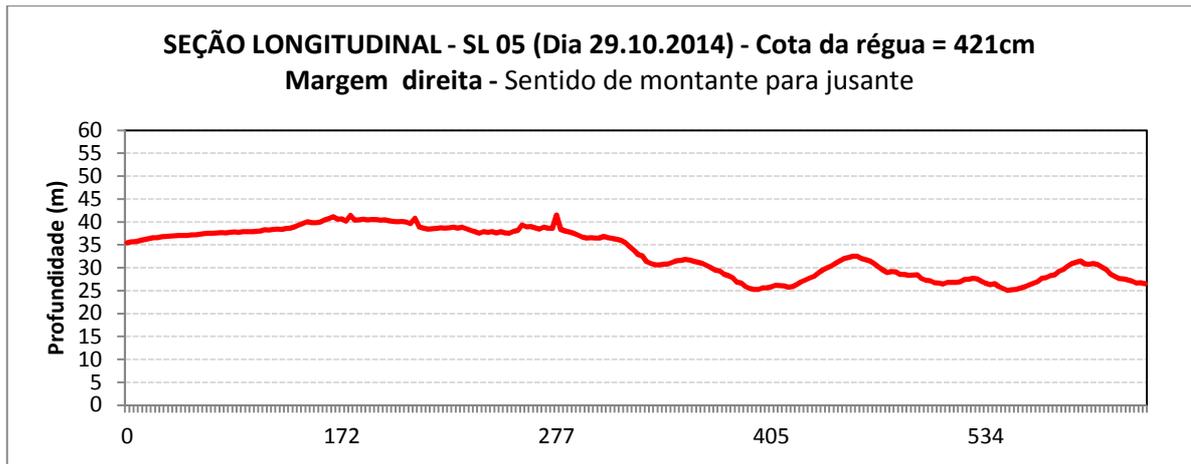


Figura 34 – Perfil Longitudinal (margem direita).

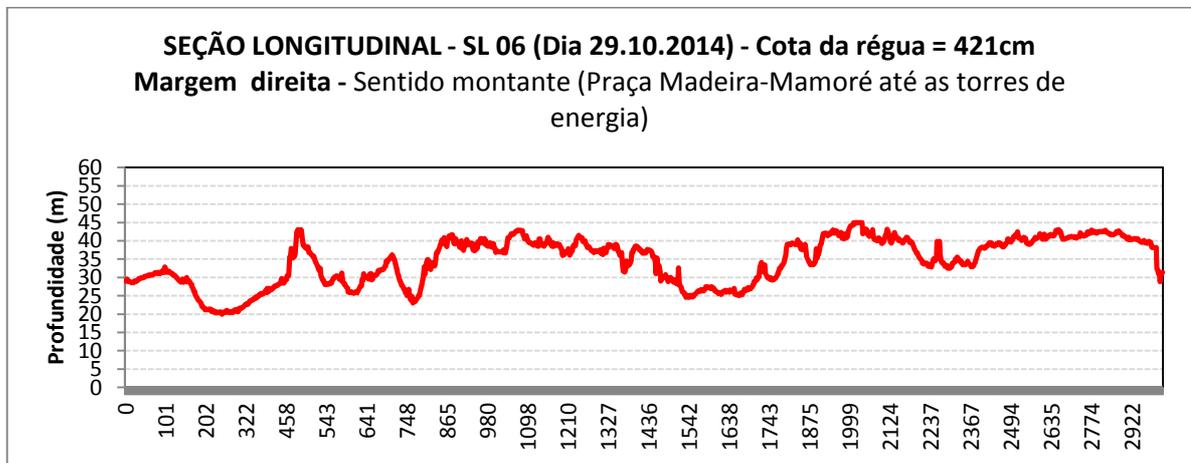


Figura 35 – Perfil Longitudinal (margem direita).

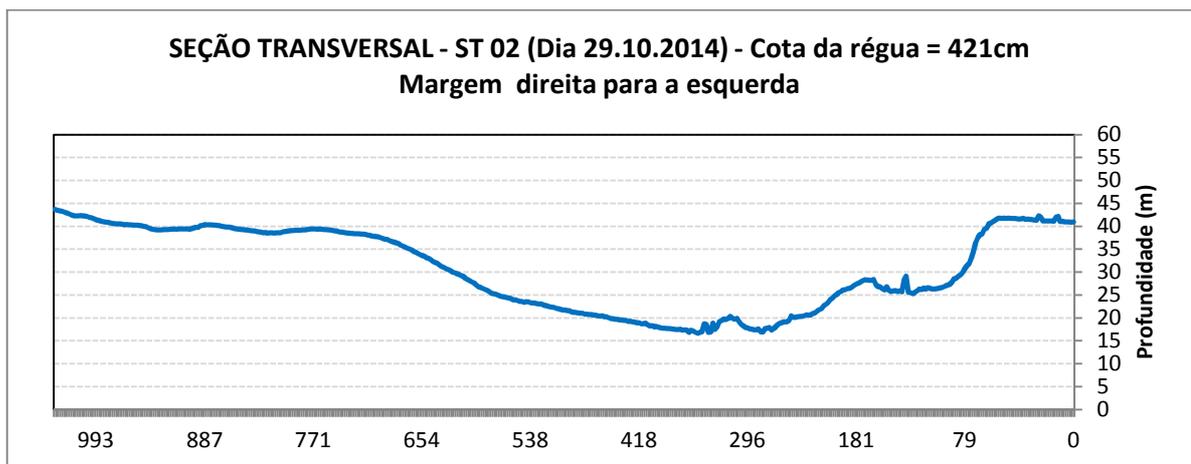


Figura 36 – Perfil Transversal do rio Madeira.

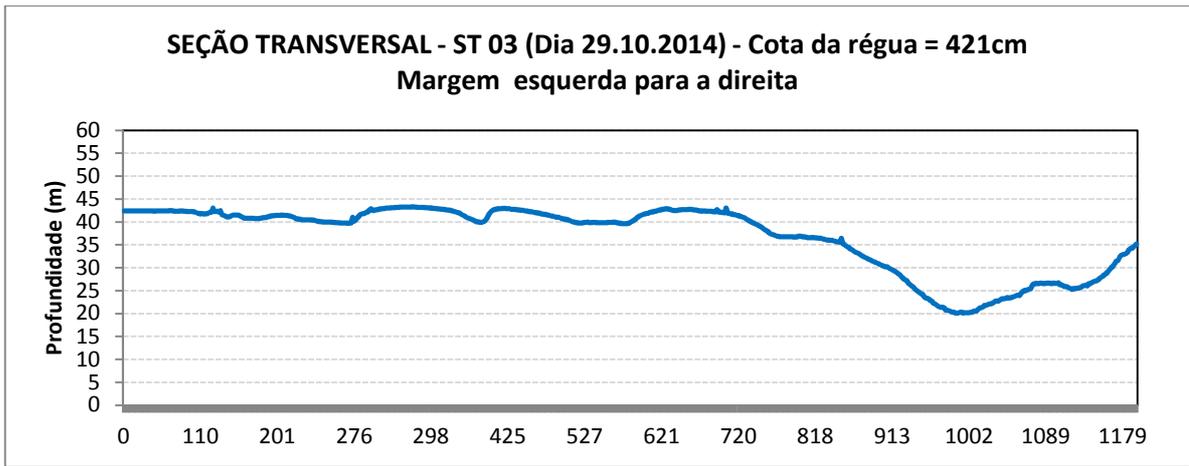


Figura 37 – Perfil Transversal do rio Madeira.

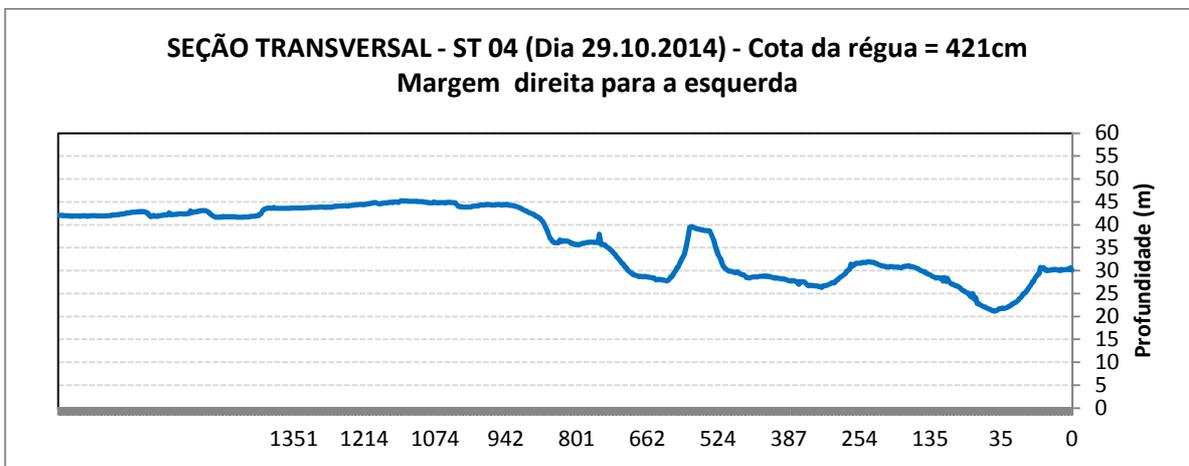


Figura 38 – Perfil Transversal do rio Madeira.

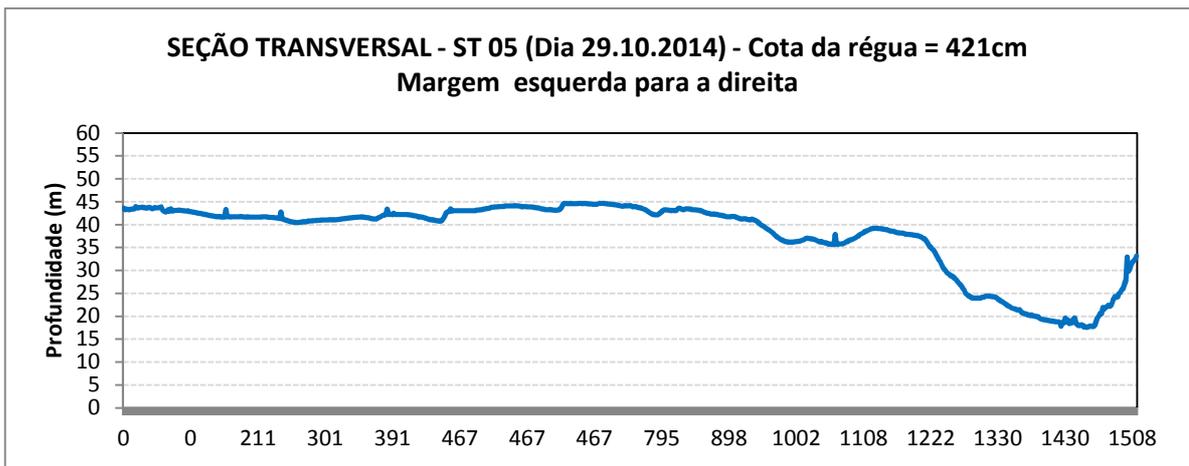


Figura 39 – Perfil Transversal do rio Madeira.

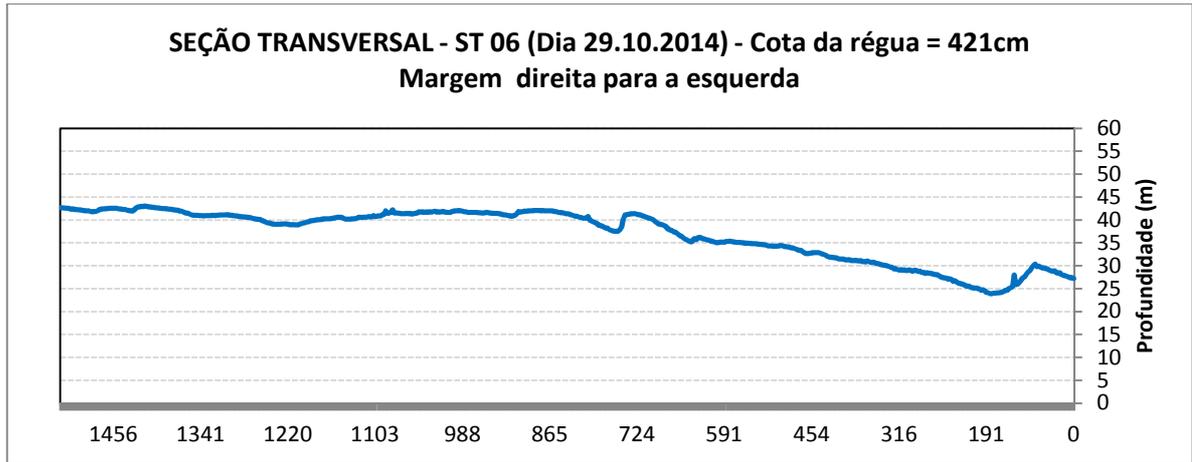


Figura 40 – Perfil Transversal do rio Madeira.

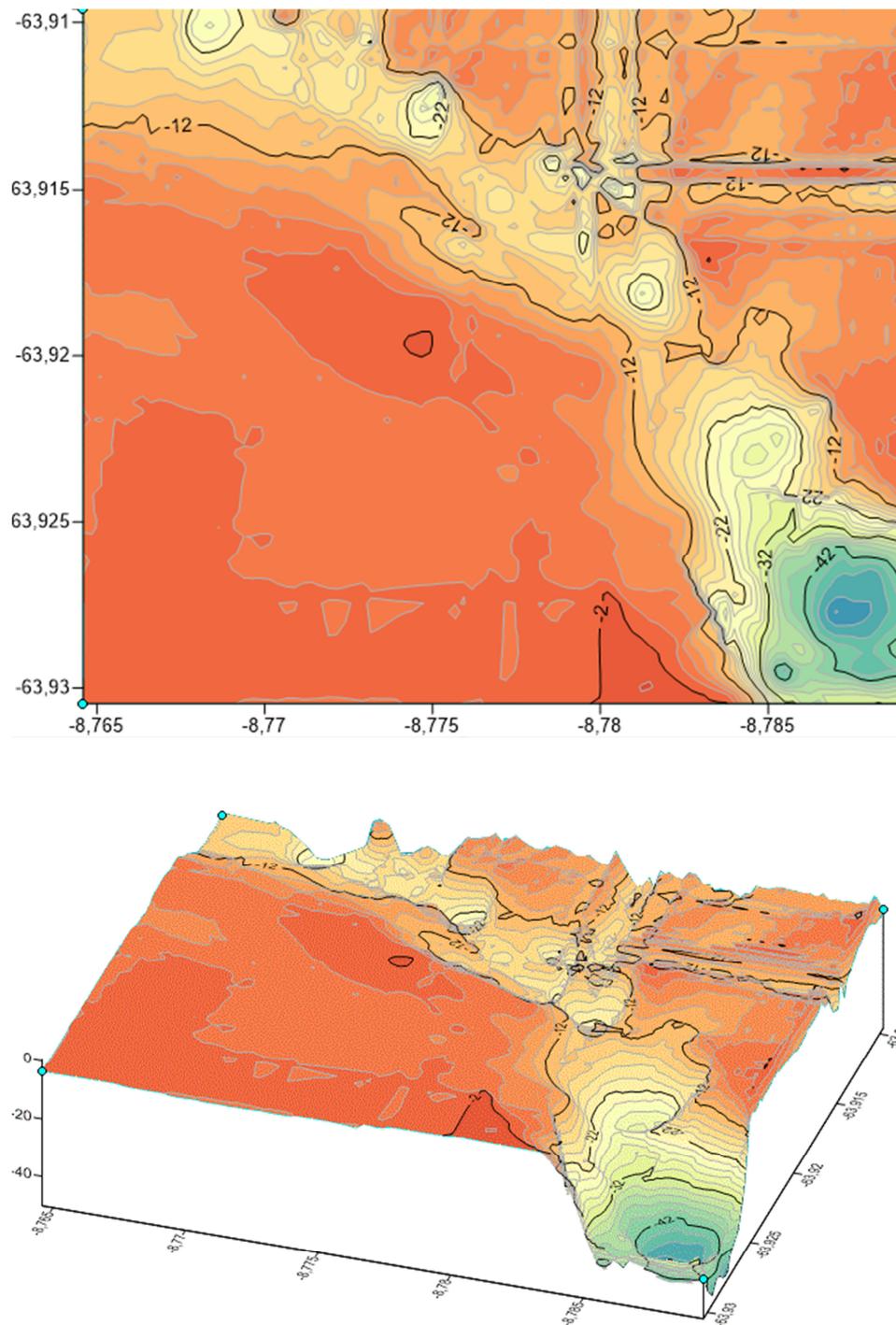


Figura 41 – Curvas de Nível e Perspectiva tridimensional das seções analisadas

A Figura 41 mostra a interpolação de todos os perfis batimétricos levantados no estudo, apresentando as curvas de nível do fundo do rio, além de uma visão em perspectiva tridimensional, sendo uma importante ferramenta para futuras intervenções de obras civis.

7. CONSIDERAÇÕES

As medições realizadas nos anos de 2013 e 2014, para o trecho de 3,0 km do rio Madeira, próximo ao bairro Triângulo, mostraram resultados condizentes para um trecho de rio curvilíneo, como é o caso do rio Madeira neste ponto estudado, ou seja, ocorrências de processos que envolvem o transporte e a deposição de sedimentos. O formato do rio em curva é um fator relevante, uma vez que o gradiente de velocidade, aliado à conformação física e geológica do leito, causa correntes secundárias com movimento rotacional contra as margens, originando processos erosivos e de deposição.

A partir da análise dos perfis foi possível identificar um padrão no comportamento da seção transversal. As medições permitiram observar uma plataforma praticamente plana, numa extensão de cerca de 800,0 m, partindo da margem esquerda do rio, com profundidade de até 5,0 m. A partir deste ponto o rio começa a atingir profundidades maiores, como já mostrado em capítulo anterior. Isto pode ser explicado pelo fato deste lado do rio (esquerdo) ser numa margem convexa tendo, portanto, um processo mais acelerado de deposição de sedimentos, em detrimento à margem oposta (direita) que sofre com o processo erosivo (margem côncava).

As Figuras 42, 43 e 44 apresentam uma comparação entre trechos do rio Madeira (perfil transversal). Os perfis levantados mostram trechos do rio que sofreu processo de sedimentação e erosão ao longo dos últimos 2 anos. Na Figura 42 pode-se observar que, praticamente 80% do perfil transversal sofreu processo de sedimentação (partindo da margem esquerda) e na margem direita processo erosivo. Já na Figura 44, houve pouca sedimentação, sendo que na margem direita novamente o processo erosivo em destaque.

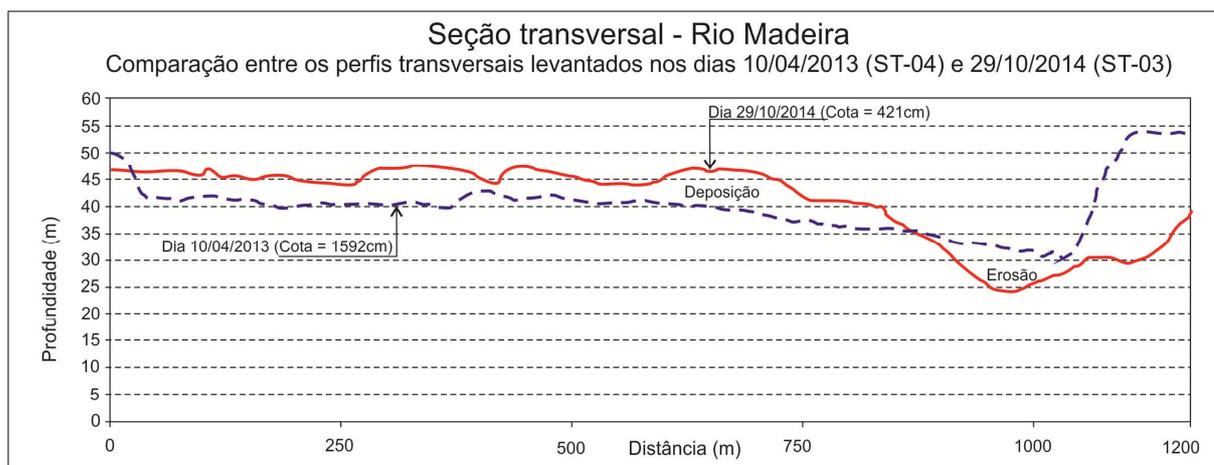


Figura 42 – Comparação entre perfis transversais levantados nos anos de 2013 e 2014.

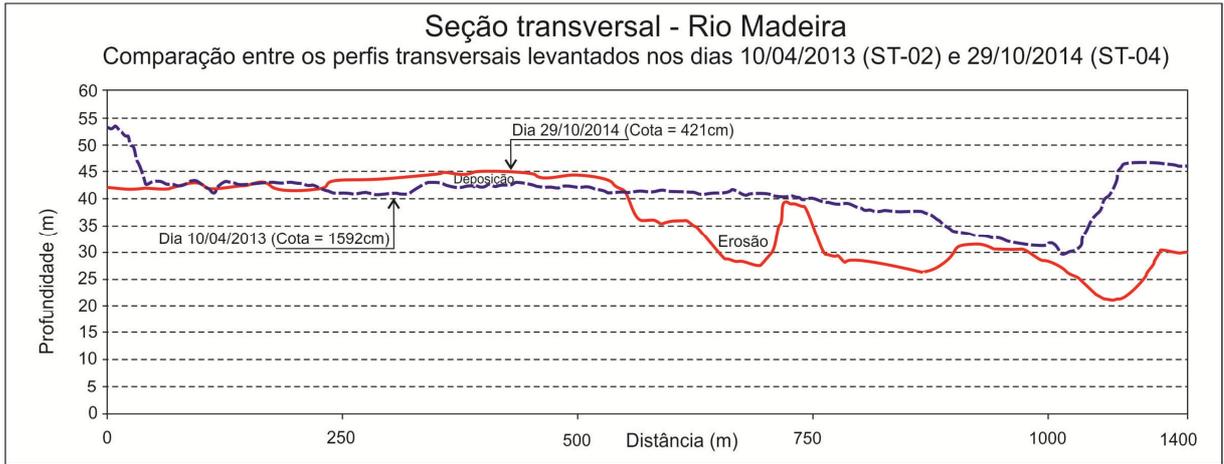


Figura 43 - Comparação entre perfis transversais levantados nos anos de 2013 e 2014.

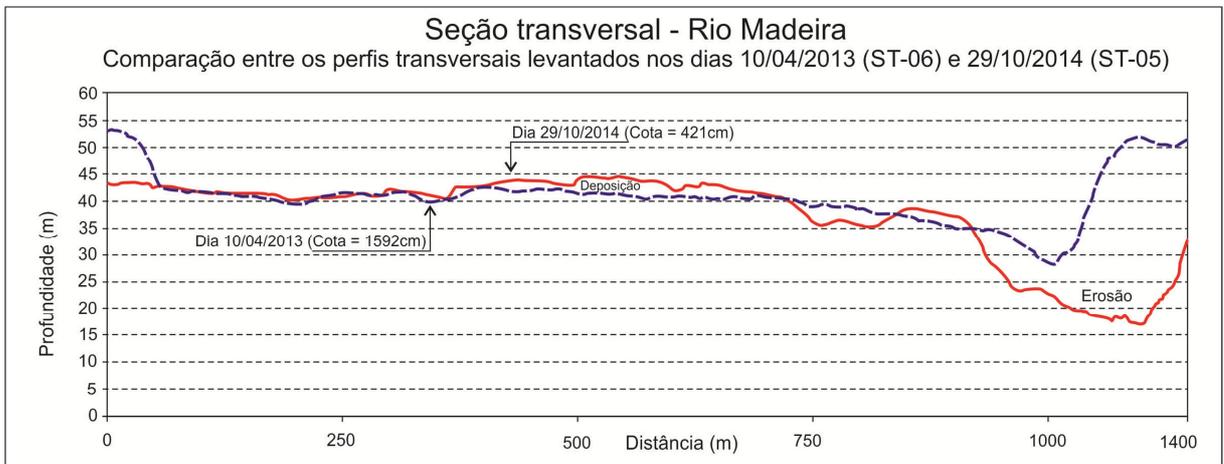


Figura 44 - Comparação entre perfis transversais levantados nos anos de 2013 e 2014.

Fica evidente que o canal principal do rio está localizado na margem direita. As Figuras 45 e 46 apresentam o modelo digital de elevação do leito do rio Madeira para os anos de 2013 e 2014.

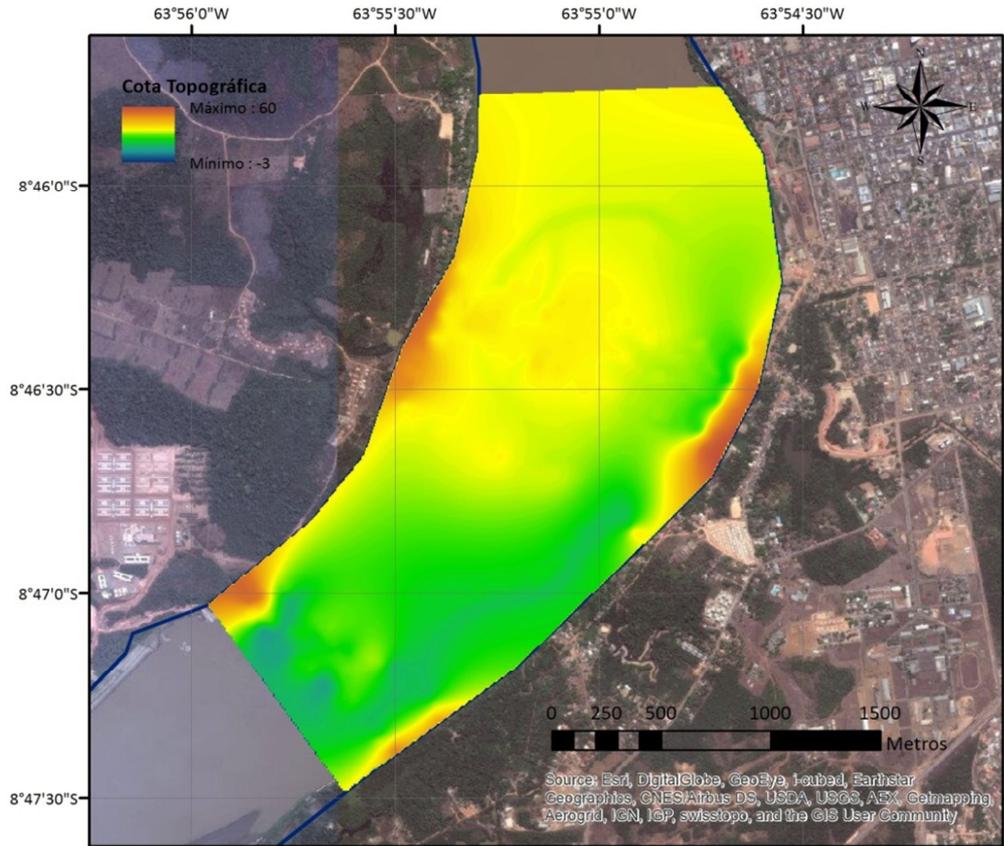


Figura 45 – Modelo digital de elevação do leito do rio Madeira (ano de 2013).

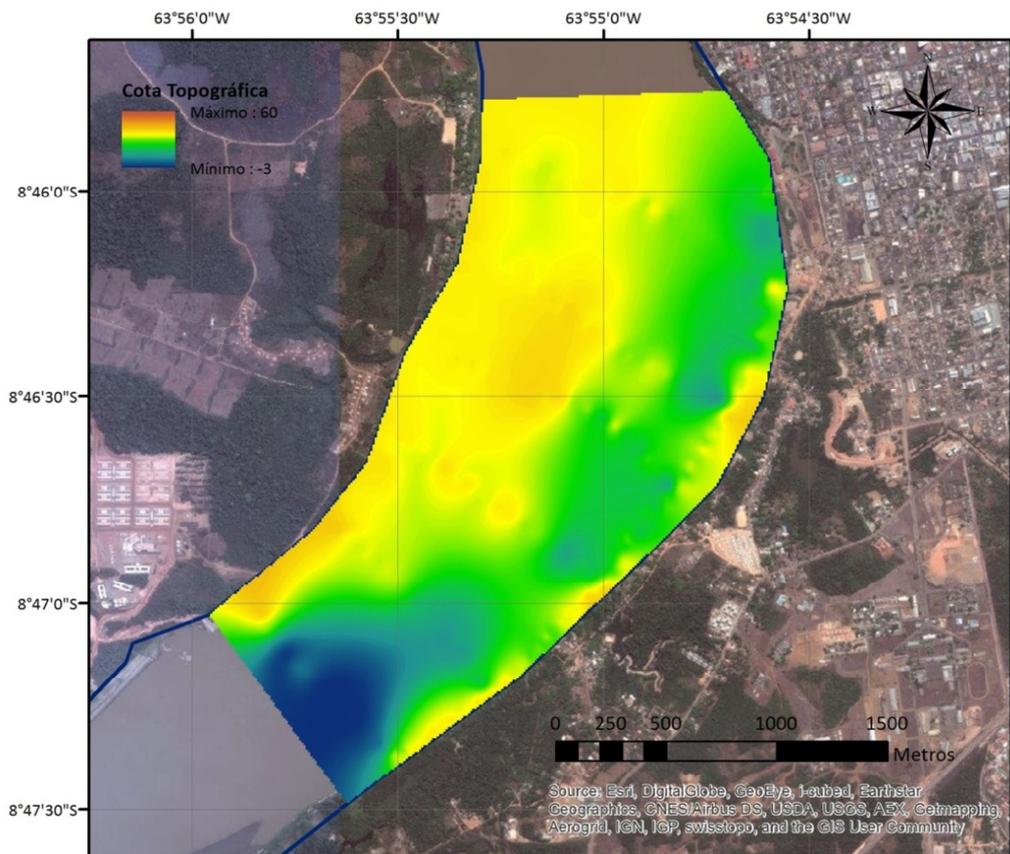


Figura 46 – Modelo digital de elevação do leito do rio Madeira (ano de 2014).

8. RECOMENDAÇÕES

O trabalho realizado na localidade do bairro Triângulo, em Porto Velho/RO, teve como objetivo conhecer a morfologia submersa do trecho do rio Madeira a partir do levantamento batimétrico da região.

Recomenda-se para continuidade dos estudos que as seguintes medidas sejam adotadas:

- Ampliação da área levantada pela batimetria de um trecho ainda mais próximo a UHE Santo Antônio até um trecho ligeiramente a jusante da seção de medição de vazão operada pela CPRM, para subsidiar estudos mais detalhados;
- Realização anual de uma campanha de levantamento batimétrico do trecho estendido até a seção de medição durante a época da vazante, para monitorar as alterações decorrentes das cheias neste período;
- Modelagem hidrodinâmica para análise do comportamento das velocidades e linha d'água ao longo do trecho urbano de Porto Velho;
- Realização esporádica de medições de vazão na seção da antena, visando monitorar também o início do trecho urbano de Porto Velho.

9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000. Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios. Brasília, 2000.

CARVALHO, N.O. Hidrossedimentologia prática, 2008. 2ª ed., ver., atual. e ampliada. – Rio de Janeiro: Interciência.

GOOGLE EARTH 4.0. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em: 13 nov. 2014.

MARTINELLI, L., DEVOL, A.; FORSBERG, B.; VICTORIA, R.; RICKEY, J.; RIBEIRO, M. Descarga de sólidos dissolvidos totais do Rio Amazonas e seus principais tributários. Geochim. Brasil, 3:141–148, 1989.

SANTOS, I. et al., 2001. Hidrometria aplicada. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento.