

# AFROS & AMAZÔNICOS



## ANÁLISE DOS PROCESSOS EROSIVOS DO RIO MADEIRA A JUSANTE DA UHE SANTO ANTÔNIO EM PORTO VELHO

*Analysis of the Erosive Processes of the Madeira River Downstream of the  
Santo Antônio HPP in Porto Velho*

*Andreia Tamy Konasugawa Pereira\**

*Janduir Silva Freitas Filho\*\**

**Resumo:** O presente trabalho tem por objetivo analisar os processos hidrossedimentológicos do Rio Madeira após a implantação do reservatório da UHE Santo Antônio e estudar os impactos erosivos que ocorrem a jusante do empreendimento, na cidade de Porto Velho. Através dos dados hidrossedimentológicos, perfiltopométrico e de imagens de satélite, no período anterior e posterior ao enchimento do reservatório, realizou-se uma análise comparativa entre os dados a montante e a jusante da UHE Santo Antônio. Os resultados obtidos nestas análises permitiram constatar a ocorrência de grandes mudanças nos processos hidrossedimentológicos do Rio Madeira após o enchimento do reservatório e sua ligação com os desbarrancamentos ocorridos em frente da cidade de Porto Velho.

**Palavras-Chave:** Desbarrancamentos; Rio Madeira; UHE Santo Antônio; Processos hidrossedimentológicos.

### Introdução

A hidrossedimentologia trata dos aspectos do estudo da sedimentologia (estudo dos sedimentos) com envolvimento restrito aos cursos d'água e lagos. Ligada a muitos campos da engenharia, o estudo e aplicação da hidrossedimentologia abrange a geração de energia hidráulica, navegação, irrigação, agricultura, hidrologia entre outros.

Segundo ainda Carvalho (2008), a construção de barragens e formação de reservatório ocasionam mudanças significativas no curso d'água tanto a montante da

obra quanto a jusante. Em geral pode-se dizer que no reservatório ocorrem diferentes processos de depósitos de sedimento enquanto no trecho a jusante ocorrem processos erosivos e mudanças morfológicas. Essas mudanças são ocasionadas pela modificação das vazões líquida e sólida efluente à barragem.

O reservatório retém tanto os sedimentos quanto os nutrientes, afetando aspectos da fauna, flora e depósitos a jusante, como na foz do curso d'água (CARVALHO, 2008).

A retenção de sedimentos no reservatório provoca um escoamento de água mais limpa para a jusante da barragem. Esse escoamento límpido, associado com sua maior energia, devido à liberação para a jusante de energia potencial acumulada no reservatório, aumenta o poder erosivo do escoamento, provocando degradação, com aprofundamento da calha do rio e erosão das margens. A regularização do curso do curso d'água a jusante da margem traz grande influência nesse processo erosivo.

\* Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Rondônia (2014), possui duas especializações em andamento: em Patologia das Construções e Avaliações e em Perícias de Engenharia pelo Instituto de Pós-Graduação (IPOG).

\*\* Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (2008), mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (2011) e doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. Professor da Faculdades Integradas de Cacoal (UNESC).



Por outro lado, a atenuação dos picos de cheias a jusante diminui os problemas de inundação, mas impede o espalhamento de sedimentos finos contendo nutrientes nas várzeas e matas ciliares, além de diminuir as concentrações de nutrientes da cadeia alimentar da ictiofauna (CARVALHO e WILSON JR, 1998).

Aparentemente os intensos processos erosivos observados nas margens do Rio Madeira, após a formação do reservatório da UHE Santo Antônio e a passagem das águas pelos vertedores, vem ocasionando grandes impactos ambientais, como o deslizamento de barrancos em ambas as margens do Rio Madeira, localizados no trecho a jusante da UHE Santo Antônio, junto à cidade de Porto Velho.

A realização deste estudo é importante para buscar compreender as possíveis causas dos desbarrancamentos e redução das margens do Rio Madeira. Para isto, é necessário fazer um estudo a partir de um levantamento de dados hidrossedimentológicos.

Através do presente estudo será possível observar se existe uma relação dos impactos identificados com a operação da UHE Santo Antônio. Também será possível prover um embasamento teórico para minimizar os efeitos ambientais e contribuir para solucionar os problemas diretos e indiretos relacionados.

### Escolha da área de estudo

O Rio Madeira é um dos 10 maiores rios do mundo, sendo o maior tributário do Rio Amazonas, com bacia hidrográfica de 1.420.000 Km<sup>2</sup>. Nascentes na Cordilheira dos Andes (Rio Mamoré, Madre de Dios e Beni) com regime de degelo anual. Possui a maior descarga sólida de sedimentos dos rios amazônicos. Em Porto Velho este valor médio é de 1.600.000 t/dia ou 580.000.000 t/ano (17.000.000 t/dia-max) que corresponde a 50% da descarga sólida do Rio Amazonas. Apresenta uma vazão média em Porto Velho de 19.000m<sup>3</sup>/s (Itaipu 12.500, Tucuruí 11.000m<sup>3</sup>/s), e vazões

entre 2.500m<sup>3</sup>/s (outubro) e 45.000m<sup>3</sup>/s (março) (PEREIRA, 2006). Em 30/03/2014 está vazão atingiu o maior valor observado, chegando a 60.600m<sup>3</sup>/s.

Desde o dia 02 de janeiro de 2012, com a abertura das comportas da Usina Hidrelétrica (UHE) Santo Antônio, após o enchimento de seu reservatório, os jornais de Porto Velho trouxeram à tona várias reportagens sobre desbarrancamentos ao longo do bairro triângulo, margem direita do Rio Madeira. O jornal eletrônico Rondonia Ao Vivo, no dia 03/01/2012, trouxe a seguinte manchete: "BANZEIRO – Usina abre comportas e força das águas do Rio Madeira derruba barrancos e pode arrastar residências" (Figuras 1 e 2).

Figura 1. Barrancos da margem do bairro Triângulo desmoronando



Fonte: Jornal Eletrônico [RondoniaoVivo.com](http://RondoniaoVivo.com) de 2012

Figura 2. Casa do senhor que mora a mais de 28 anos e nunca viu esta situação



Fonte: Jornal Eletrônico [RondoniaoVivo.com](http://RondoniaoVivo.com) de 2012

### Dados hidrossedimentológicos

Os dados utilizados neste trabalho foram retirados do *Relatório de Consolidação e Análise dos Dados Hidrossedimentológicos do Rio Madeira – Janeiro de 2008 a*



Abril de 2013, fornecido pela Santo Antônio Energia. Este relatório foi previsto no PBA do AHE Santo Antônio em cumprimento à Licença Prévia nº 251/2007, concedida pelo IBAMA.

Para início de análise, foram avaliados os resultados das medições de descarga sólida, apresentados no Relatório da Santo Antônio Energia, das estações fluviométricas:

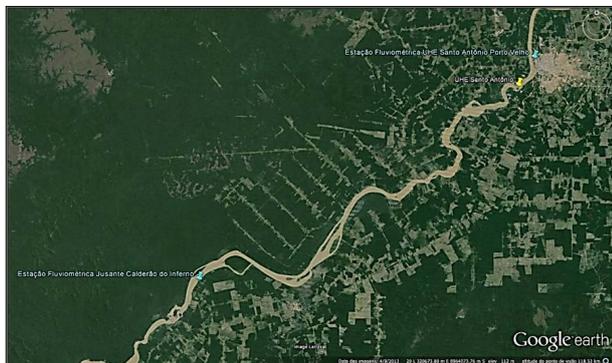
Tabela 1. Coordenadas UTM das Estações Fluviométricas

Estação	Coordenadas UTM	
	Norte (m)	Este (m)
Jusante Caldeirão do Inferno	8.982.304	323.362
UHE Santo Antônio Porto Velho	9.032.851	399.179

Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2013), adaptada pela autora

A Figura 3 apresenta a localização das duas estações fluviométricas citadas acima. A imagem foi retirada do software Google Earth.

Figura 3. Estações Fluviométrica Jusante Caldeirão do Inferno e UHE Santo Antônio Porto Velho



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

### Perfis topobatimétricos

Os dados utilizados neste trabalho foram retirados do *Relatório Levantamento topobatimétrico do Rio Madeira para Acompanhamento da Evolução do Leito – novembro 2012*, fornecido pela Santo Antônio Energia. Este relatório foi previsto no PBA do AHE Santo Antônio em cumprimento à Licença Prévia nº 251/2007, concedida pelo IBAMA.

Foram analisadas algumas seções topobatimétricas, localizadas a jusante da UHE Santo Antônio nas seguintes coordenadas UTM:

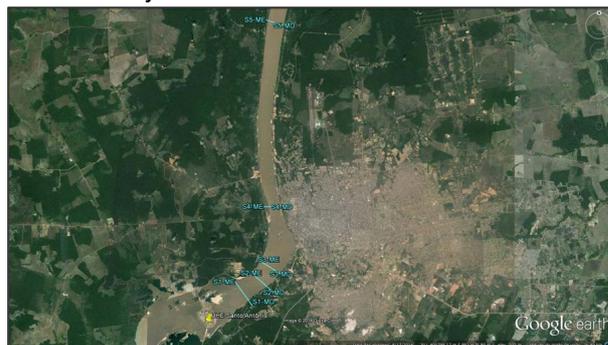
Tabela 2. Coordenadas UTM das seções topobatimétricas a jusante da UHE Santo Antônio

Nome da seção	Coordenadas UTM			
	Margem Esquerda		Margem Direita	
	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)	Este (m)
Seção 1 – S1	9.028.652	396.955	9.027.433	397.840
Seção 2 – S2	9.029.100	397.772	9.028.116	398.918
Seção 3 – S3	9.029.779	398.111	9.029.048	399.268
Seção 4 – S4	9.032.447	398.377	9.032.429	399.314
Seção 5 – S5	9.041.856	398.472	9.041.558	399.408

Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2012), adaptada pela autora

A Figura 4 apresenta a localização das seções topobatimétricas citadas acima. A imagem foi retirada do software Google Earth.

Figura 4. Localização das seções topobatimétricas a jusante da UHE Santo Antônio



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

Também foram analisadas algumas seções topobatimétricas, localizadas a montante da UHE Santo Antônio nas seguintes coordenadas UTM:

Tabela 3. Coordenadas UTM das seções topobatimétricas a montante da UHE Santo Antônio

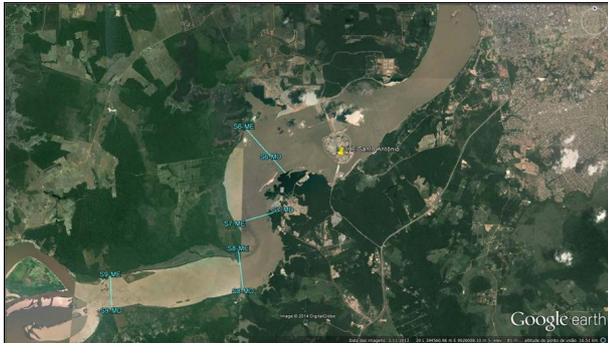
Nome da seção	Coordenadas UTM			
	Margem Esquerda		Margem Direita	
	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)	Este (m)
Seção 6 – S6	9.027.491	392.553	9.026.554	393.407
Seção 7 – S7	9.024.444	392.276	9.024.885	393.796
Seção 8 – S8	9.023.674	392.388	9.022.345	392.554
Seção 9 – S9	9.022.857	388.394	9.021.729	388.438
Seção 10 – S10	8.983.911	344.615	8.981.393	344.479

Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2012), adaptada pela autora



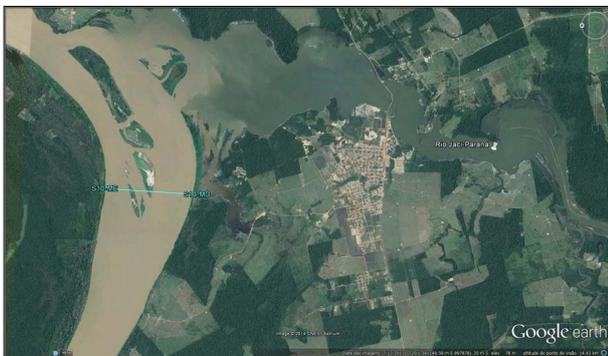
As Figuras 5 e 6 apresentam a localização das seções topobatimétricas citadas acima. As imagens foram retiradas do software Google Earth.

Figura 5. Localização das seções topobatimétricas 6, 7, 8 e 9 a montante da UHE Santo Antônio



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

Figura 6. Localização da seção topobatimétricas 10 a montante da UHE Santo Antônio



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

### Imagens de satélite de antes e depois do reservatório

No software do Google Earth, foram separadas as imagens disponíveis para o trecho a jusante da UHE Santo Antônio até a frente da cidade de Porto Velho. Foram identificadas 10 imagens em datas diferentes.

Com as datas das imagens de satélite, identificou-se as cotas do Rio Madeira, através do Sistema de Informações Hidrológicas da ANA, no site da ANA (<http://www.ana.gov.br>) através do portal *HidroWeb* – Séries Históricas, referente a Estação Porto Velho (Código da Estação: 15400000).

Compararam-se as imagens de satélite do período anterior ao enchimento do reservatório com as imagens após o enchimento.

### Análise dos dados hidrossedimentológicos

Os dados utilizados neste trabalho foram retirados do *Relatório de Consolidação e Análise dos Dados Hidrossedimentológicos do Rio Madeira – Janeiro de 2008 a Abril de 2013*, fornecido pela Santo Antônio Energia. Este relatório foi previsto no PBA do AHE Santo Antônio em cumprimento à Licença Prévia nº 251/2007, concedida pelo IBAMA.

Na Licença de Operação nº 1044/2011, concedida pelo IBAMA, estabeleceu na condicionante 2.11:

Apresentar no prazo de 180 dias, no âmbito do Programa de Monitoramento Hidrossedimentológico, propostas de ações com vistas ao monitoramento de potenciais processos erosivos a jusante da UHE Santo Antônio, incluindo o detalhamento das atividades previstas e o respectivo cronograma de execução. Mediante a constatação de ocorrências de erosões a jusante do barramento, ocasionada pelo desequilíbrio sedimentológico associado às usinas, deverão ser adotadas ações mitigatórias/compensatórias compartilhadas entre as UHE Santo Antônio e Jirau.

Como mostrado na citação anterior, o IBAMA já previa possíveis impactos a jusante da UHE Santo Antônio decorrentes do desequilíbrio hidrossedimentológico relacionados com os reservatórios.

Em 03 de fevereiro de 2012, a Santo Antônio Energia firmou um TAC com o Ministério Público de Rondônia, sendo obrigado, a construir um enrocamento de pedra ao longo dos barrancos, reduzindo os desbarrancamentos que já haviam levado uma larga faixa de terras e muitas edificações ao longo da EFMM.

Segundo relatos de moradores da região afetada, as praias que se formavam durante o verão a oeste do centro urbano da cidade de Porto Velho não apareceram mais após o enchimento do reservatório.

A incorporação dos sedimentos dos barrancos e dos fundos dos canais, possivelmente vem provocando desbarranca-



mentos ao longo de grande extensão do Rio Madeira, atingindo especialmente as vilas de São Carlos, Calama, Nazaré e outras.

A Oeste do centro urbano da cidade de Porto Velho, a erosão das margens do Rio Madeira vem ocorrendo em várias partes. Somente um pequeno trecho, cujo leito e barrancos são formados por lateritas, em frente à Assembleia Legislativa, não foram sendo erodidos.

Após a cheia de 2014, quando a vazão do Rio Madeira atingiu cerca de 65.000 m<sup>3</sup>/s, segundo reportagem da Folha de São Paulo, uma extensa camada de sedimentos de mais de 2 metros de espessura, cobriu parte daquela região.

No estudo realizado pelo consultor Sultan Alam (2007), já previa que as vazões acima de 40.000 m<sup>3</sup>/s seriam suficientes para remover as areias e sedimentos acumulados no reservatório em períodos de baixa vazão.

Os sedimentos removidos do reservatório de Santo Antônio, provavelmente sedimentaram na região de São Carlos de forma mais intensa, por ser uma região com baixas velocidades e grande área alagadas (foz do rio Jamari).

### **Análise do transporte de sedimento para descargas sólidas totais períodos próximos antes e depois do reservatório**

A Tabela 4, mostra as análises referentes às descargas sólidas totais das duas estações fluviométricas, no período que antecedeu a formação do reservatório da UHE Santo Antônio.

A Tabela 5 apresenta os dados das estações fluviométricas Jusante Caldeirão do Inferno e UHE Santo Antônio Porto Velho, para o período após a formação do reservatório.

Notou-se que, para descargas líquidas semelhantes e em datas próximas, os valores da descarga sólida total foram semelhantes para as duas estações fluviométricas. Nas análises 1, 2, 5, 10, 12, 13,

15 e 16 da Tabela 4, constatou-se que a produção de descarga sólida total da estação de Santo Antônio Porto Velho foi cerca de 10% a menos em relação à estação Jusante Caldeirão do Inferno. Nas análises 3, 4, 6, 7, 8, 11, 14 e 17, da mesma tabela, a produção de descarga sólida total da estação de Santo Antônio Porto Velho foi superior à da estação Jusante Caldeirão do Inferno, chegando a valor de 104% a mais de descarga.

Na Tabela 5, apenas as análises 1 e 8 apresentaram valores superiores de produção de descarga sólida total da estação de Santo Antônio Porto Velho em relação a estação Jusante Caldeirão do Inferno. Nas demais análises da Tabela 5, a produção de descarga sólida total da estação de Santo Antônio Porto Velho foi cerca de 45% a menos em relação a estação Jusante Caldeirão do Inferno, chegando a valores de 64% de redução.

No tópico referente ao transporte de sedimentos a jusante da UHE Santo Antônio, no EIA, página 185, da AHE Santo Antônio e Jirau, apresenta as seguintes informações:

De forma geral, a implantação de um reservatório tende a introduzir modificações na morfologia fluvial a jusante do barramento por dois motivos: a operação do reservatório pode acarretar erosão de margens, devido à variação mais frequente de níveis d'água, e porque a retenção de sedimentos no lago cria um desequilíbrio sedimentológico a jusante, devido à diminuição do aporte de sólidos.

[...] estima-se que o reservatório de Santo Antônio reterá cerca de 19% dos sedimentos a ele afluentes no início de sua operação. Isso significa que mais de 80% do sedimento afluente é descarregado para jusante inicialmente. Essa retenção decresce para menos de 5% em 15 anos e de 1,0% em torno do final dos 30 anos seguintes. Portanto, é provável que a quantidade de sedimento a ser descarregado inicialmente para jusante seja entre 81% e 90% do total da carga sólida do rio, o que é suficiente, em princípio para manutenção das características de calha fluvial em questão (FURNAS; ODEBRECHT; LEME 2006).



Diferente do que foi previsto no Estudo de Impacto Ambiental da AHE Santo Antônio, os valores analisados para retenção de sedimentos (descarga sólida total) da Tabela 5, foram superiores a 19%, chegando a valores de retenção de até 64%.

### Avaliação comparativa dos dados das curvas-chave das estações antes e depois do enchimento do reservatório

A Figura 7 apresenta a curva-chave de cada estação fluviométricas Jusante Caldeirão do Inferno e UHE Santo Antônio Porto Velho, no período que antecedeu o enchimento do reservatório, até dezembro de 2011.

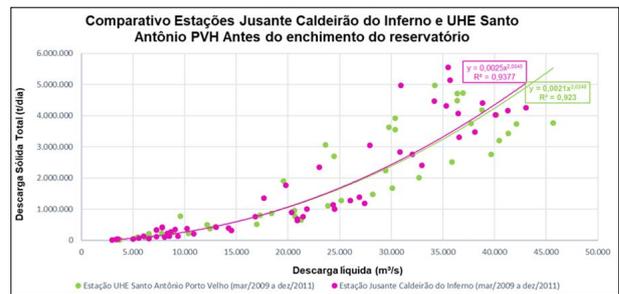
Observou-se que para as duas estações fluviométricas, as curvas-chave obtidas apresentaram tendências muito semelhantes. Desta forma, é possível admitir que antes do enchimento do reservatório, as estações Jusante Caldeirão do Inferno e UHE Santo Antônio Porto Velho apresentavam valores de transporte de descarga sólida total próximos para as mesmas vazões analisadas.

A Figura 8 mostra a curva-chave traçada para as mesmas estações fluviométricas citadas anteriormente no período posterior ao enchimento do reservatório.

Diferente da Figura 7, a curva-chave dos dados após o enchimento do reservatório foram distintos entre as duas estações. A estação UHE Santo Antônio Porto Velho apresentou uma curva-chave inferior ao que foi traçado na Figura 7 referente a mesma estação. A diferença entre as curvas-chave da Estação UHE Santo Antônio Porto Velho pode ser vista na Figura 9.

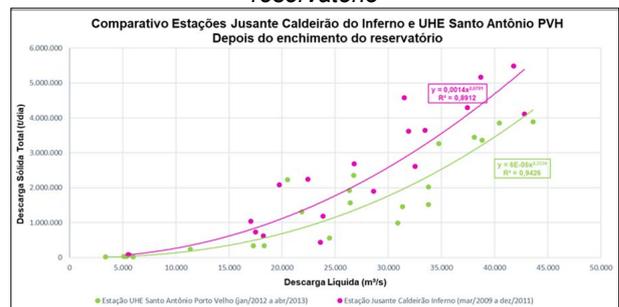
Uma possível explicação para estas alterações, seria a provável retenção de sedimentos no reservatório da UHE Santo Antônio, provocando a diminuição da descarga sólida total do curso d'água a jusante do reservatório.

Figura 7. Gráfico comparativo das curvas de descarga sólida total das Estações Jusante Caldeirão do Inferno e Santo Antônio Porto Velho antes do enchimento do reservatório



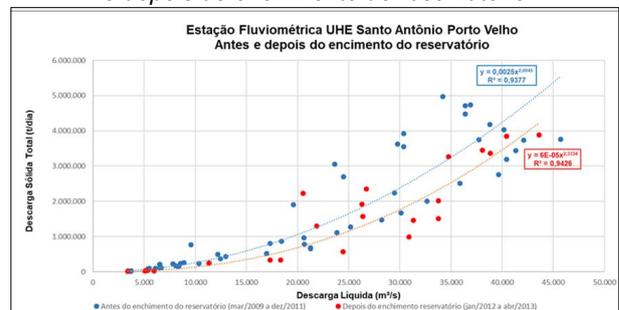
Fonte: A autora

Figura 8 – Gráfico comparativo das curvas de descarga sólida total das Estações Jusante Caldeirão do Inferno e Santo Antônio Porto Velho depois do enchimento do reservatório



Fonte: A autora

Figura 9 – Gráfico comparativo das curvas de descarga sólida total da Estação Santo Antônio Porto Velho antes e depois do enchimento do reservatório



Fonte: A autora

### Análise dos perfis topobatimétricos: Seções a jusante da UHE Santo Antônio

Analisando o perfil topobatimétrico da Seção 1 (Figura 10), nota-se que a seção analisada é de leito móvel devido as várias modificações observadas nas diferentes etapas da construção da hidrelétrica. Inicialmente, 2009, o perfil da seção 1 era mais aberta e com menores profundidades. Nos perfis de 2011, com a construção das ensecadeiras na margem direita do rio, segundo o relatório da PCE (2012), houve uma mudança do escoamento do rio, concentrando-se no canal principal. Esta mu-



Tabela 4 - Dados hidrossedimentológicos antes da formação do reservatório da UHE Santo Antônio

Análise	Estação	Data	Leitura da Régua (cm)	Conc. (mg/l)	Descarga Líquida (m³/s)	Descarga Sólida em Suspensão (t/dia)	Descarga Sólida Total (t/dia)	Descarga Sólida de Arrasto (t/dia)	Descarga Sólida Total (t/dia) por Faixa Granulométrica				
									Argila + Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho
1	Jusante C. Inferno	14/2/2009	1.828	1.181,00	40,775	4.160,645	4.365,792	17,474	3.172,887	1.036,602	138,000	17,048	1,254
	S. Antônio PVH	3/4/2009	1.551	1.103,00	40,196	3.830,662	4.027,329	22,487	3.357,616	589,071	43,938	25,174	1,470
2	Jusante C. Inferno	18/4/2009	1.817	992,30	38,081	3.264,865	3.479,633	18,938	2.553,009	850,695	56,584	17,458	1,886
	S. Antônio PVH	16/4/2009	1.538	748,80	39,656	2.565,578	2.755,192	16,209	2.155,437	541,352	51,953	6,450	0
3	Jusante C. Inferno	20/5/2009	1.626	444,10	27,423	1.052,218	1.179,231	9,170	731,469	414,231	32,492	1,020	19
	S. Antônio PVH	29/5/2009	1.337	588,30	28,223	1.361,398	1.470,864	9,860	1.056,216	387,088	20,444	7,032	82
4	Jusante C. Inferno	29/5/2009	1.541	413,90	24,511	876,533	997,381	8,884	571,943	389,780	36,148	511	1
	S. Antônio PVH	16/2/2009	1.227	496,50	23,866	1.023,782	1.115,008	7,428	788,907	299,904	23,073	3,103	21
5	Jusante C. Inferno	29/6/2009	1.409	356,40	20,892	643,318	688,899	6,762	486,731	211,283	18,391	2,381	114
	S. Antônio PVH	22/6/2009	1.060	345,80	21,281	635,807	675,948	6,760	487,226	173,122	14,658	929	14
6	Jusante C. Inferno	17/12/2009	1.436	1.123,00	23,036	2.235,077	2.347,441	8,636	2.049,318	270,822	23,279	3,483	540
	S. Antônio PVH	19/12/2009	1.105	1.219,00	24,472	2.577,420	2.693,434	7,064	2.319,606	352,044	21,591	193	0
7	Jusante C. Inferno	7/7/2010	915	100,40	6,526	56,606	59,522	269	53,713	4,913	932	65	0
	S. Antônio PVH	19/7/2010	483	173,70	6,112	91,727	97,195	448	89,205	7,706	274	9	0
8	Jusante C. Inferno	11/8/2010	823	103,80	5,026	45,075	46,584	127	44,646	1,664	337	37	0
	S. Antônio PVH	2/8/2010	453	164,40	5,307	75,382	78,326	187	74,442	3,759	120	6	0
9	Jusante C. Inferno	22/9/2010	703	66,09	3,366	19,220	19,542	9	19,142	390	0	10	0
	S. Antônio PVH	13/9/2010	326	32,36	3,680	10,288	10,751	48	10,322	318	110	1	0
10	Jusante C. Inferno	15/12/2010	1.012	349,00	8,667	261,353	269,752	437	258,202	7,866	3,471	214	0
	S. Antônio PVH	17/12/2010	612	323,10	8,883	247,963	258,347	1,065	235,569	20,513	2,125	140	0
11	Jusante C. Inferno	6/1/2011	1.384	977,00	19,813	1.672,431	1.769,920	6,878	1.518,060	227,842	22,918	1,097	4
	S. Antônio PVH	10/1/2011	1.075	1.083,00	19,571	1.797,429	1.905,335	108	1.734,896	141,415	26,477	2,507	41
12	Jusante C. Inferno	2/3/2011	1.768	1.236,00	38,853	4.149,134	4.408,985	17,342	3.382,515	907,934	107,876	9,830	830
	S. Antônio PVH	14/3/2011	1.505	1.160,00	38,791	3.887,773	4.176,348	20,233	3.170,337	925,172	77,034	3,688	117
13	Jusante C. Inferno	23/3/2011	1.835	1.086,00	41,283	3.873,640	4.157,633	20,017	2.869,165	1.131,618	143,646	12,008	1,195
	S. Antônio PVH	28/3/2011	1.568	888,20	41,316	3.170,645	3.437,341	25,879	2.428,960	929,027	50,156	26,560	2,638
14	Jusante C. Inferno	3/6/2011	1.416	361,10	21,473	669,930	755,194	7,747	452,017	267,423	33,070	2,654	31
	S. Antônio PVH	6/6/2011	1.047	404,00	20,664	721,289	778,077	6,851	550,848	200,610	22,579	3,985	55
15	Jusante C. Inferno	2/8/2011	934	167,50	7,271	105,223	112,835	671	101,196	9,469	1,971	198	0
	S. Antônio PVH	8/8/2011	520	187,00	6,510	105,183	110,824	657	103,150	6,678	956	40	0
16	Jusante C. Inferno	8/9/2011	729	110,90	3,527	33,792	34,661	48	34,119	442	96	4	0
	S. Antônio PVH	12/9/2011	320	92,97	3,451	27,718	28,462	66	27,986	429	47	0	0
17	Jusante C. Inferno	1/12/2011	1.490	417,20	10,240	369,124	378,241	445	371,435	6,024	765	17	0
	S. Antônio PVH	6/12/2011	612	905,40	9,596	750,699	770,842	2,252	759,057	7,882	3,610	293	0

Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2013), adaptada pela autora

Tabela 5 - Dados hidrossedimentológicos após formação do reservatório da UHE Santo Antônio

Análise	Estação	Data	Leitura da Régua (cm)	Conc. (mg/l)	Descarga Líquida (m³/s)	Descarga Sólida em Suspensão (t/dia)	Descarga Sólida Total (t/dia)	Descarga Sólida de Arrasto (t/dia)	Descarga Sólida Total (t/dia) por Faixa Granulométrica				
									Argila + Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Pedregulho
1	Jusante C. Inferno	6/1/2012	1.646	1.181,00	19.739	2.014,087	2.080,144	3.572	1.910,929	167,056	1.973	185	2
	S. Antônio PVH	9/1/2012	1.046	1.217,00	20.524	2.158,063	2.228,610	6.986	2.059,419	143,377	20,443	4.945	426
2	Jusante C. Inferno	18/1/2012	1.789	1.111,00	22.424	2.152,489	2.241,119	3.262	1.982,065	257,702	755	597	0
	S. Antônio PVH	23/1/2012	1.158	642,00	21.861	1.212,603	1.303,534	6,716	1.015,845	263,869	22,044	1.776	0
3	Jusante C. Inferno	15/2/2012	1.923	1.619,00	31.490	4.404,886	4.577,712	7.958	4.125,201	438,954	13,040	496	20
	S. Antônio PVH	17/2/2012	1.377	1.015,00	34.742	3.046,761	3.265,304	14,961	2.590,039	604,826	64,693	5.683	65
4	Jusante C. Inferno	15/3/2012	1.986	1.470,00	38.707	4.916,103	5.172,588	15,727	4.321,960	799,021	45,331	6.163	114
	S. Antônio PVH	19/3/2012	1.528	940,60	38.829	3.155,522	3.365,685	18,179	2.850,951	360,979	136,930	16,618	208
5	Jusante C. Inferno	18/4/2012	1.903	880,00	32.497	2.470,777	2.616,712	10,423	2.238,052	357,000	21,273	387	0
	S. Antônio PVH	24/4/2012	1.427	474,40	33,755	1.383,564	1.514,659	13,778	1.220,007	172,990	113,364	8,021	278
6	Jusante C. Inferno	30/4/2012	1.929	1.255,00	31,919	3.461,022	3.622,813	10,635	3.151,312	441,051	30,024	412	14
	S. Antônio PVH	7/5/2012	1.413	499,10	31,319	1.350,546	1.459,972	13,539	1.231,817	137,834	74,415	14,919	987
7	Jusante C. Inferno	16/5/2012	1.814	548,60	23,849	1.130,408	1.188,994	6,611	1.078,923	96,632	12,159	1,267	14
	S. Antônio PVH	21/5/2012	1.344	335,00	30,897	894,286	995,353	11,573	786,970	119,638	79,377	8,803	565
8	Jusante C. Inferno	5/6/2012	1.807	187,30	23,618	382,205	431,358	6,603	297,751	117,357	15,451	794	5
	S. Antônio PVH	11/6/2012	1.178	240,70	24,452	508,511	564,207	7,243	462,679	57,639	39,388	4,352	149
9	Jusante C. Inferno	20/6/2012	1.763	373,20	18,238	588,084	623,574	3,531	558,707	59,736	4,994	137	0
	S. Antônio PVH	25/6/2012	980	182,20	18,324	288,464	332,680	4,647	156,376	152,964	19,260	3,992	89
10	Jusante C. Inferno	4/7/2012	1.739	456,30	17,489	689,482	727,158	3,425	646,787	75,136	5,077	159	0
	S. Antônio PVH	9/7/2012	933	205,00	17,310	306,599	333,137	4,243	294,533	19,497	15,836	3,243	27
11	Jusante C. Inferno	16/8/2012	1.639	172,40	5,504	81,985	83,346	9	82,850	494	1	0	0
	S. Antônio PVH	27/8/2012	411	67,89	5,345	31,352	32,184	47	31,033	831	281	39	0
12	Jusante C. Inferno	13/11/2012	1.641	139,30	5,581	67,174	78,071	6	77,836	494	0	0	0
	S. Antônio PVH	5/11/2012	389	62,53	5,068	27,379	28,082	32	25,769	1.021	1,170	122	0
13	Jusante C. Inferno	22/1/2013	1.832	121,00	26,782	259,994	2.683,996	7,763	2.497,477	0	17,698	1,312	159
	S. Antônio PVH	17/1/2013	1.192	646,60	26,392	1.474,424	1.568,900	10,012	1.386,345	104,564	68,490	8,007	1,494

Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2013), adaptada pela autora



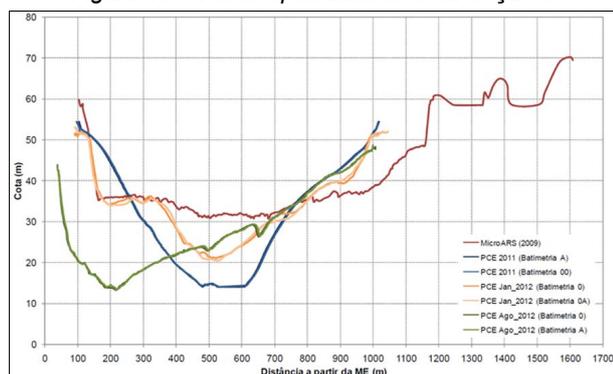
dança brusca no direcionamento do canal junto com o fato de ser uma região de leito móvel, podem ter provocado o aprofundamento da seção, formando um talvegue. Nos perfis de janeiro de 2012, observa-se uma deposição de sedimentos no talvegue e uma erosão na margem esquerda. As seções de agosto de 2012, observa-se um avanço elevado da erosão da margem esquerda com aprofundamento de aproximadamente 18 metros do talvegue e o com o seu deslocamento para a margem esquerda de cerca de 300 metros.

Para o perfil topobatimétrico da Seção 2 (Figura 11), observa-se uma pequena deposição próxima a margem esquerda. De 2011 para 2012, nota-se um aprofundamento médio 10 metros em uma extensão de 400 metros, próximo a margem direita que favorece a ocorrência de deslizamentos dos barrancos da margem direita.

No perfil topobatimétrico da Seção 3 (Figura 12), observa-se uma erosão da margem esquerda e um forte aprofundamento do leito em uma extensão de 600 metros em direção da margem direita, criando condições de deslizamentos dos barrancos desta margem.

No perfil topobatimétrico da Seção 4 (Figura 13), observa-se que a margem direita se manteve estável em decorrência de possível formação laterítica do leito do rio nesta margem. Na margem esquerda, houve um aprofundamento do leito em um trecho de aproximadamente 300 metros de extensão. No talvegue da seção ocorreu uma pequena deposição de sedimentos.

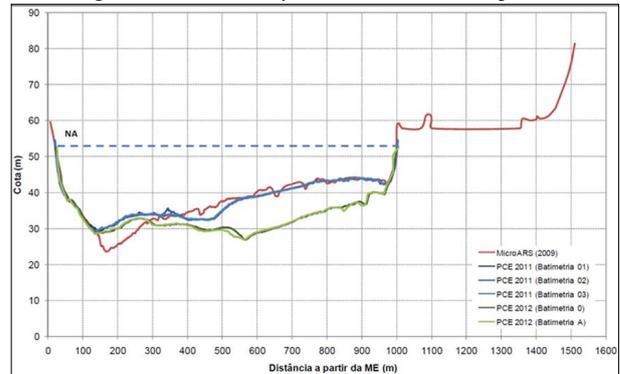
Figura 10 – Perfil topobatimétrico da Seção 1



Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2012)

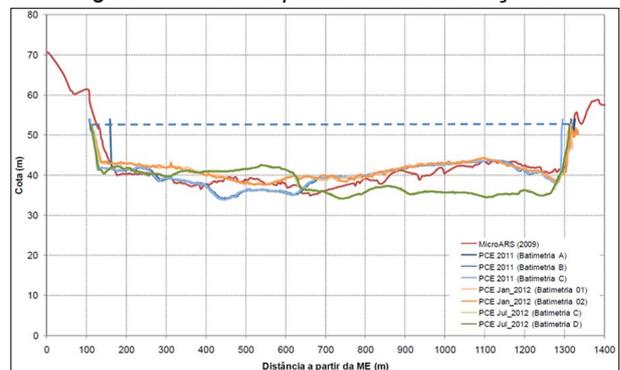
Analisando o perfil topobatimétrico da Seção 5 (Figura 14), observa-se um aprofundamento da margem direita de quase 5 metros em uma extensão de 200 metros, criando condições de instabilidade para os barrancos desta margem.

Figura 11 – Perfil topobatimétrico da Seção 2



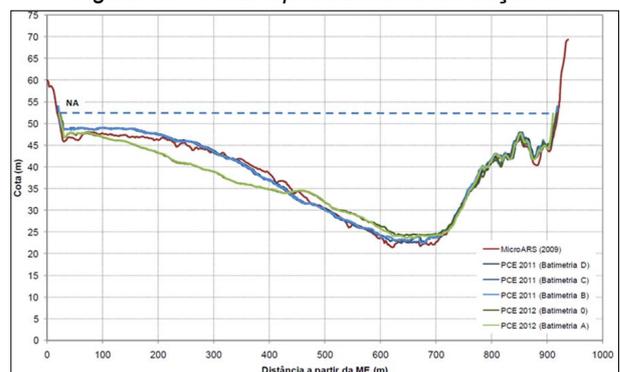
Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2012)

Figura 12 – Perfil topobatimétrico da Seção 3



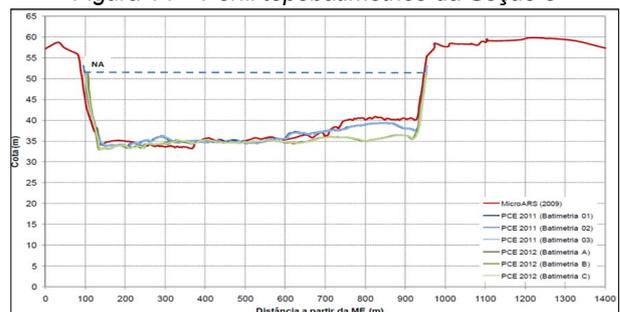
Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2012)

Figura 13 – Perfil topobatimétrico da Seção 4



Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2012)

Figura 14 – Perfil topobatimétrico da Seção 5



Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2012)



## Análise dos perfis topobatimétricos: Seções a Montante da UHE Santo Antônio

Analisando o perfil topobatimétrico da Seção 6 (Figura 15), observa-se que o talvegue se manteve inalterado, com deposição de sedimentos de cerca de 4 metros em uma extensão de aproximadamente 700 metros em direção a margem direita. A margem direita mantém-se inalterada.

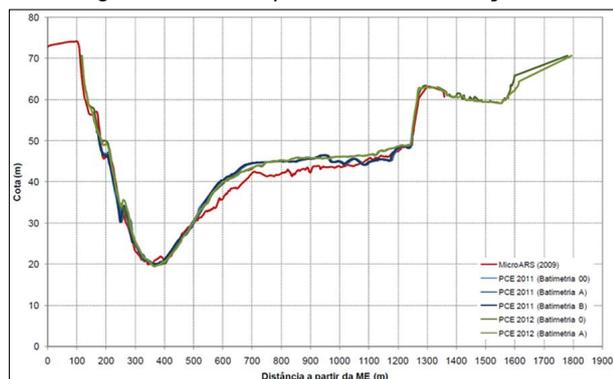
Para o perfil topobatimétrico da Seção 7 (Figura 16), observa-se que o talvegue se manteve pouco alterado. Na margem esquerda houve uma deposição de sedimentos da ordem de 4 metros em uma extensão de cerca de 200 metros.

No perfil topobatimétrico da Seção 8 (Figura 17), observa-se duas deposições na margem direita e uma regularização do fundo do rio com a deposição de sedimentos com espessuras de cerca de 3 metros.

No perfil topobatimétrico da Seção 9 (Figura 18), observa-se uma deposição no trecho do talvegue e uma regularização da seção analisada com deposição de sedimentos.

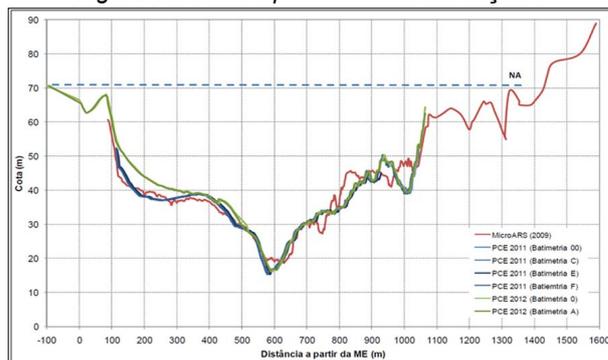
Analisando o perfil topobatimétrico da Seção 10 (Figura 19), observa-se que na margem esquerda houve pequenas alterações no perfil do fundo da seção. Na margem direita, trecho central até o talvegue desta margem, ocorreu elevada deposição de sedimentos com espessura de até 10 metros em uma extensão de 600 metros, aproximadamente.

Figura 15. Perfil topobatimétrico da Seção 6



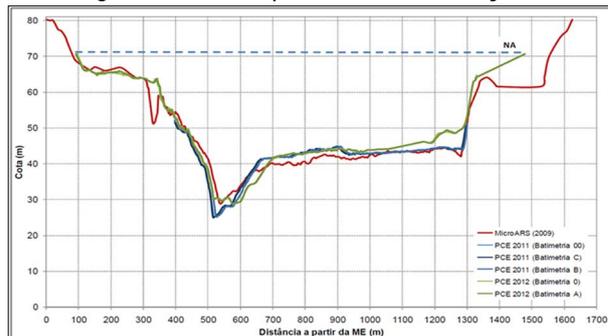
Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2012)

Figura 16. Perfil topobatimétrico da Seção 7



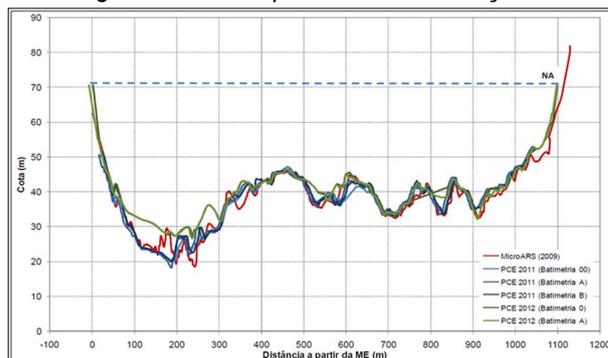
Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2012)

Figura 17. Perfil topobatimétrico da Seção 8



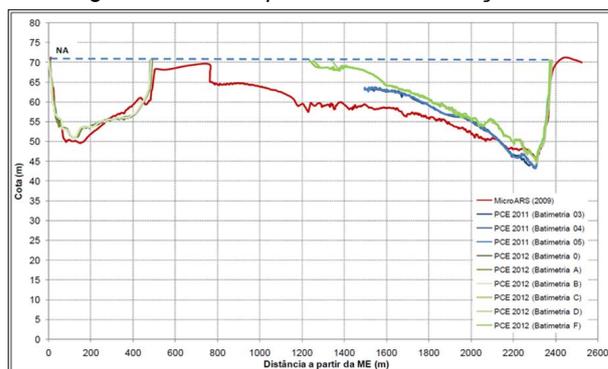
Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2012)

Figura 18. Perfil topobatimétrico da Seção 9



Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2012)

Figura 19. Perfil topobatimétrico da Seção 10



Fonte: Santo Antônio Energia; PCE (2012)

## Análise das imagens de satélite de antes e depois do reservatório

As datas das imagens de satélite e as cotas do Rio Madeira, podem ser observadas na tabela abaixo:

Tabela 6. *Datas das imagens de satélite e as cotas do Rio Madeira*

DATA IMAGEM SATÉLITE	Cota do Rio Madeira (cm)
16/07/2004	597,5
21/06/2006	888,0
09/09/2009	475,5
21/06/2011	-
09/08/2011	555,0
21/08/2011	407,5
28/09/2011	304,5
03/12/2011	538,5
11/03/2013	1.515,0
10/11/2013	1.131,0

Fonte: A autora

Optou-se em utilizar as imagens do dia 16/07/2004, período anterior ao enchimento do reservatório, e a imagem do dia 03/12/2014, período que boa parte do reservatório já estava cheio. Nestas duas datas escolhidas, as cotas do Rio Madeira estavam em níveis semelhantes, com uma diferença de apenas 59 cm entre elas.

Escolheu-se analisar 3 locais da margem direita do Rio Madeira, entre as seções topobatimétricas estudadas no item anterior. Destes trechos, observou-se pontos da margem direita da Seção 1 até a seção 4, todas situadas na frente da cidade de Porto Velho.

A Figura 20 mostra a imagem de satélite do trecho entre a Seção 1 e 2 no dia 16/07/2004. Nesta imagem, fixou-se 4 pontos na extremidade da margem direita do Rio Madeira. Com a mesma localização dos pontos fixados na Figura 20, gerou-se a imagem de satélite mostrada na Figura 21 da data de 03/12/2011.

Analisando estas duas imagens, percebe-se um recuo da margem do Rio Madeira nos pontos 2, 3 e 4:

Tabela 7. *Extensão do recuo dos pontos fixados na margem do rio entre as Seções 1 e 2*

Ponto fixado –Figura 21	Extensão do recuo da margem do rio (m)	Detalhe do recuo
1	-	Figura 22
2	17,62	Figura 22
3	8,62	Figura 23

4	11,18	Figura 24
---	-------	-----------

Fonte: A autora

A Figura 25 mostra a imagem de satélite do trecho entre a Seção 2 e 3 no dia 16/07/2004. Nesta imagem, fixou-se 5 pontos na extremidade da margem direita do Rio Madeira. Com a mesma localização dos pontos fixados na Figura 25, gerou-se a imagem de satélite mostrada na Figura 26 da data de 03/12/2011.

Analisando estas duas imagens, percebe-se um recuo da margem do Rio Madeira em todos os pontos de estudo.

Tabela 8. *Extensão do recuo dos pontos fixados na margem do rio entre as Seções 2 e 3*

Ponto fixado –Figura 26	Extensão do recuo da margem do rio (m)	Detalhe do recuo
1	10,75	Figura 27
2	13,07	Figura 28
3	17,78	Figura 29
4	13,21	Figura 30
5	9,36	Figura 31

Fonte: A autora

A Figura 32 mostra a imagem de satélite do trecho entre a Seção 3 e 4 no dia 16/07/2004. Nesta imagem, fixou-se 8 pontos na extremidade da margem direita do Rio Madeira. Com a mesma localização dos pontos fixados na Figura 32, gerou-se a imagem de satélite mostrada na Figura 33 da data de 03/12/2011.

Analisando estas duas imagens, percebe-se um recuo da margem do Rio Madeira em todos os pontos de estudo.

Tabela 9. *Extensão do recuo dos pontos fixados na margem do rio entre as Seções 3 e 4*

Ponto fixado –Figura 33	Extensão do recuo da margem do rio (m)	Detalhe do recuo
1	24,77	Figura 34
2	18,91	Figura 35
3	18,59	Figura 35
4	14,71	Figura 36
5	21,11	Figura 37
6	13,52	Figura 38
7	8,32	Figura 38
8	12,24	Figura 39

Fonte: A autora



**Figura 20. Trecho entra Seção 1 e 2. Data 16/07/2004.  
Cota: 596,5. Margem direita do Rio Madeira**



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

**Figura 21. Trecho entra Seção 1 e 2. Data 3/12/2011.  
Cota: 538,5. Margem direita do Rio Madeira**



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

**Figura 22. Detalhe 1 e 2 da Figura 21**



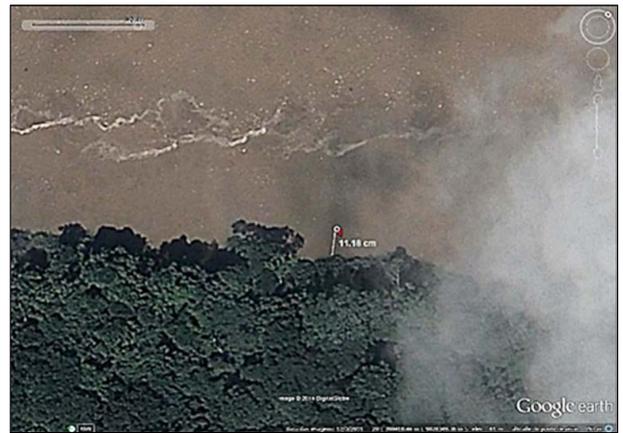
Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

**Figura 23. Detalhe 3 da Figura 21**



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

**Figura 24. Detalhe 4 da Figura 21**



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

**Figura 25. Trecho entra Seção 2 e 3. Data 16/07/2004.  
Cota: 596,5. Margem direita do Rio Madeira**



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

**Figura 26. Trecho entra Seção 2 e 3. Data 3/12/2011.  
Cota: 538,5. Margem direita do Rio Madeira**



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

**Figura 27. Detalhe 1 da Figura 26**



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

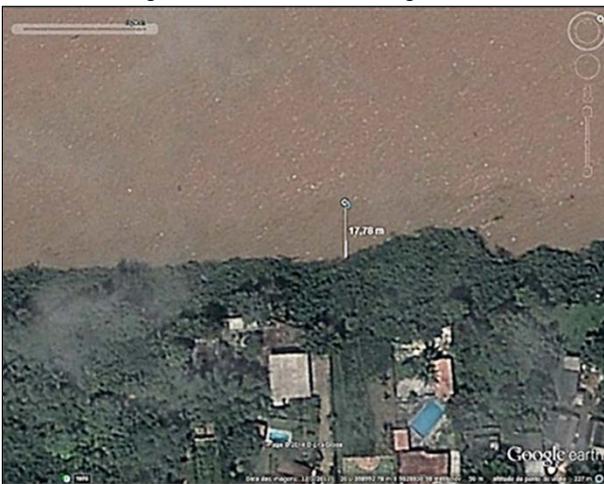


Figura 28. Detalhe 2 da Figura 26



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

Figura 29. Detalhe 3 da Figura 26



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

Figura 30. Detalhe 4 da Figura 26



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

Figura 31. Detalhe 5 da Figura 26



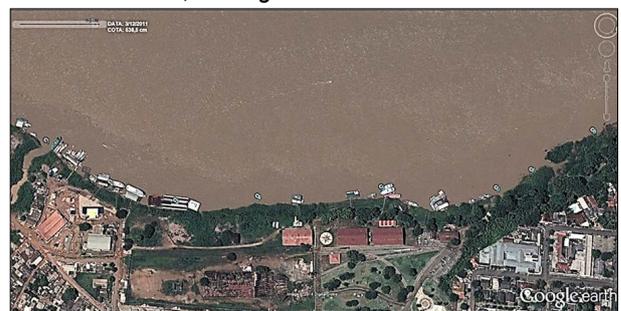
Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

Figura 32. Trecho entre Seção 3 e 4. Data 16/07/2004.  
Cota: 596,5. Margem direita do Rio Madeira



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

Figura 33. Trecho entre Seção 3 e 4. Data 3/12/2011.  
Cota: 538,5. Margem direita do Rio Madeira



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

Figura 34. Detalhe 1 da Figura 33



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora



Figura 35. Detalhe 2 e 3 da Figura 33



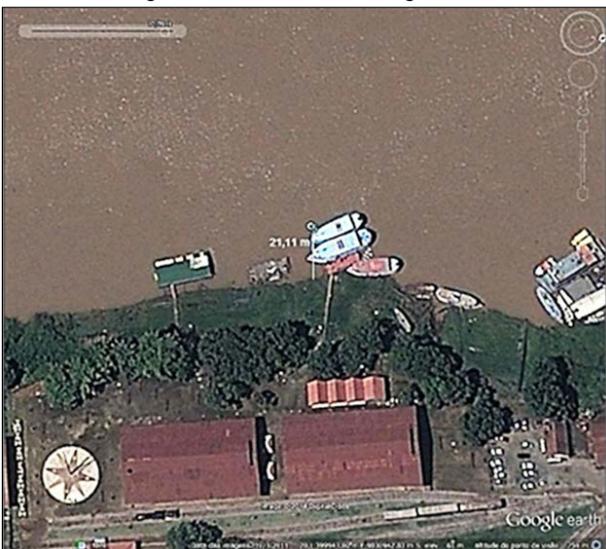
Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

Figura 36. Detalhe 4 da Figura 33



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

Figura 37. Detalhe 5 da Figura 33



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

Figura 38. Detalhe 6 e 7 da Figura 33



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

Figura 39. Detalhe 8 da Figura 33



Fonte: Google Earth (2014), adaptado pela autora

## Considerações finais

Antes do enchimento do reservatório da UHE Santo Antônio, os dados analisados mostraram que o Rio Madeira possuía um padrão de transporte de sedimentos homogêneo. Os valores de descargas sólidas totais a montante do da UHE Santo Antônio se mantinham próximos aos valores de sua jusante.

Com o enchimento do reservatório, concluído em janeiro de 2012, observou-se uma modificação do padrão de transporte de sedimentos do Rio Madeira. De valores de descarga sólida constantes, tanto a montante quanto a jusante do reservatório, constatou-se uma diminuição



de quantidade de sedimentos analisados na estação fluviométrica a jusante da UHE Santo Antônio.

O Estudo de Impacto Ambiental realizado por Furnas, Odebrecht e Leme, estimavam que o reservatório de Santo Antônio reteria cerca de 19% de sedimentos, entretanto com os dados analisados no tópico 4.1.1 deste trabalho, observou-se uma queda média de 45% dos valores coletados a jusante do reservatório em relação aos valores coletados em sua montante.

Quando se analisou as curvas-chave das estações fluviométricas a montante e jusante da UHE Santo Antônio, antes do enchimento do reservatório, observou-se que para uma dada vazão, a quantidade de sedimentos (descarga sólida total) transportados eram muito próximos nas duas estações, ou seja, para uma vazão, a quantidade de sedimentos transportados pelo Rio Madeira seriam praticamente os mesmos, tanto a montante quanto a jusante da UHE Santo Antônio.

Já, na análise das curvas-chave das estações fluviométricas a montante e jusante da UHE Santo Antônio, após o enchimento do reservatório, observou-se que para uma dada vazão, a quantidade de sedimentos (descarga sólida total) transportados foram bem diferentes nas duas estações. Para uma dada vazão, a quantidade de sedimentos transportados pelo Rio Madeira seria superior na estação a montante do que a da estação a jusante do reservatório, fato totalmente diferente do padrão antes apresentado pelo Rio Madeira.

A análise dos perfis topobatimétricos, a montante do reservatório, mostrou o mesmo padrão; trechos com aumento do leito do rio, podendo ser atribuído ao acúmulo de sedimentos, possivelmente provocado pelo reservatório da UHE Santo Antônio.

Para os perfis topobatimétricos, observou-se o padrão contrário, houve um afundamento do leito do rio em todas as seções de análise.

As imagens de satélite analisadas mostraram um recuo da margem direita do Rio Madeira, a jusante do reservatório, em que houve pontos que chegaram a mais de 24 metros de diferença.

A erosão dos barrancos ocorreu de forma extremamente rápida, provocada possivelmente, pelo desequilíbrio hidrosedimentológico. A retenção de sedimentos no reservatório provocou um escoamento de água mais limpa para a jusante da barragem. Esse escoamento límpido, associado com a sua maior energia, devido à liberação para a jusante de energia potencial acumulada pelo reservatório (“banzeiros”), aumentou o poder erosivo do escoamento, provocando o aprofundamento da calha do rio e erosão das margens.

Ocorreu de forma mais intensa erosões na margem esquerda, em especial na região de São Sebastião, em frente a cidade de Porto Velho, pelas mesmas razões descritas anteriormente.

A retenção de sedimentos grossos no reservatório de Santo Antônio possibilitou a incorporação dos sedimentos grossos e finos dos bancos de areia ao fluxo das águas a jusante.

Portanto, o processo de desbarrancamento do Rio Madeira, a jusante da UHE Santo Antônio é irreversível, entretanto, poderá ser minimizado, em especial em frente a cidade de Porto Velho, utilizando dispositivos de proteção de margens, como enrocamentos, gabiões e outros.

Torna-se necessário um acompanhamento com levantamentos topobatimétricos da calha do Rio Madeira, com seções mais próximas contemplando locais com potencial para desbarrancamentos, ou seja, pontos com aprofundamento do leito do rio junto as margens, com taludes mais íngremes para estabelecimento das áreas prioritárias a serem protegidas

### Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. HydroWeb – Séries Históricas. 2014. Disponí-



vel em: <http://hidroweb.ana.gov.br>. Acesso em: 20 out. 2014

ALAM, Sultan. **Estudos Hidráulicos e de Sedimentos – Relatório Preliminar**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, jan. 2007.

BANZEIRO – Usina abre comportas e força das águas do Rio Madeira derruba barrancos e pode arrastar residências. **Jornal Eletrônico** Rondoniaovivo.com, Porto Velho, 03 jan. 2012. Disponível em: <https://www.rondoniaovivo.com>. Acesso em: 13 dez. 2013

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Licença de Operação nº 1044/2011**. São Paulo, 2011.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Licença Prévia nº 251/2007**. Rio de Janeiro, 2007.

CARVALHO, Newton de Oliveira & WILSON JR, Geraldo. Variações morfológicas devidas ao escoamento a jusante de barragem. **III ENES, Terceiro Encontro de Engenharia de Sedimentos**, de 21 a 25.9.1998 – Comissão de Engenharia de Sedimentos da ABRH. Belo Horizonte, MG. 1998

CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrosedimentologia Prática**. 2ª edição; revista, atual e ampliada. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2008.

MICROSOFT. **Suporte**: Adicionar uma tendência média a um gráfico. 2014. Disponível em: <http://office.microsoft.com>. Acesso em: 24 jul. 2014.

MISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL; MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE RONDÔNIA. **Termo de Ajuste de Conduta com IBAMA, IPHAN, o Município de Porto Velho, Defesa Civil, Corpo de Bombeiros Militar e Santo Antônio Energia S.A.**. Porto Velho, 03 fev. 2012.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA; PCE. **Relatório Consolidação e Análise dos Dados Hidrossedimentológicos do Rio Madeira** – Janeiro de 2008 a Abril de 2013. 3ª

Etapa do Programa de Levantamento e Monitoramento Hidrossedimentológico do Rio Madeira e do Reservatório da UHE Santo Antônio. 2013.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA; PCE. **Relatório Levantamento topobatimétrico do Rio Madeira para Acompanhamento da Evolução do Leito** – R1/R4. 3ª Etapa do Programa de Levantamento e Monitoramento Hidrossedimentológico do Rio Madeira e do Reservatório da UHE Santo Antônio. 2012.

-----//-----

**Abstract:** The present work aims to analyze the hydrosedimentological processes of the Madeira River after the implantation of the Santo Antônio HPP reservoir dam and to study the erosive impacts that occur downstream of the enterprise, in the city of Porto Velho. Through hydrosedimentological data, profiletopobatic and satellite images, in the period before and after the filling of the reservoir dam, a comparative analysis was carried out between the data upstream and downstream of the Santo Antônio HPP. The results obtained in these analyzes allowed to verify the occurrence of major changes in the hydrosedimentological processes of the Madeira River after the filling of the reservoir and its connection with the landslides that occurred in front of the city of Porto Velho.

**Keywords:** Breakthroughs; Madeira River; Santo Antônio HPP; Hydrosedimentological processes.