

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

A EVOLUÇÃO DAS ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS NO RIO MADEIRA AO LONGO DO PERÍODO DE 2020 A 2024

Daniel Augustos Cordeiro Fernandes¹ ; Camila da Silva Souto²

Abstract: The Madeira River is the second largest tributary of the Amazon River. Although the annual flow of the Madeira River corresponds to approximately 13% of the Amazon River, the Madeira River contributes about 50% of its solid discharge to the Atlantic Ocean. This paper aims to show the evolution of the flow areas of 14 cross-sections of the Madeira River, by comparing bathymetries carried out periodically on the stretch of the river where the Jirau Hydropower Plant is located. This study analyzes the morphological evolution of these sections from 2020 to 2024, using surveys carried out before the reservoir was formed, between 2010 and 2011, as a comparative base. The methodology used considers the variation in cross-sectional flow area in relation to reference water levels, with statistical analysis based on the parameters of slope of the line (α), coefficient of determination (R^2) and average deviation (DM). The results indicate that, upstream of the reservoir, sections SJ09 and RJ07 do not show a definite trend, while RN36 shows stability. In the reservoir body, four sections remain without a trend, two indicate a siltation trend (S36 and SJ01) and one shows stability (RJ04). Downstream of the reservoir, section RN04 showed a siltation trend, while the others did not show consolidated trends, but showed slight siltation compared to the initial state. The study reinforces the importance of continuous monitoring of hydrosedimentological processes in influence of the Jirau HPP.

Resumo: O rio Madeira é o segundo maior afluente do Amazonas. A vazão anual do rio Madeira corresponde a aproximadamente 13% da vazão do rio Amazonas. No entanto, o Madeira contribui com cerca de 50% da sua descarga sólida para o Oceano Atlântico. O presente estudo objetiva exibir a evolução das áreas de escoamento de 14 seções transversais do rio Madeira, mediante a comparação de batimetrias realizadas periodicamente no trecho do rio onde está inserida a Usina Hidrelétrica de Jirau. Este estudo apresenta a análise da evolução morfológica dessas seções no período de 2020 a 2024, utilizando como base comparativa os levantamentos realizados anteriormente a formação do reservatório, entre 2010 e 2011. A metodologia empregada considera a variação das áreas de escoamento em relação a níveis d'água de referência, com análise estatística fundamentada nos parâmetros de inclinação da reta (α), coeficiente de determinação (R^2) e desvio médio (DM). Os resultados indicam que, a montante do reservatório, as seções SJ09 e RJ07 não apresentam uma tendência definida, enquanto a RN36 apresenta estabilidade. No corpo do reservatório, quatro seções permanecem sem tendência, duas indicam tendência a assoreamento (S36 e SJ01) e uma demonstra estabilidade (RJ04). A jusante do reservatório, a seção RN04 apresentou tendência a assoreamento, enquanto as demais não demonstraram tendências consolidadas, mas apresentam leve assoreamento em comparação ao estado inicial. O estudo reforça a relevância do monitoramento contínuo dos processos hidrossedimentológico na área de influência da UHE Jirau.

Palavras-Chave – Assoreamento; degradação; aproveitamento hidrelétrico

1) Jirau Energia, Rodovia BR-364, KM 824 S/Nº, Porto Velho (RO), daniel.fernandes@jirauenergia.com.br

2) Jirau Energia, Rodovia BR-364, KM 824 S/Nº, Porto Velho (RO), camila.souto@jirauenergia.com.br

1. INTRODUÇÃO

O rio Madeira é o segundo maior tributário do rio Amazonas, apresentando vazão média anual de aproximadamente $26.500\text{m}^3/\text{s}$ e área de drenagem de $1.368.400\text{km}^2$, sendo 8% desta área situada no Peru, 52% na Bolívia e 40% no Brasil (VAUCHEL *et al.*, 2017).

A denominação de rio Madeira acontece a partir da confluência do rio Beni (sub-bacia de 281.000km^2) com o rio Mamoré (637.000km^2 de área). A fisiografia da bacia é bastante diversificada, incluindo a cordilheira dos Andes, com altitudes superiores a 6.000m , e as planícies aluvionares da região Amazônica. O rio Madeira desagua no rio Amazonas a um nível d'água cerca de 20m acima do nível do mar (SOUTO *et al.*, 2016).

Apesar da vazão média anual do rio Madeira corresponder à aproximadamente 13% da vazão média anual do rio Amazonas (MOLINIER *et al.*, 1996), o rio Madeira contribui com cerca de 50% da descarga sólida que o rio Amazonas transporta em direção ao Oceano Atlântico (GUYOT *et al.*, 1996; LARAQUE *et al.*, 2005).

Destaca-se, ainda, a existência do Complexo Hidrelétrico do Rio Madeira, formado pelas usinas hidrelétricas Santo Antônio (UHE SAE) e Jirau (UHE Jirau). A usina hidrelétrica Jirau (UHE Jirau) está situada no rio Madeira, mais precisamente em seu trecho próximo às coordenadas de referência $09^{\circ}21'17''\text{S}$ e $64^{\circ}43'55''\text{O}$. Com uma capacidade instalada de 3.750MW , a usina é a quarta do Brasil com maior capacidade instalada.

A Jirau Energia, concessionária da UHE Jirau, realiza batimetrias anualmente em 14 seções transversais do rio Madeira para o atendimento ao Programa de Monitoramento Hidrossedimentológico (PMH), estabelecido no âmbito do Projeto Básico Ambiental do empreendimento. Dessa forma, vem sendo possível acompanhar a evolução da calha fluvial ao longo da operação do empreendimento, iniciada em 2013.

Este trabalho apresenta a análise dos resultados das batimetrias que caracterizam as modificações morfológicas observadas ao longo dos últimos cinco anos de operação da usina, além de uma comparação com o início do monitoramento.

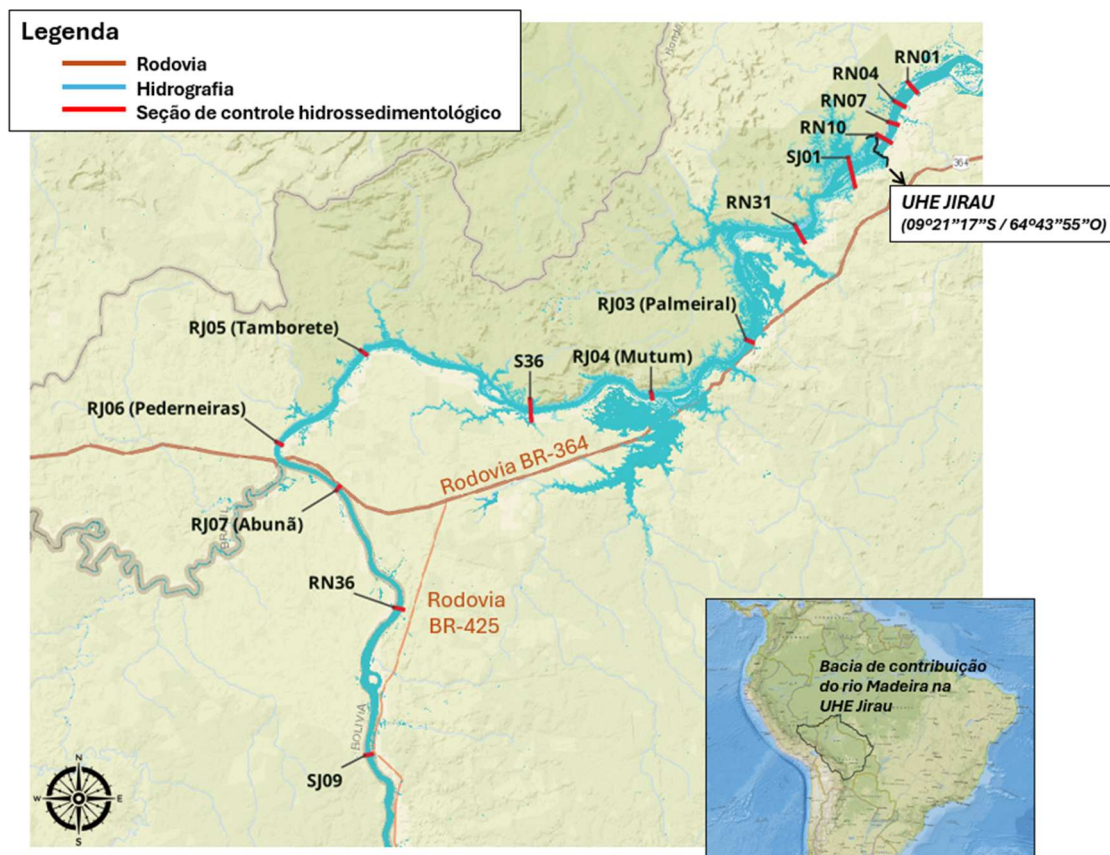
2. OBJETIVO

Apresentar um diagnóstico hidrossedimentológico das alterações morfológicas ocorridas ao longo dos últimos cinco anos no rio Madeira, com base na análise da evolução das áreas de escoamento em 14 seções transversais, a partir da comparação entre batimetrias realizadas antes e após a implantação da UHE Jirau.

3. MÉTODO

3.1. ÁREA DE ESTUDO

Os levantamentos batimétricos das 14 seções transversais são realizados semestralmente, um levantamento durante a cheia (fevereiro a abril) e outro durante a estiagem (agosto a outubro), as localizações das seções estão demonstradas no mapa da figura 1.



Como pode ser observado no mapa, tem-se 4 seções a jusante e 10 seções a montante do barramento da UHE Jirau, abrangendo um trecho de aproximadamente 195 km do rio Madeira. Destaca-se, ainda, a configuração em planta do reservatório de Jirau, que se encontra quase que totalmente encaixado na calha do rio Madeira a montante da seção RJ04 (Mutum).

3.2. ANÁLISE DE EVOLUÇÃO DAS SEÇÕES

As seções de controle hidrossedimentológico monitoradas pela Jirau Energia entre os anos de 2020 e 2024, durante o período de cheia (fevereiro a março), foram comparadas com os levantamentos executados para as mesmas seções antes da implantação da UHE Jirau, no período compreendido entre abril e junho de 2011, com exceção da seção SJ01, cujo levantamento foi realizado em novembro de 2010.

Para essa análise comparativa, foi definido um nível d'água de referência para cada seção, a qual foi considerada para cálculo de área de escoamento para todos os anos. As seções à montante do barramento têm nível de referência variando de 78m a 90m, enquanto as seções à jusante tem níveis de referência variando entre 65m e 70m.

A análise do estado de alteração morfológica das seções de controle hidrossedimentológico, consiste na avaliação da tendência de evolução das relações das áreas de escoamento de cada seção entre as fases pré e pós reservatório, para os últimos 5 anos.

Essa avaliação consiste em três etapas: determinação da relação entre as áreas de escoamento, comparação da seção com o levantamento inicial e a classificação da tendência de alteração morfológica nos últimos 5 anos.

Relação entre áreas de escoamento

O cálculo anual da relação entre as áreas de escoamento de cada seção considera a equação 1.

$$R = \frac{A_n}{A_{REF}} \quad (1)$$

Sendo:

- R [adimensional] - a relação entre as áreas de escoamento pós e pré reservatório;
- A_n [m²] - a área de escoamento levantada em um ano n sob determinados níveis d'água de referência; e
- A_{REF} [m²] - a área de escoamento levantada em 2011 para todas as seções, com exceção da seção SJ01 que corresponde à área de escoamento levantada em 2010.

De modo a permitir a comparação entre as áreas de escoamento, as margens das seções transversais do período pré-reservatório foram estendidas com base no perfilamento a laser de 2011.

As campanhas batimétricas são realizadas durante o período de cheia do rio Madeira, garantindo a maior cobertura possível das seções.

Classificação do estado atual das alterações morfológicas em relação ao estado pré-barragem

A classificação da seção, no que se refere ao estado atual de alteração morfológica, é determinada com base na relação R, conforme apresentado abaixo:

Critérios de Classificação Utilizados

- **Assoreada:** Relação $R < 1$ (redução da área de escoamento).
- **Erodida:** Relação $R > 1$ (aumento da área de escoamento).
- **Estável:** Relação $R \approx 1$ (variação desprezível, geralmente inferior a $\pm 5\%$).

Níveis de alteração:

- **Leve:** Variação $< 15\%$ em relação à área inicial.
- **Moderada:** Variação entre 15% e 35% .
- **Expressiva:** Variação $> 35\%$.

Classificação da tendência das alterações morfológicas nos últimos 5 anos

A classificação da seção, no que se refere à atual tendência de alteração morfológica, é determinada com base nos parâmetros da reta ajustada para as relações R dos últimos cinco anos e no desvio médio entre a relação R observada e calculada pela reta ajustada. Nesse estudo, consideram-se os seguintes aspectos:

- α [adimensional] - coeficiente de inclinação da reta;
- R^2 [adimensional] - coeficiente de determinação da reta;

- DM [%] - desvio médio entre a relação R observada e calculada pela reta ajustada.

Dessa forma, a classificação pode assumir classes de tendência das alterações morfológicas do Rio Madeira conforme critérios indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da tendência das alterações morfológicas ao longo dos últimos 5 anos

Classificação	Critérios de Classificação		
	α	R^2	DM
Tendência a erosão	> 0	$> 0,75$	$\leq 3\%$
Tendência a assoreamento	> 0	$> 0,75$	$\leq 3\%$
Estabilidade	Não se aplica	$< 0,75$	$> 3\%$
Sem tendência definida	Não se aplica	$< 0,75$	$> 3\%$

A classificação para cada seção é realizada conforme etapas detalhadas no fluxograma da Figura 2.

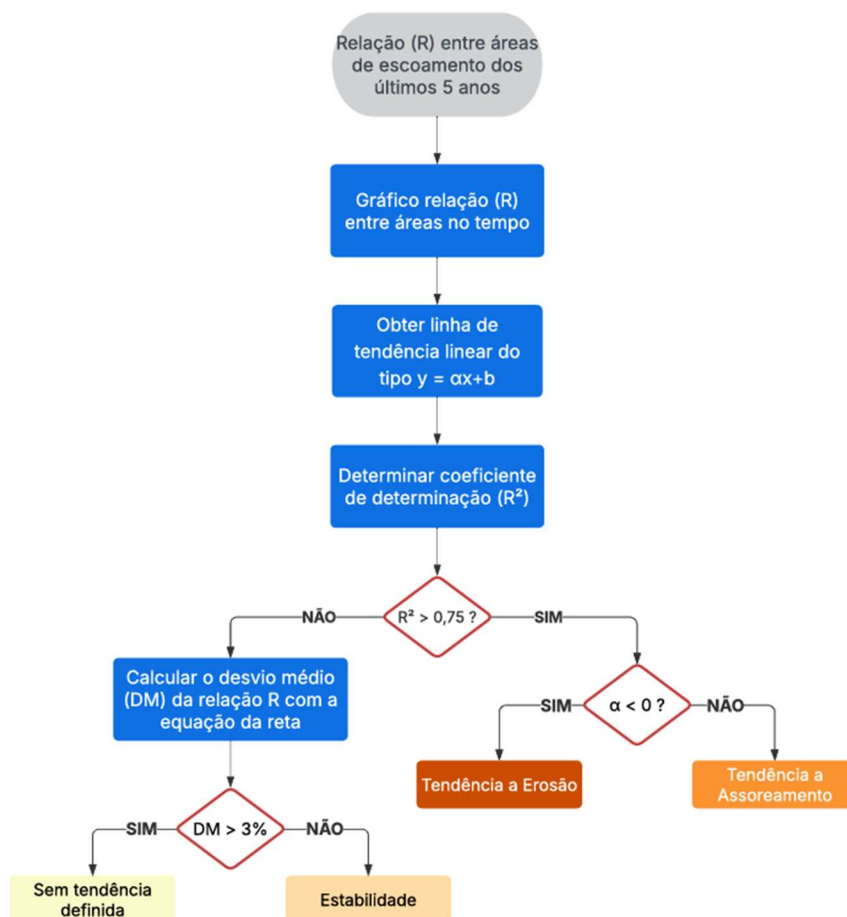


Figura 2 – Fluxograma para classificação

4. RESULTADOS

A Figura 3 apresenta o resultado da relação R entre as áreas de escoamento medidas no período de 2020 a 2024 pela área levantada em 2011 (e 2010, para a seção SJ01), para cada uma das 14 seções de controle.

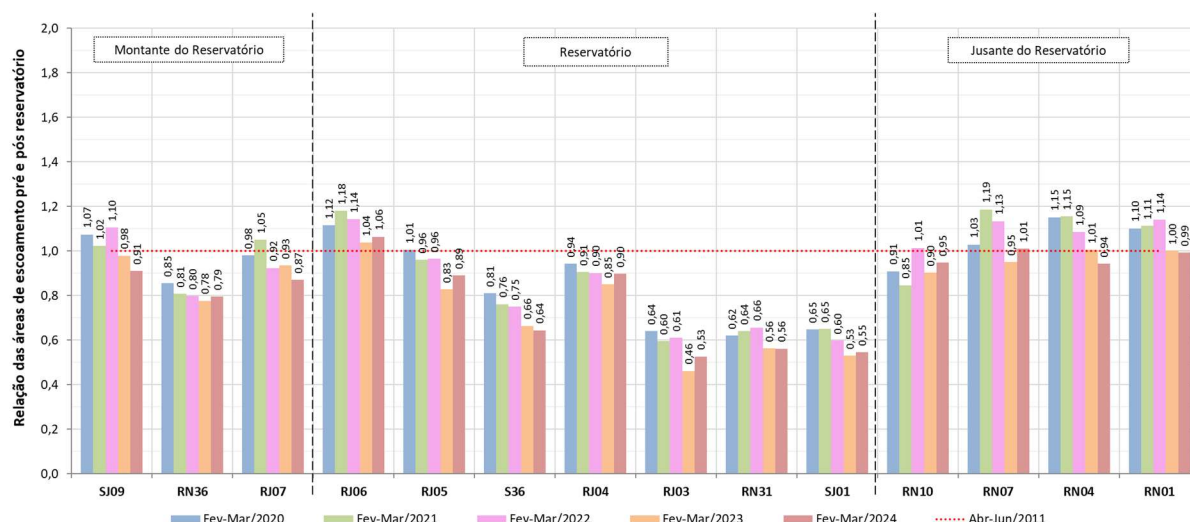


Figura 3 – Comparação entre as áreas de escoamento pré e pós reservatório (fonte: JIRAU ENERGIA, 2025)

Em casos nos quais o valor da relação R é inferior a 1, é indicativo de que a seção sofreu um processo de assoreamento em relação ao início do monitoramento (pré-barragem). Em contrapartida, valores superiores a 1 indicam um processo de erosão.

Com base nos dados do levantamento batimétrico de 2024 e na comparação com as áreas de escoamento obtidas no período pré-barragem (2010/2011), a Tabela 2, a seguir, apresenta o estado atual de cada uma das 14 seções de controle monitoradas pela UHE Jirau quanto ao tipo e intensidade de alteração morfológica.

Tabela 2 – Estado atual (2024) das alterações morfológicas em cada uma das 14 de seções de controle em relação a situação pré-barragem

Seção	Localização	R (2024/Pré)		Classificação	Nível da alteração
SJ09	Montante do reservatório	0,91	$R < 1$	Assoreada	Leve
RN36	Montante do reservatório	0,79	$R < 1$	Assoreada	Moderada
RJ07	Montante do reservatório	0,87	$R < 1$	Assoreada	Leve
RJ06	Reservatório - terço superior	1,06	$R > 1$	Erodida	Leve
RJ05	Reservatório - terço superior	0,89	$R < 1$	Assoreada	Leve
S36	Reservatório - terço médio	0,65	$R < 1$	Assoreada	Moderada
RJ04	Reservatório - terço médio	0,90	$R < 1$	Assoreada	Leve
RJ03	Reservatório - terço inferior	0,53	$R < 1$	Assoreada	Expressiva
RN31	Reservatório - terço inferior	0,56	$R < 1$	Assoreada	Expressiva
SJ01	Reservatório - terço inferior	0,55	$R < 1$	Assoreada	Expressiva
RN10	Jusante do reservatório	0,95	$R < 1$	Assoreada	Leve
RN07	Jusante do reservatório	1,01	$R \approx 1$	Estável	-
RN04	Jusante do reservatório	0,94	$R < 1$	Assoreada	Leve
RN01	Jusante do reservatório	0,99	$R \approx 1$	Estável	-

O panorama atual (2024) da situação do trecho estudado a montante do barramento da UHE Jirau é apresentado no mapa da Figura 4, no qual são indicados os trechos em que foram identificados processos de assoreamento e degradação em relação ao ano de 2011.

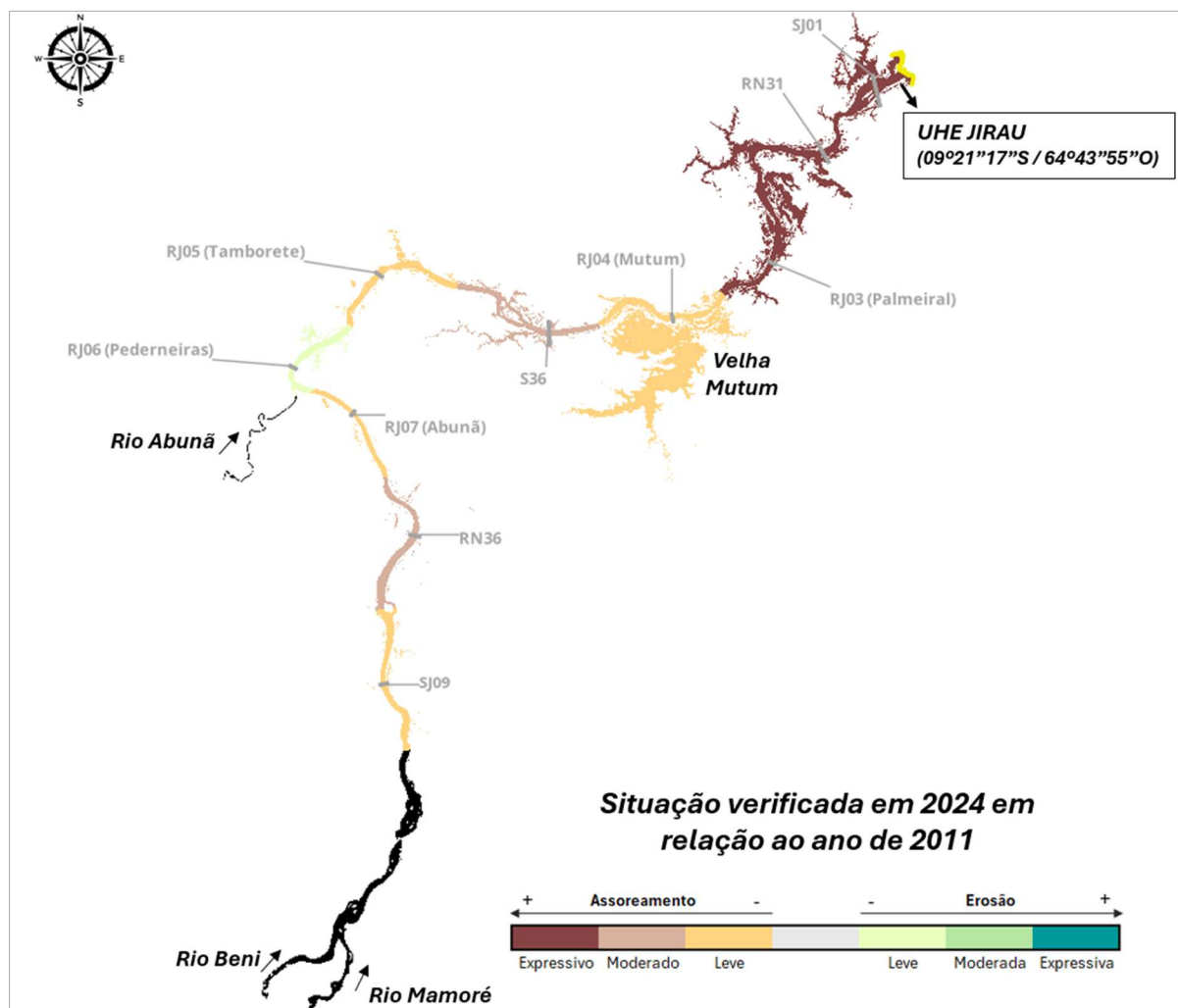
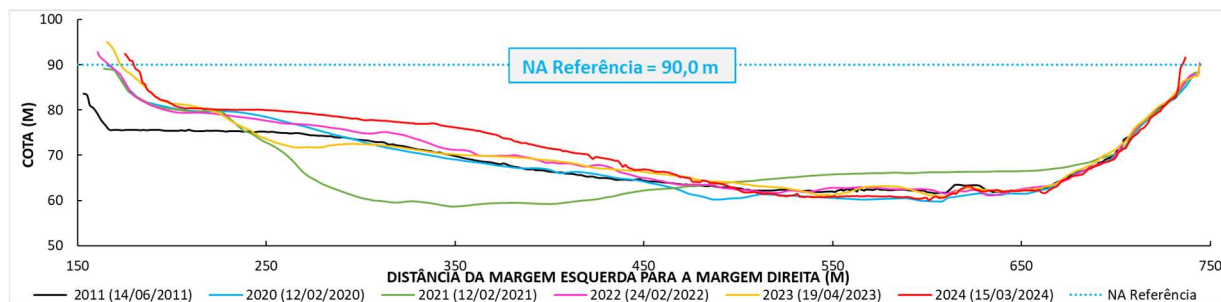


Figura 4 – Diagnóstico sedimentológico básico de trecho do rio Madeira a montante da UHE Jirau

Os resultados dos levantamentos batimétricos realizados entre os anos de 2020 a 2024 juntamente com a seção comparativa para o cálculo da relação (R) das áreas de escoamento das seções RJ-07 (Abunã), RJ-04 (Mutum), SJ01 (1ª seção a montante da barragem) e RN07 (a jusante da barragem) são apresentados nas figuras 5 a 8.



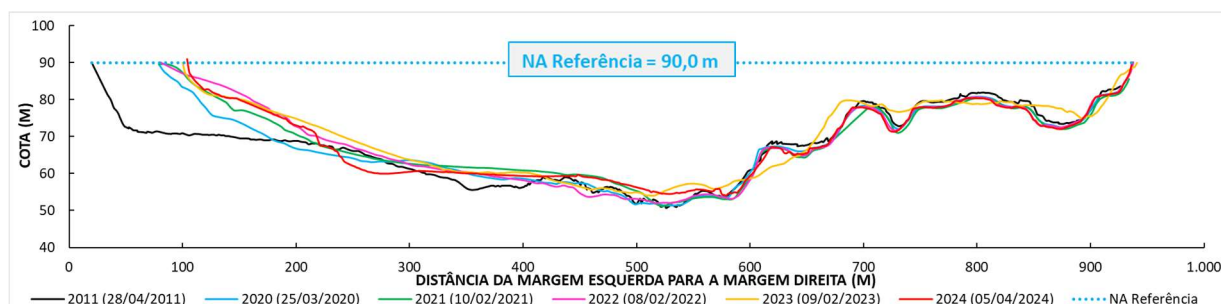


Figura 6 – Seção RJ04

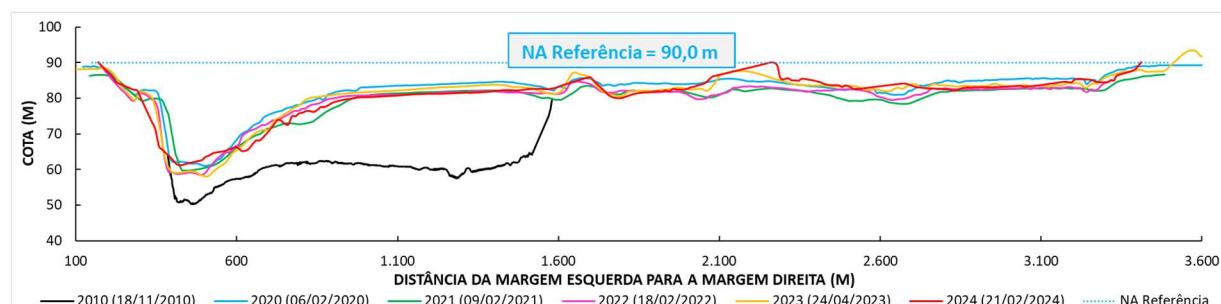


Figura 7 – Seção SJ01

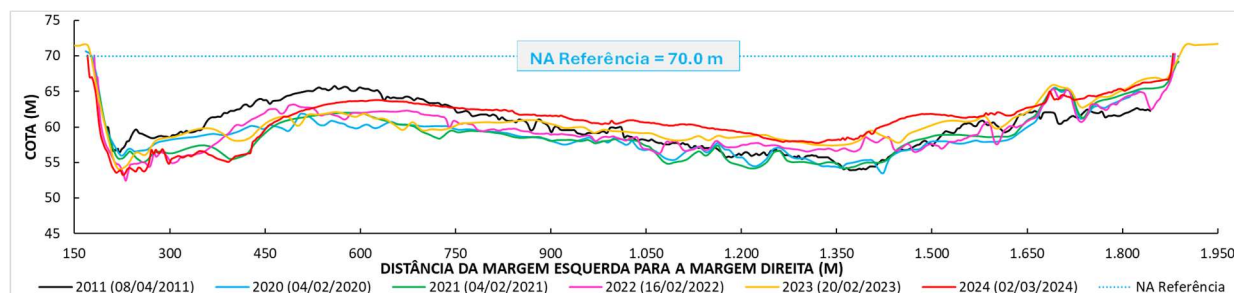


Figura 8 – Seção RN04

Na Tabela 3 são apresentadas as classificações da tendência das alterações morfológicas do Rio Madeira dos últimos 5 anos que compreendem o período de 2020 a 2025.

Tabela 3 – Classificação da tendência atual (2020 a 2024) das alterações morfológicas do rio Madeira com base no monitoramento dos últimos 5 anos das seções de controle sedimentológico

Seções de Controle	Localização	α	R^2	Desvio médio (%)	Classificação
SJ09	Montante do reservatório	-0,0369	0,575	3,42%	Sem tendência definida
RN36		-0,0152	0,669	1,82%	Estável
RJ07		-0,0332	0,614	3,34%	Sem tendência definida
RJ06	Reservatório	-0,0244	0,451	3,11%	Sem tendência definida
RJ05		-0,0364	0,667	3,17%	Sem tendência definida
S36	Reservatório	-0,0429	0,948	1,58%	Tendência a assoreamento
RJ04	terço médio	-0,0145	0,499	1,89%	Estável
RJ03	Reservatório	-0,0363	0,631	5,54%	Sem tendência definida

RN31	terço inferior	-0,0196	0,494	3,96%	Sem tendência definida
SJ01		-0,0320	0,858	2,74%	Tendência a assoreamento
RN10	Jusante do reservatório	0,0135	0,119	4,42%	Sem tendência definida
RN07		-0,0276	0,206	6,39%	Sem tendência definida
RN04		-0,0565	0,933	1,74%	Tendência a assoreamento
RN01		-0,0328	0,584	3,02%	Sem tendência definida

5. CONCLUSÕES

O rio Madeira apresenta considerável fluxo de sedimentos o que aumenta a importância do contínuo monitoramento de processos de assoreamento e erosão, principalmente na área de influência direta das usinas do complexo do Madeira.

A análise comparativa entre os levantamentos batimétricos de 2024 e a condição pré-barragem (2010/2011) evidencia a predominância de assoreamento nas seções de controle hidrossedimentológico da UHE Jirau em relação à condição inicial. Das 14 seções analisadas, 12 apresentaram redução de área de escoamento ($R < 1$), sendo classificadas como assoreadas. Dentre estas, destacam-se três seções com **nível de assoreamento expressivo** (RJ03, RN31 e SJ01), todas localizadas **no terço inferior do reservatório**, refletindo acúmulo mais intenso de sedimentos **na proximidade da barragem**.

As seções do **terço médio e superior do reservatório** (RJ04, S36, RJ05) apresentaram assoreamento de menor intensidade, com níveis classificados como **moderado a leve**, sugerindo **atenuação progressiva do processo em direção à montante**. A única seção classificada como **erodida** foi a RJ06, no terço superior do reservatório, com leve aumento da área de escoamento.

No trecho a montante do reservatório houve assoreamento leve a moderado, enquanto a jusante observou-se uma condição de maior estabilidade, com duas seções sem alterações significativas, quando comparadas à condição inicial.

Adicionalmente, ao se avaliar a tendência morfológica dos últimos cinco anos (2020 a 2024), observou-se que **9 (nove)** das 14 seções (SJ09, RJ07, RJ06, RJ05, RJ03, RN31, RN10, RN07 e RN01) apresentaram comportamento oscilante entre processos de assoreamento e erosão, caracterizando um quadro **sem tendência definida**. Isso é particularmente relevante em trechos com maior influência da variabilidade hidrológica interanual ou dinâmicas locais específicas. Outras **2 (duas)** seções, RN36 e RJ04, apresentaram **estabilidade**, ou seja, não sofreram alterações significativas em suas áreas de escoamento nesse período.

Apenas **3 (três)** das 14 seções de controle apresentaram uma **tendência bem definida de assoreamento ao longo dos últimos 5 anos**, sendo **duas no reservatório**, SJ01 e S36, e **uma a jusante da barragem**, RN04.

Esses resultados confirmam o cenário esperado de deposição de sedimentos no corpo do reservatório, especialmente nas áreas mais próximas ao barramento, e reforçam a importância da continuidade do monitoramento hidrossedimentológico para compreensão da evolução da calha e gestão sustentável da operação da UHE Jirau.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Jirau Energia, concessionária da UHE Jirau, pela disponibilidade de dados dos levantamentos batimétricos e pelo incentivo à produção científica.

Agradecem também às empresas parceiras responsáveis pela execução dos levantamentos de campo e pelo processamento e consolidação das bases de dados hidrossedimentológicas referentes ao período analisado.

BIBLIOGRAFIA

JIRAU ENERGIA. (2024). *5º Relatório Anual do Programa de Monitoramento Hidrossedimentológico – Licença de Operação – 1ª Renovação*. Porto Velho, RO.

GARRIDO NETO, P. S.; SOUTO, C. S.; TRINDADE, P. A. A evolução de seções de controle hidrossedimentológico no rio Madeira no período de 2014 a 2017. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS – ENES, 13., 2017, Porto Velho. Anais [...]. Porto Alegre: ABRH, 2017.

GUYOT, J.L.; FILIZOLA, N.P.; QUINTANILLA, J.; CORTEZ, J. (1996). “*Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon*”. Erosion and Sediment yield: Global and Regional Perspectives (Walling D.E., Webb B.W., Eds.). IAHS Publ. 236, p. 55-63.

LARAQUE, A.; FILIZOLA, N.P.; GUYOT, J.L. (2005). “*Variations spatio-temporelles du bilan sédimentaire dans le bassin amazonien brésilien, à partir d’un échantillonnage décadaire*”. Sediment Budgets (Walling D.E., Horowitz A.J., Eds.). IAHS Publ. 291, p. 250-258.

MOLINIER, M.; GUYOT, J.L.; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, V. (1996). “*Les régimes hydrologiques de l’Amazonie et de ses affluents*”. IAHS Publ. 238, p. 209–222.

SOUTO, C. S.; XAVIER, M.C.R.; BARBOZA, A.P.; BARROS, M.C. (2016). “*Balanços sedimentológicos na bacia do rio Madeira*” in Anais do XII ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Porto Velho/RO, Nov 2016.

VAUCHEL, P.; SANTINI, W.; GUYOT, J.L.; MOQUET, J.S.; MARTINEZ, J.M.; ESPINOZA, J.C.; BABY, P.; FUERTES, O.; NORIEGA, L.; PUITA, O.; SONDAG, F.; FRAIZY, P.; ARMIJOS, E.; COCHONNEAU, G.; TIMOUK, F.; DE OLIVEIRA, E.; FILIZOLA, N.; MOLINA, J.; RONCHAIL, J. (2017). “*A reassessment of the suspended sediment load in the Madeira River Basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, based on 10 years of data from the HYBAM monitoring programme*”. Journal of Hydrology, v.553, p. 35-48.