

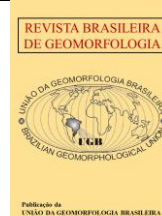


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 27, nº 1 (2026)

<https://dx.doi.org/10.20502/rbg.v27i1.2683>



Artigo de Pesquisa

Dinâmica hidrossedimentar na confluência dos rios Beni e Mamoré

Hydrosedimentary Dynamics in the Confluence of the Beni and Mamoré Rivers

Ednaldo Bras Severo ¹, Rogério Ribeiro Marinho ², Jean-Michel Martinez ³, Naziano Pantoja Filizola ⁴, Henrique Llacer Roig ⁵, Keila Aniceto ⁶, William Santini ⁷, Diogo Olivetti ⁸, André Zumak ⁹, Osmair Santos ¹⁰, Matheus Silveira de Queiroz ¹¹, Camila Souto ¹², Daniel Fernandes ¹³

¹ Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-graduação em Geografia, Manaus, Brasil. edsevero.geo@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9148-5570>

² Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-graduação em Geografia, Manaus, Brasil. rogeog@ufam.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5219-8635>

³ Institut de Recherche pour le Développement (IRD) / Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) / Université Toulouse 3, Géosciences Environnement Toulouse (GET), Toulouse, France. jean-michel.martinez@ird.fr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3281-8512>

⁴ Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-graduação em Geociências, Manaus, Brasil.
nazianofilizola@ufam.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7285-7220>

⁵ Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Brasília, Brasil.
roig@unb.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9180-3081>

⁶ Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-graduação em Geociências, Manaus, Brasil.
keilaniceto@ufam.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8258-1328>

⁷ Institut de Recherche pour le Développement (IRD) / Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) / Université Toulouse 3, Géosciences Environnement Toulouse (GET), Toulouse, France. william.santini@ird.fr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0098-9755>

⁸ Universidade Federal de Alenas, Instituto de Ciências da Natureza, Alenas, Brasil. diogo.olivetti@unifal-mg.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2491-6000>

⁹ Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá, Tefé, Brasil. andre_zumak@yahoo.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4000-4527>

¹⁰ Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Brasília, Brasil.
osmairsf@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7424-8585>

¹¹ Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-graduação em Geografia, Manaus, Brasil.
matheussilveiradequeiroz@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8722-7715>

¹² Jirau Energia, Porto Velho, Brasil. camila.souto@jirauenergia.com.br.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4424-5646>

¹³ Jirau Energia, Porto Velho, Brasil. daniel.fernandes@jirauenergia.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7565-2180>

Recebido: 24/02/2025; Aceito: 18/02/2026; Publicado: 28/03/2026

Resumo: Este estudo analisou a dinâmica hidrossedimentar na confluência dos rios Beni e Mamoré, principais formadores do rio Madeira, que por sua vez é o maior afluente do rio Amazonas. Nesta região, foram realizadas 13 campanhas entre março de 2021 e abril de 2022 em quatro seções, complementadas por dados históricos do Observatório HYBAM. Os resultados revelaram diferenças significativas entre os rios formadores: concentrações médias de material em suspensão (MES) de 639 mg.L⁻¹, no Beni, e de 218 mg.L⁻¹, no Mamoré, com produção específica de 2,07 e 0,34 ton.km⁻².ano⁻¹, respectivamente. O rio Madeira apresentou concentrações intermediárias (357-371 mg.L⁻¹). Durante águas altas, a estratificação do MES em profundidade foi mais pronunciada nos rios Mamoré e no Madeira. O balanço sedimentar realizado evidenciou déficit de 15% a jusante da confluência. Este percentual representa uma retenção de 40 milhões de toneladas ao longo de 220 km. A jusante desta mesma confluência encontra-se o reservatório da Usina Hidrelétrica de Jirau, cuja barragem gera influência no trecho em questão. Os rios Beni e Mamoré, juntos, contribuem com 291 milhões de toneladas anuais para o rio Madeira, confirmando seu papel estratégico no balanço sedimentar amazônico e fornecendo base para gestão sustentável dos recursos desta bacia hidrográfica.

Palavras-chave: Bacia Amazônica; Concentração do Sedimento Suspenso; Rio Madeira, Hidrelétrica.

Abstract: This study analyzed hydrosedimentary dynamics at the confluence of the Beni and Mamoré rivers, the two main source rivers of the Madeira River, the largest tributary of the Amazon River. Thirteen field campaigns were conducted between March 2021 and April 2022 at four cross-sections, complemented by historical data from the HYBAM Observatory. The results showed clear contrasts between the tributary rivers: mean suspended sediment concentrations (SSC) were 639 mg.L⁻¹ in the Beni and 218 mg.L⁻¹ in the Mamoré, with specific yields of 2.07 and 0.34 ton.km⁻².yr⁻¹, respectively. The Madeira River exhibited intermediate SSC values (357–371 mg.L⁻¹). During high-water conditions, vertical SSC stratification was more pronounced in the Mamoré and Madeira rivers. The sediment budget indicated a 15% deficit downstream of the confluence, corresponding to the retention of approximately 40 million tons over a 220 km reach. Downstream of this confluence lies the Jirau Hydroelectric Power Plant reservoir, whose dam may influence the study reach. Together, the Beni and Mamoré rivers contribute about 291 million tons of suspended sediment annually to the Madeira River, confirming their strategic role in the Amazon sediment budget and providing a basis for sustainable management of this watershed's resources.

Keywords: Amazon Basin; Suspended Sediment Concentration; Madeira River; Hydroelectric Dam

1. Introdução

A bacia amazônica abriga quatro dos dez maiores rios do mundo em termos de vazão: Amazonas, Negro, Madeira e Japurá (Latrubesse; Stevaux; Sinha, 2005). O rio Madeira destaca-se como segundo maior contribuinte em volume de água e principal fornecedor de sedimentos (aproximadamente 50%) para o rio Amazonas (Rivera et al., 2019, 2021; Vauchel et al., 2017). Além de sua relevância hidrológica, constitui importante hidrovia nacional, integrando comercialmente as regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil (DNIT, 2024).

Os rios Beni e Mamoré, principais formadores do rio Madeira (Lopes; Magalhães, 2018; Severo et al., 2024), originam-se na região andina e possuem descarga líquida média anual de 9.083 m³.s⁻¹ e 7.114 m³.s⁻¹, respectivamente. Juntos transportam cerca de 430×10⁶ ton.ano⁻¹ de material em suspensão, condicionando diretamente a dinâmica hidrossedimentar do rio Madeira (Vauchel et al., 2017).

Nas últimas décadas, as bacias dos rios Beni e Mamoré têm apresentado intensas transformações antrópicas (Souza et al., 2022). O desmatamento, expansão agropecuária e urbanização resultaram na perda de 2,44% da cobertura natural na bacia do Beni e 12,62% na bacia do Mamoré entre 1990 e 2020, enquanto áreas agrícolas e de infraestrutura aumentaram 193,64% e 250,36%, respectivamente (Severo; Marinho, 2023). Concomitantemente, a região apresenta variabilidade climática crescente, com alterações nos padrões de precipitação e intensificação de eventos climáticos extremos (Espinoza et al., 2019).

Essas modificações antrópicas e a variabilidade climática recente têm alterado o regime hidrológico dos canais fluviais e podem intensificar processos erosivos e deposicionais em diferentes sistemas fluviais (Li et al., 2024; Queiroz et al., 2025). No caso do alto Madeira, Rivera et al. (2019, 2021) identificaram redução no transporte sedimentar em estações da parte alta da bacia do Madeira, incluindo Cachuela Esperanza (rio Beni), Guayaramerín (rio Mamoré) e Porto Velho (rio Madeira), esta última influenciada pelas Usinas Hidroelétricas do Complexo Madeira. No mesmo trecho, Latrubesse et al. (2017) identificaram redução de ~20% na concentração média anual de sedimentos em suspensão na superfície a jusante da UHE Santo Antônio, na região de Porto Velho.

Embora estudos tenham identificado tendências de redução no transporte sedimentar em estações isoladas da bacia do Madeira, permanece pouco esclarecido como essas mudanças se manifestam especificamente na dinâmica hidrossedimentar da região de confluência Beni-Mamoré. Em particular, não se conhece adequadamente a magnitude dos impactos integrados das transformações no uso do solo e da variabilidade climática sobre o transporte de sedimentos em suspensão e descarga líquida nesta confluência estratégica (Severo; Marinho, 2023). Esta lacuna limita a compreensão dos processos hidrossedimentológicos essenciais para a gestão da hidrovia do rio Madeira e para a avaliação de impactos de infraestruturas hidráulicas em grandes rios tropicais.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a dinâmica hidrossedimentar na confluência dos rios Beni e Mamoré, avaliando os regimes de concentração de material em suspensão (MES), descarga líquida (Q) e descarga sólida (Qs), com base em dados de campo e séries históricas de estações hidrométricas. Busca-se apresentar dados hidrossedimentares inéditos e propor um balanço hidrossedimentométrico regional.

Com base no contexto apresentado, formulam-se as seguintes hipóteses: (i) existem diferenças significativas nos regimes de transporte de sedimentos e água entre as seções da confluência Beni-Mamoré e o rio Madeira a jusante, relacionadas às características geomorfológicas e hidrodinâmicas específicas de cada trecho; (ii) a presença de estruturas hidráulicas a jusante (e.g. UHE Jirau) altera o balanço sedimentar a jusante da confluência, promovendo retenção de material particulado; (iii) os padrões de concentração de material em suspensão apresentam variabilidade sazonal e vertical distintas entre os rios Beni, Mamoré e Madeira, refletindo suas diferentes origens geológicas e condições de transporte.

2. Área de Estudo

A área de estudo localiza-se na confluência dos rios Beni e Mamoré e no trecho subsequente de 220 km do rio Madeira, no estado de Rondônia, fronteira Brasil-Bolívia (Figura 1). A bacia do Beni abrange 282.000 km² em territórios boliviano (61%) e peruano (39%), enquanto a bacia do Mamoré possui 636.000 km² distribuídos entre Bolívia (81%) e Brasil (19%) (Severo et al., 2024).

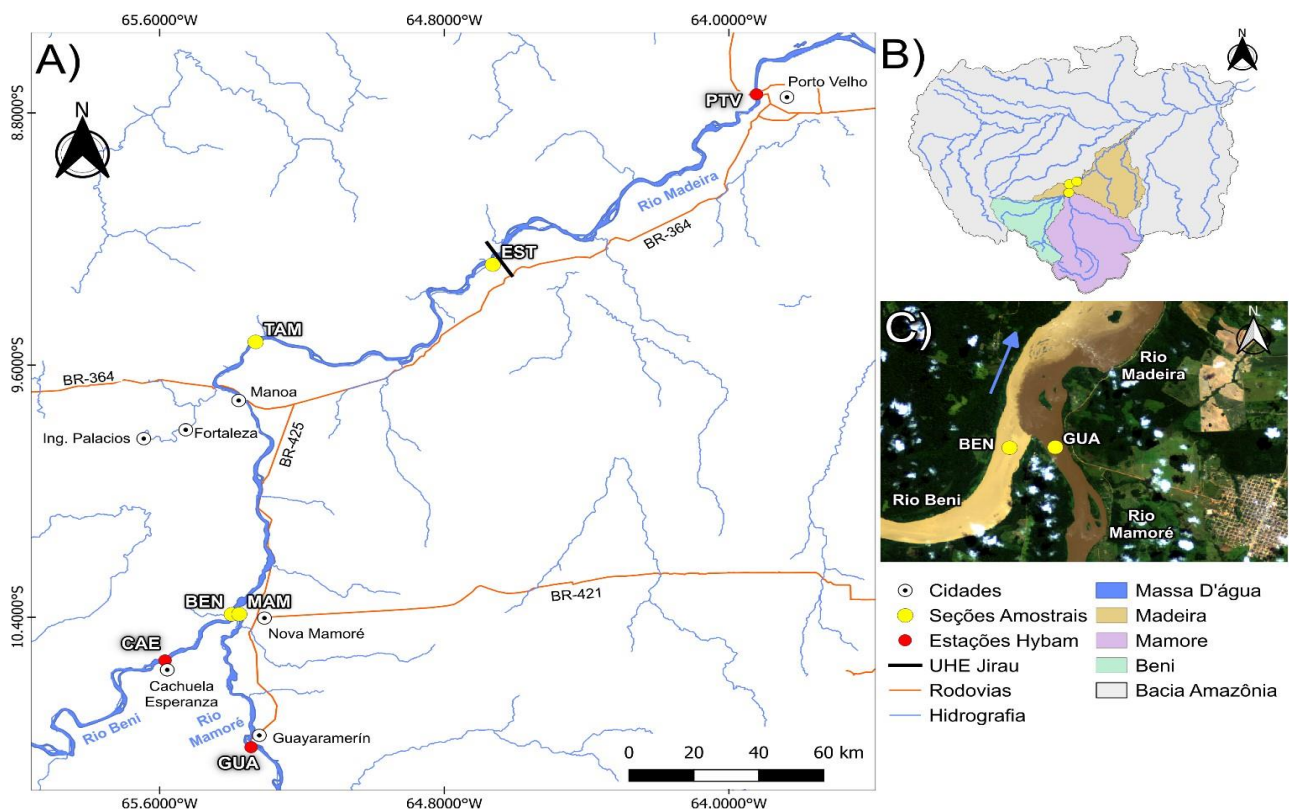


Figura 1. Área de estudo na confluência Beni-Mamoré e Rio Madeira. A) Pontos de monitoramento: BEN (rio Beni), CAE (Cachuela Esperanza), EST (Estação), GUA (Guayaramerín), MAM (rio Mamoré), PTV (Porto Velho) e TAM (Tamborete). B) Localização das sub-bacias na bacia Amazônica. C) Imagem de satélite da confluência (02/06/2021) com estações BEN e GUA.

As bacias apresentam substrato geológico caracterizado por rochas metassedimentares paleozoicas e plutônicas mesozoicas, sobrepostas ao embasamento metamórfico proterozoico associado à Cordilheira dos Andes. Nesse arcabouço, a orogênese andina teve início no Cretáceo ($\approx 145\text{--}66$ Ma) e esteve associada à formação de uma bacia de foreland entre o Escudo Brasileiro, mais intensamente intemperizados, e o cinturão orogênico andino. Essa bacia começou a se desenvolver por volta de 100 Ma, na transição entre o Cretáceo Inferior e Superior, e permanece ativa até o presente, atuando como uma importante área de deposição dos sedimentos provenientes dos Andes para a bacia do rio Madeira. Estimativas indicam que, no sul do Piemonte Andino e na bacia de foreland, a taxa média de deposição atinge cerca de 210 Mt ano^{-1} (Vauchel et al., 2017). A porção oriental das bacias é recoberta por extensa cobertura quaternária composta por sedimentos siliciclásticos (Alcárcel-Gutiérrez et al., 2023).

O trecho estudado situa-se nas bordas da bacia de deposição Amazônica, em contato direto com o Escudo Brasileiro, onde o rio Madeira torna-se encaixado. Esta posição geográfica estratégica, entre a zona de transição tectônica periandina e a planície Amazônica, condiciona as características hidrossedimentares regionais. A área integra o domínio geomorfológico das Planícies e Pantanais do Médio e Alto Guaporé, caracterizado por planícies de inundação, canais meandranes e sistemas deposicionais aluviais (Souza Filho et al., 1999).

A região apresenta grande diversidade climática, abrangendo desde áreas semiáridas nos Andes até trechos de floresta densa sobre rochas paleozoicas (Guyot; Jouanneau; Wasson, 1999). O clima regional apresenta regime sazonal bem definido, com precipitação média anual de 1.900 mm na bacia do Beni e 1.350 mm no Mamoré (Figura 2). O período chuvoso concentra-se entre janeiro e março, seguido por estação seca de abril a agosto. Os rios Beni, Mamoré e Madeira classificam-se como rios de águas brancas, com padrão multicanal e elevada carga sedimentar (Latrubesse; Stevaux; Sinha, 2005; Sioli, 1984).

As descargas líquidas apresentam forte variabilidade sazonal, com picos entre março e abril. Em Cachuela Esperanza (rio Beni), a vazão varia de $2.946 \text{ m}^3\text{.s}^{-1}$ em setembro a $18.286 \text{ m}^3\text{.s}^{-1}$ em março. Em Guayaramerín (rio Mamoré), oscila entre $1.635 \text{ m}^3\text{.s}^{-1}$ em outubro e $15.552 \text{ m}^3\text{.s}^{-1}$ em abril. No rio Madeira (Porto Velho), a amplitude varia de $4.672 \text{ m}^3\text{.s}^{-1}$ em setembro a $36.139 \text{ m}^3\text{.s}^{-1}$ em março, refletindo a integração dos regimes hidrológicos de seus formadores. Filizola e Guyot, (2011) destacam que os fluxos líquidos e sólidos dos rios Beni e Mamoré são altamente irregulares, com grandes variações anuais.

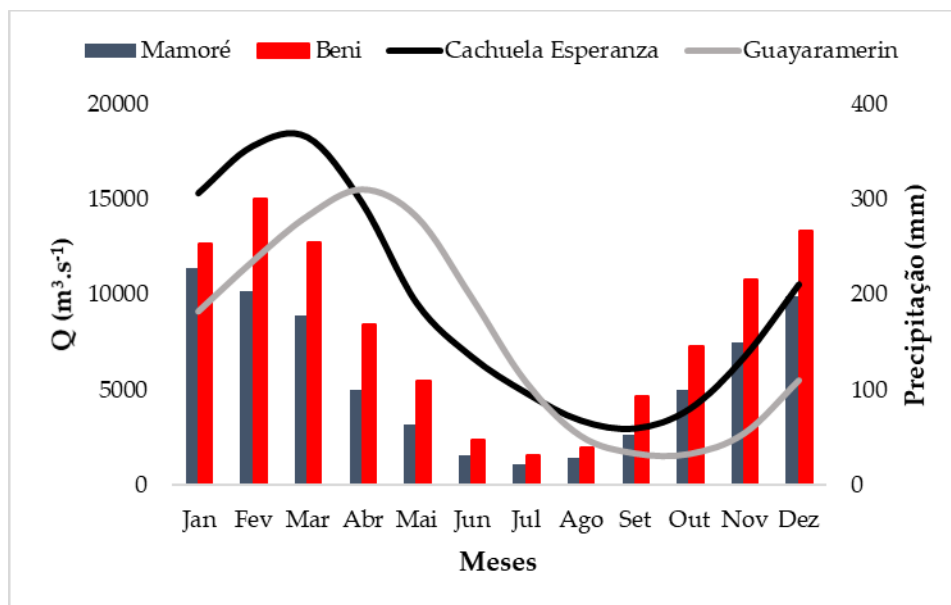


Figura 2. Regime médio mensal de precipitação (barras) e vazão (Q) nas bacias dos rios Beni e Mamoré. Dados de precipitação no período de 1990-2020 e vazão (linhas) de 1984 a 2020. Fonte: CHIRPS (2024); (HYBAM, 2024).

3. Materiais e Métodos

Foram realizadas 13 campanhas de coleta de dados hidrossedimentares entre março de 2021 e abril de 2022 em seções situadas nos rios Beni, Mamoré e Madeira a montante da UHE Jirau, complementadas por séries históricas do Observatório HYBAM (1980-2024). Amostras de 500 ml de águas foram coletadas a 20 cm de profundidade nos pontos de 25%, 50% e 75% da largura do canal para determinar a concentração do material em suspensão (MES).

Para análise da variação vertical da concentração do MES, utilizou-se amostrador de fundo em três pontos da seção transversal e três profundidades distintas. Todas as amostras foram peneiradas em malha de 63 μm e processadas no Laboratório de Geoquímica da UFAM seguindo protocolo HYBAM (2024) para determinação da concentração do MES (mg.L^{-1}), procedimento em consonância com recomendações de monitoramento de qualidade da água e amostragem de sedimentos em suspensão difundidas no âmbito do GEMS/Water (Chapman, 1992).

Dados de vazão (Q) e velocidade (V) foram medidas com Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) modelo Rio Grande 600 kHz acoplado a receptor GNSS Trimble R4. Realizaram-se de duas a quatro travessias por seção, utilizando-se a média para determinação da vazão. Os dados de vetores de velocidade e retroespalhamento do sinal ADCP foram processados no software Velocity Mapping Tool - VMT (Parsons et al., 2013).

Os parâmetros hidrossedimentológicos de concentração de material em suspensão (MES), descarga sólida (Qs), descarga sólida média anual (Qsa) e produção específica de sedimentos foram calculados através das equações 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

$$MES = \left((Pf - Pi) * \frac{1000000}{V} \right) \quad (1)$$

Onde MES (mg.L^{-1}) é a concentração de material em suspensão, determinada pela diferença entre o peso final (Pf) e iniciais (Pi) dos filtros, multiplicada por 1.000.000 (fator de conversão) e dividida pelo volume de filtrado (V).

$$Qs = Q \times MES \times 0,0864 \quad (2)$$

Onde Qs é a descarga sólida média (ton.dia^{-1}), Q é a descarga líquida da seção ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), MES é a concentração de material em suspensão (mg.L^{-1}) e 0,0864 é um fator de conversão.

$$Qsa = Qs \times 365 \quad (3)$$

Onde Qsa é o transporte médio anual de sedimentos em ton.ano^{-1} .

$$Qsp = Qsa / Ab \quad (4)$$

Onde Qsp é a produção específica de sedimentos ($\text{ton/km}^2.\text{ano}$), Ab é a área da bacia, com valores de 280.000 km^2 para o rio Beni, 636.000 km^2 para o rio Mamoré, e 959.000 km^2 para o rio Madeira na seção EST.

Os laços de histerese foram classificados com base no sentido (horário/anti-horário) e na forma do traçado MES-Q ao longo do período analisado, seguindo a tipologia e discussão de histerese classificada por Jing et al. (2025).

A variação vertical da concentração de material em suspensão (MES) foi sintetizada por um coeficiente de estratificação (CE), definido como a razão entre a MES média em profundidade (MES_{prof}) e a MES na superfície (MES_{sup}):

$$CE = MES_{\text{prof}} / MES_{\text{sup}} \quad (5)$$

Para cada campanha e seção, MES_{sup} correspondeu à concentração obtida a ~20 cm de profundidade nos pontos de 25%, 50% e 75% da largura do canal (média desses pontos). MES_{prof} foi calculada como a média das amostras obtidas com o amostrador de fundo nas profundidades amostradas em três pontos da seção transversal, excluindo a amostra de superfície. Valores de CE próximos de 1 indicam baixa estratificação vertical, enquanto valores >1 indicam maior concentração relativa em profundidade, o CE foi utilizado para comparar a intensidade de estratificação entre seções e campanhas.

Os perfis de retroespalhamento do ADCP foram interpretados em conjunto com as amostras de MES em profundidade para avaliar a coerência espacial e vertical dos padrões observados assim como realizado por Filizola

e Guyot (2004). Os vetores médios de velocidade foram obtidos por integração vertical (velocidade média na coluna d'água) a partir dos perfis do ADCP, com rotação/normalização direcional em relação ao eixo principal do canal para permitir comparações entre períodos de águas baixas e altas.

O balanço sedimentar foi elaborado pela variação do Qsa entre seções a montante e jusante, onde valores negativos indicam retenção sedimentar e positivos indicam acréscimo de material entre seções sucessivas, indicando processos erosivos ou deposicionais ao longo do trecho analisado. Os laços de histerese entre MES e descarga líquida (Q) foram para identificar direção (horária ou anti-horária) e amplitude dos padrões temporais, e o coeficientes de determinação (R^2) quantificaram a força da relação linear entre MES e Q em cada seção.

Os dados HYBAM das estações de Cachuela Esperanza no rio Beni, Guayaramerin no rio Mamoré e Porto Velho no rio Madeira (1980-2024) seguem protocolo padronizado com coletas periódicas em estações fixas, enquanto as medições desta pesquisa (2021-2022) envolveram 13 campanhas específicas com maior detalhamento espacial e vertical da distribuição de MES. Esta diferença metodológica foi considerada nas análises comparativas e interpretação dos resultados. O conjunto de dados foram processados em planilha eletrônica permitindo a estimativa de valores médios, mínimos e máximos.

4. Resultados

4.1. O regime fluvial e balanço sedimentar dos rios Beni, Mamoré e Madeira

As análises dos dados médios mensais (1980-2024) nas estações de Guayaramerín (rio Mamoré) e Cachuela Esperanza (rio Beni) apresentam padrões de histerese anti-horária entre concentração de material em suspensão (MES) e precipitação (Figuras 3a e 3b). Observa-se defasagem temporal da ordem de 0–1 mês entre as variações mensais de MES e precipitação: em Cachuela Esperanza, os picos de precipitação e MES coincidem em fevereiro (~0 mês), enquanto em Guayaramerín o pico de precipitação ocorre em janeiro e o de MES em fevereiro (~1 mês) (Figuras 3a e 3b). Durante a vazante, a MES diminui mais lentamente do que a precipitação, mantendo valores relativamente elevados nos primeiros meses do período seco.

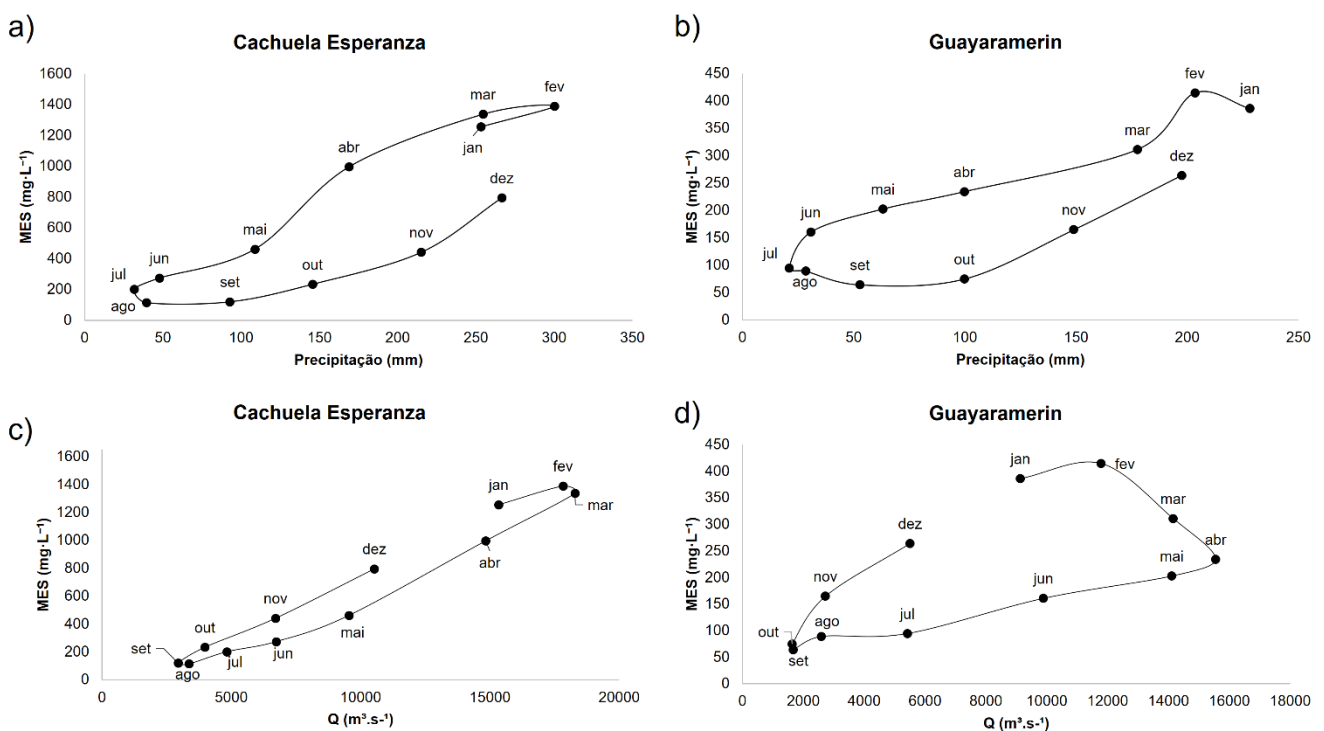


Figura 3. Regime médio mensal de material em suspensão (MES), precipitação (mm) e vazão (Q) nas bacias dos rios Beni e Mamoré. Dados de precipitação no período de 1990-2020, MES e vazão de 1984 a 2020. Fonte: CHIRPS (2024); (HYBAM, 2024).

Na relação entre MES e descarga líquida (Q), ambas as estações apresentam histerese horário (Figuras 3c e 3d). Em Cachuela Esperanza, a relação MES versus Q é predominantemente positiva, porém, entre maio e novembro registra-se forte variação na descarga líquida (>2.000 m³.s⁻¹) com MES relativamente estável. Em Guayaramerín, o laço de histerese é mais pronunciado, apresentando diferenças claras entre o regime de subida e descida da vazão, com variação de MES de 100-150 mg.L⁻¹ entre abril e agosto.

No rio Madeira em Porto Velho, a relação MES versus Q (Figura 4) apresenta histerese horário similar às estações de montante. Entre abril e julho predomina elevado volume de água com menores concentrações de MES, enquanto de setembro a fevereiro observa-se relação quase linear entre MES e Q.

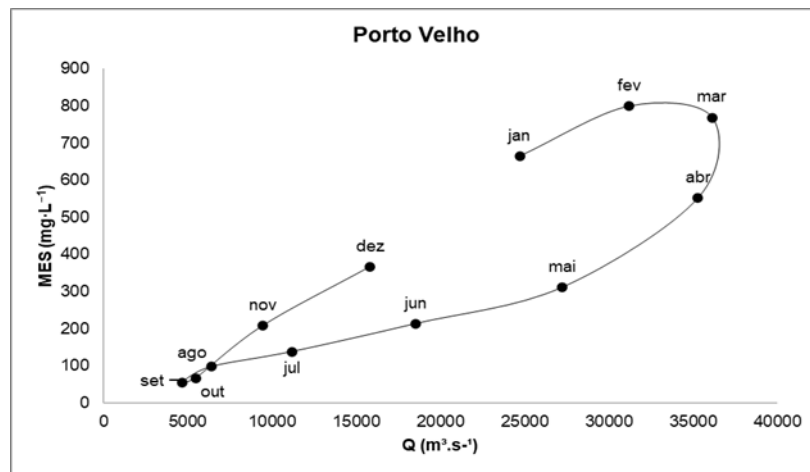


Figura 4. Concentração média mensal de MES versus descarga líquida média mensal na estação de Porto Velho no rio Madeira.

A descarga sólida média diária foi de 5,53×10⁵ ton.dia⁻¹ em Cachuela Esperanza (Rio Beni) e 1,36×10⁵ ton.dia⁻¹ em Guayaramerín (Rio Mamoré), resultando em transporte anual da ordem de 2,02×10⁸ e 0,50×10⁸ ton.ano⁻¹, respectivamente. Em Porto Velho (Rio Madeira), registrou-se descarga sólida média de 6,10×10⁵ ton.dia⁻¹ e transporte anual de 2,23×10⁸ ton.ano⁻¹ (Tabela 1).

Tabela 1. Descarga sólida diária (Qs) e anual (Qsa) do material em suspensão, e variação observada da soma dos rios Beni e Mamoré para jusante em Porto Velho (Δ).

Estação	Rio	Qs	Qsa	Δ (%)
		(ton.dia ⁻¹)	(ton.ano ⁻¹)	
Cachuela Esperanza	Beni	5.53×10 ⁵	2.02×10 ⁸	-
Guayaramerín	Mamoré	1.36×10 ⁵	0.50×10 ⁸	-
Porto Velho	Madeira	6.10×10 ⁵	2.23×10 ⁸	-11,29

O balanço hidrossedimentar em Porto Velho apresenta déficit de 11,29% em relação à soma das descargas de montante, representando deposição de aproximadamente 2,84×10⁷ ton.ano⁻¹ (7,77×10⁴ ton.dia⁻¹) no transporte de sedimentos ao longo do trecho analisado.

4.2. A dinâmica hidrossedimentar e variação vertical

Os laços de histerese entre a concentração de material em suspensão (MES) e a descarga líquida (Q) expressam diferenças de MES, para um mesmo valor de Q, entre os períodos de subida e de vazante do ciclo hidrológico. Como os laços aqui apresentados foram construídos a partir de 13 campanhas (2021–2022), comparações com produtos do HYBAM devem considerar diferenças de escala temporal e frequência de amostragem. Na Figura 5, as seções BEN, MAM, TAM e EST apresentam laços predominantemente horários, com formas distintas entre os

rios formadores e o rio Madeira a jusante. O coeficiente de Determinação (R^2) entre MES–Q foi moderado em BEN e MAM (0,66–0,67) e baixo em TAM (0,37), indicando maior dispersão da relação MES–Q nessa seção.

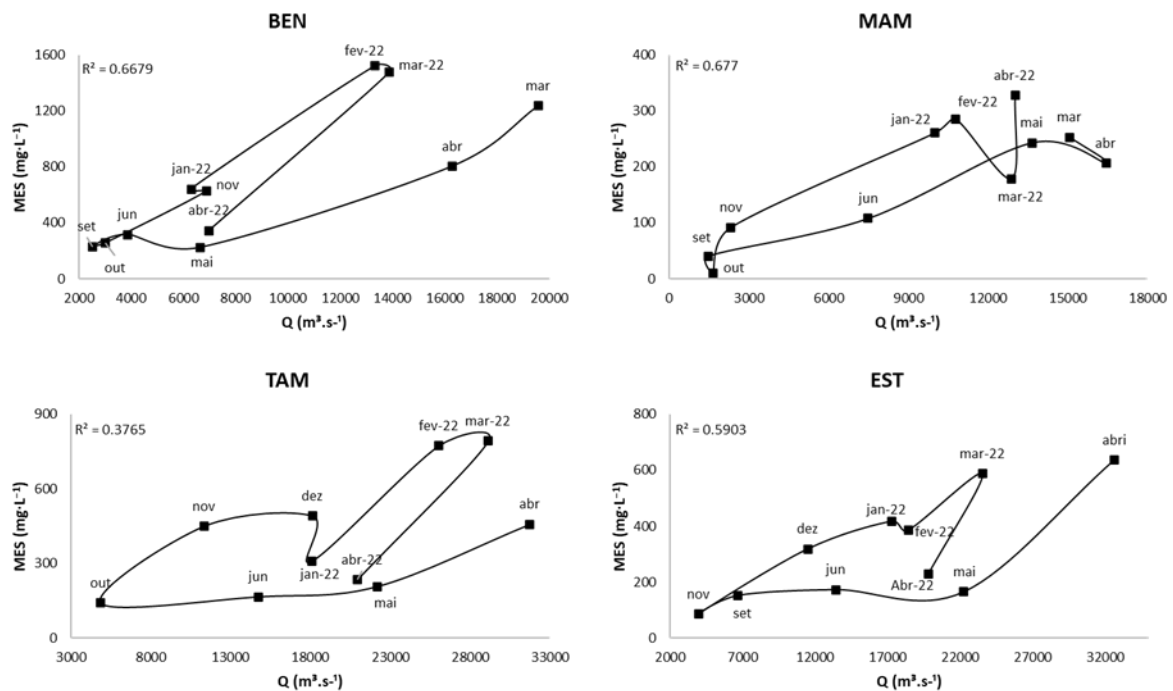


Figura 5. Laços de histerese entre a concentração de material em suspensão (MES) e a descarga líquida (Q) nas seções BEN (rio Beni), MAM (rio Mamoré), TAM e EST (rio Madeira) no período de março de 2021 a abril de 2022. Os gráficos destacam as variações de MES em função de Q ao longo do ciclo hidrológico anual.

Em BEN, as maiores irregularidades concentram-se nas campanhas de águas baixas (junho–outubro), com quedas abruptas de MES entre campanhas sucessivas e recuperação em campanhas posteriores. Em MAM, o laço é mais regular na maior parte do ciclo, com uma oscilação marcada em março de 2022. Em TAM e EST, os pontos das campanhas de vazante situam-se, em geral, em níveis de MES inferiores aos observados nas campanhas de subida, além disso, as campanhas de maio e novembro apresentam valores de MES semelhantes, embora correspondam a fases distintas do ciclo hidrológico.

A seção BEN apresentou a maior concentração média de MES (639 mg.L^{-1}) e a produção específica mais elevada ($2,07 \text{ ton.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$), mesmo registrando vazão inferior ($8.795 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) em relação às demais seções (Tabela 2). A seção MAM, com vazão superior ($10.531 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), demonstrou concentrações de MES e produção específica significativamente menores (218 mg.L^{-1} e $0,34 \text{ ton.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, respectivamente). Na seção TAM, o maior valor de velocidade média ($1,40 \text{ m.s}^{-1}$) ocorreu simultaneamente com vazão de $20.716 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e concentração intermediária de MES (371 mg.L^{-1}), resultando em transporte anual de aproximadamente 257 milhões de toneladas e balanço negativo de 12% em relação ao total das seções de montante. A seção EST caracterizou-se pela maior largura de canal (1.134 m) e menor velocidade ($0,73 \text{ m.s}^{-1}$), com valores de MES e Q similares aos da estação TAM, porém, apresentando novo decréscimo no fluxo sólido anual (Q_{sa} com balanço de -3%) e a menor produção específica ($0,24 \text{ ton.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$) entre todas as seções avaliadas.

Tabela 2. Características das quatro seções analisadas no estudo. Valores médios observados em superfície.

Seção	Rio	Largura média (m)	Vel. (m·s ⁻¹)	MES (mg. L ⁻¹)	Q (m ³ .s ⁻¹)	Qsa (ton.ano ⁻¹)	Balanco (%)	Produção Específica (ton.km ⁻² .ano ⁻¹)
BEN	Beni	859	1,03	639	8.795	212.207.962		2,07
MAM	Mamoré	632	1,01	218	10.531	79.663.303		0,34
TAM	Madeira	891	1,40	371	20.716	257.859.100	-12%	0,38
EST	Madeira	1134	0,73	357	20.146	251.342.233	-3%	0,24

A análise da variação vertical de MES demonstrou padrões sazonais distintos entre as seções monitoradas (Figura 6). Na seção BEN, o coeficiente de estratificação (CE) atingiu valores máximos de 2,9 em novembro e 2,3 em dezembro de 2021, reduzindo para 1,7–1,8 em janeiro–fevereiro de 2022 e retornando a valores elevados durante águas altas (2,4 em março e 2,0 em abril). Na seção MAM, o CE foi menor em novembro de 2021 (1,1), aumentou progressivamente até 4,13 em março de 2022 e reduziu para 1,67 em abril.

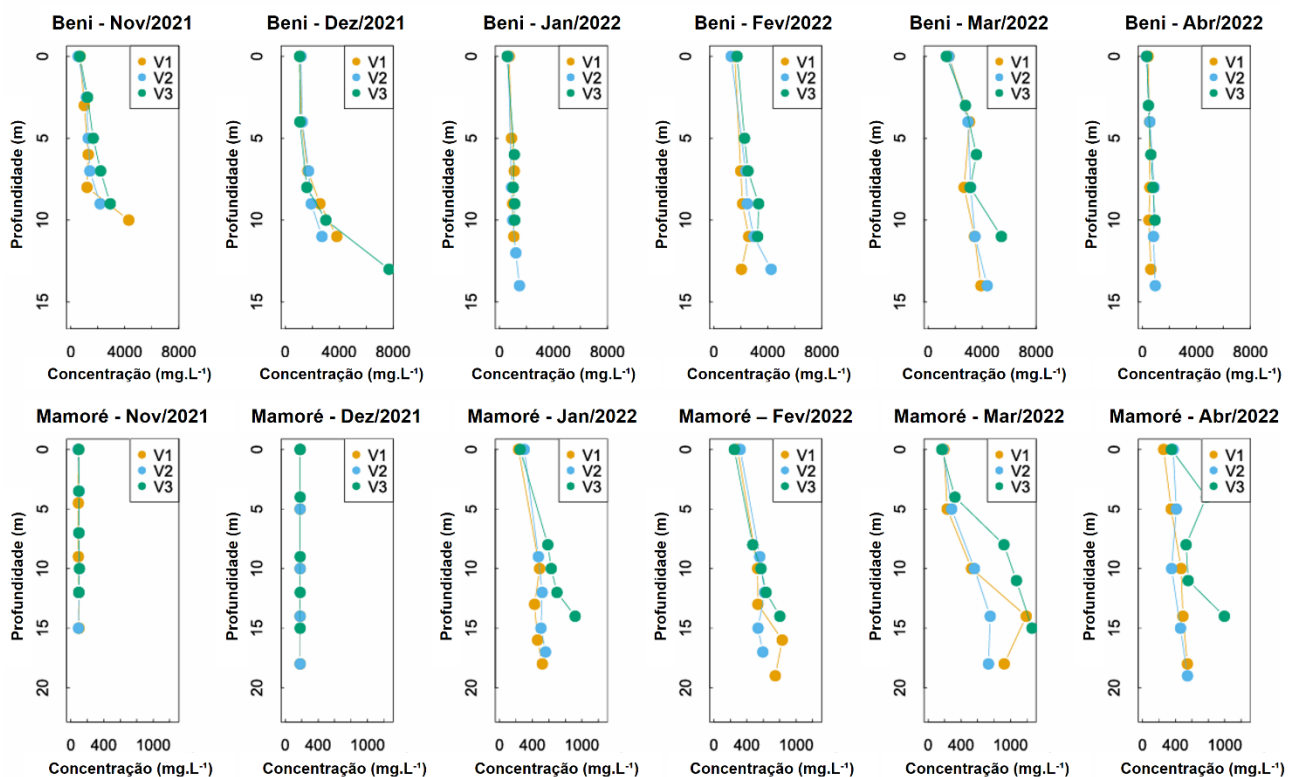


Figura 6. Variação vertical da concentração de material em suspensão (MES) ao longo de três pontos (V1 – margem direita, V2 – centro do canal, V3 – margem esquerda) nas seções BEN (Rio Beni) e MAM (Rio Mamoré), entre novembro de 2021 e abril de 2022.

Nas seções do rio Madeira (Figura 7), a variação vertical de MES foi moderada inicialmente, com coeficiente de estratificação (CE) de 1,37 (novembro) e 1,54 (dezembro) em TAM. Durante águas altas (janeiro), o CE aumentou para 2,81, mantendo-se elevado nos meses subsequentes (2,41 em março e 3,10 em abril de 2022), com média do período de 2,2. Na seção EST, o CE foi menor, variando de 1,61 em janeiro a 2,80 em março de 2022, com média do período de 1,9.

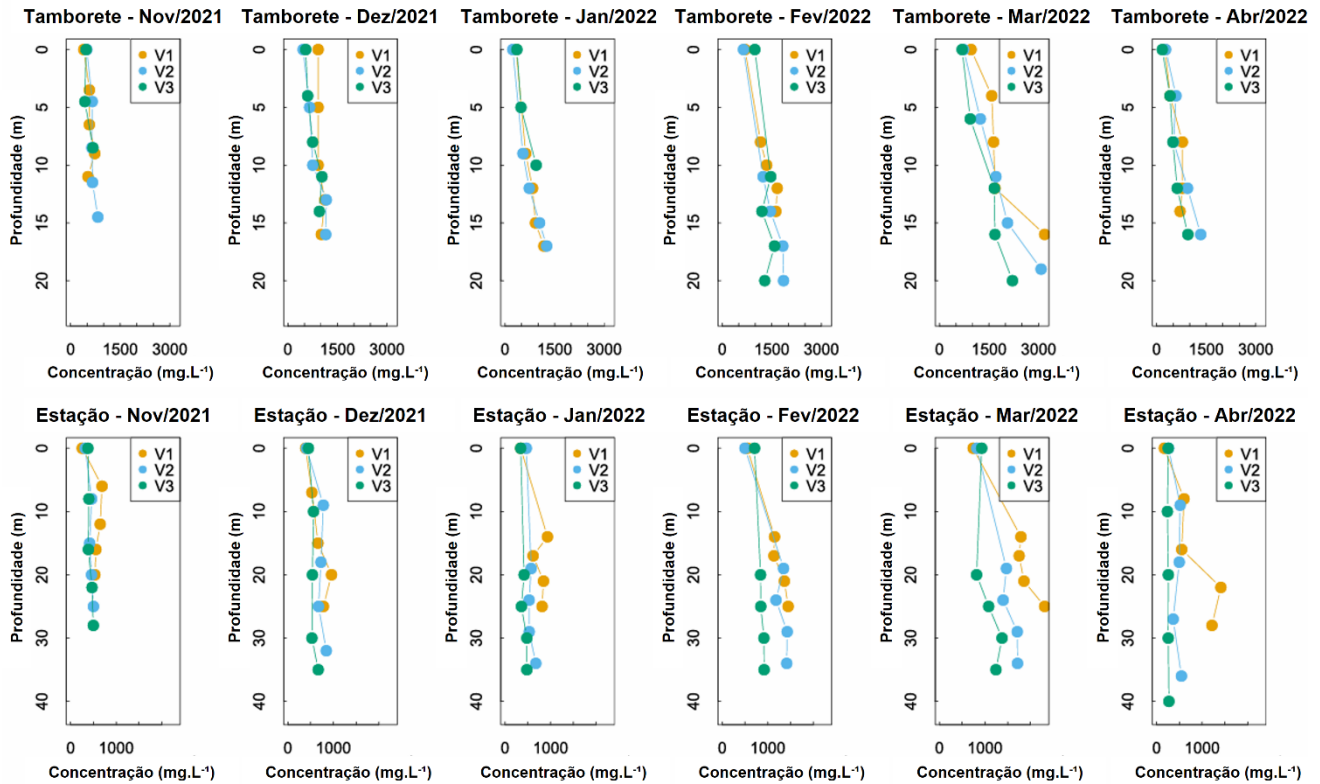


Figura 7. Variação da concentração de material em suspensão (MES) em profundidade nas seções Tamborete (TAM) e Estação (EST) do rio Madeira, de novembro de 2021 a abril de 2022. Os pontos V1, V2 e V3 correspondem, respectivamente, à margem direita, centro do canal e margem esquerda.

Os perfis de retroespalhamento do sinal ADCP confirmam os padrões de distribuição vertical de MES observados nas análises diretas. Durante o período de águas baixas em novembro de 2021 (Figura 8), a seção BEN apresentou maior intensidade do sinal no centro do canal, com concentrações de MES variando entre 300 mg.L⁻¹ e 900 mg.L⁻¹. A seção MAM demonstrou distribuição mais uniforme ao longo do perfil do sinal ADCP, com a margem esquerda registrando as maiores concentrações (400-900 mg.L⁻¹). Na seção TAM, o sinal ADCP foi mais intenso no centro do canal entre 10-14 m de profundidade, onde as concentrações de MES apresentaram elevada variação (300-1300 mg.L⁻¹). A seção EST exibiu maior intensidade na margem direita, com concentrações atingindo 1400 mg.L⁻¹ entre 20-30 m de profundidade.

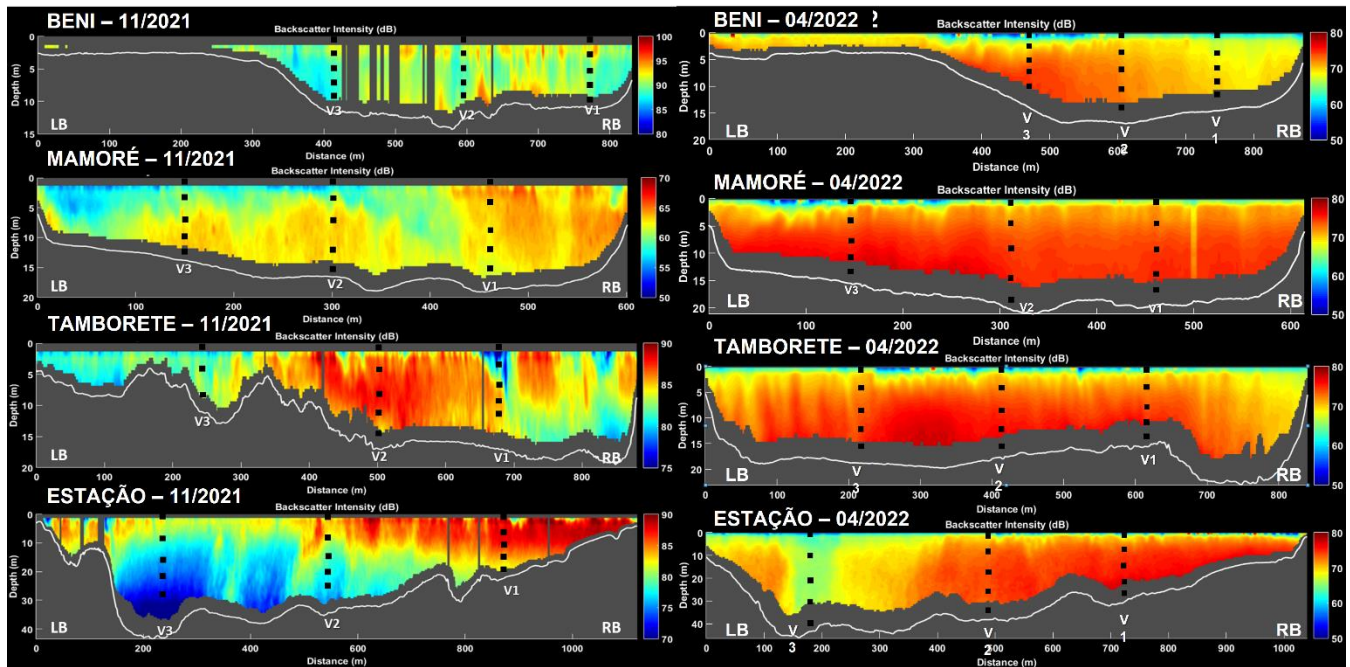


Figura 8. Perfis transversais dos rios Beni, Mamoré e Madeira com a variação do retroespalhamento do sinal ADCP em profundidade em novembro e abril de 2022 de 2021. LB: margem esquerda. RB: margem direita. Valores em decibéis (dB). Pontos indicam os locais de amostragens de SSC em profundidade.

No período de águas altas em abril de 2022 (Figura 8), observaram-se modificações substanciais nos padrões de distribuição vertical. A seção BEN apresentou forte retorno do sinal na margem direita, confirmando maior concentração de MES em profundidade nessa região. Na seção MAM, o sinal intensificou-se no centro do canal e ao longo da margem esquerda, enquanto a margem direita registrou menores concentrações mesmo em zonas de maior profundidade. A seção TAM manteve retroespalhamento elevado no centro do canal, com concentrações variando de 450 mg.L⁻¹ na superfície a 1000 mg.L⁻¹ em profundidades maiores. A seção EST revelou maior intensidade na margem direita, onde foram registradas concentrações de aproximadamente 700 mg.L⁻¹ entre 5-10 m de profundidade, com valores menores (cerca de 500 mg.L⁻¹) em profundidades superiores.

A distribuição dos vetores médios de velocidade demonstrou variações hidrodinâmicas importantes entre períodos hidrológicos e seções analisadas (Figura 9). Durante águas baixas (novembro 2021), a seção EST apresentou fluxo concentrado próximo à margem direita com velocidades médias de 0,41 m.s⁻¹ e orientação dos vetores em torno de 105°. A seção TAM exibiu padrão distinto, com velocidades mais intensas (média de 1,01 m.s⁻¹ e máxima de 1,40 m.s⁻¹) concentradas no centro do canal, orientadas a 40°. Na confluência Beni-Mamoré, os vetores do Beni atingiram média de 1,10 m.s⁻¹ concentrados junto à margem direita, enquanto o Mamoré apresentou menor intensidade (0,25 m.s⁻¹) predominando ao longo da margem direita.

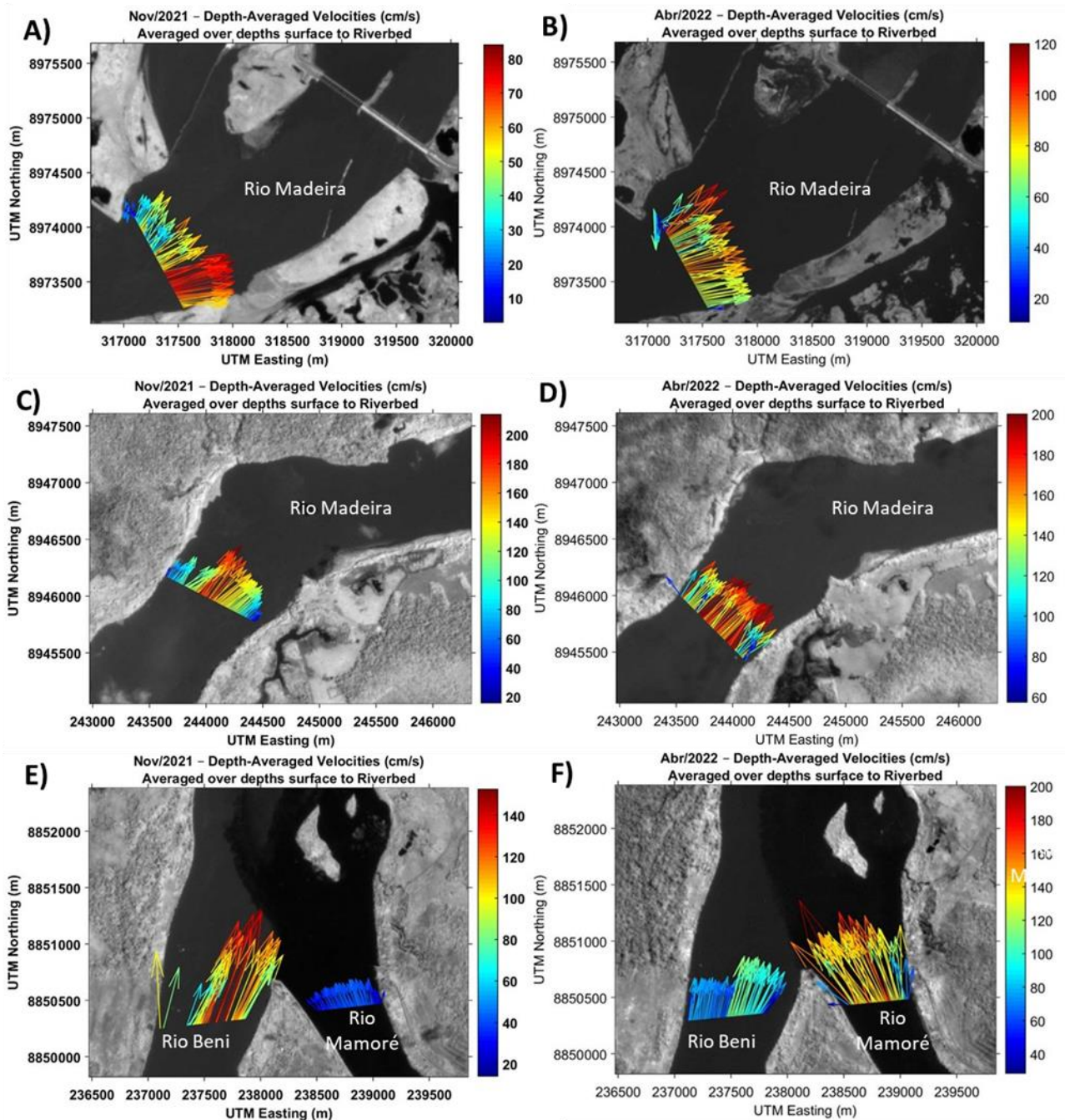


Figura 9. Vetores médios de velocidade em profundidade ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) e direção do fluxo nas seções transversais dos rios Madeira (EST e TAM) e na confluência Beni–Mamoré, comparando águas baixas (novembro/2021; painéis A, C, E) e águas altas (abril/2022; painéis B, D, F).

No período de águas altas (abril 2022), registrou-se aumento das velocidades médias em todas as seções. A seção EST apresentou vetores mais intensos e mais bem distribuídos, com média de $1,34 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, atingindo valores máximos no centro e na margem esquerda. A seção TAM registrou velocidades médias de $1,83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, mantendo concentração no centro, mas com distribuição mais homogênea ao longo do canal. Na confluência Beni-Mamoré, observou-se inversão do padrão sazonal, com o Mamoré atingindo média de $1,38 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e superando o Beni ($1,10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), apresentando vetores mais intensos e distribuídos.

5. Discussão

A dinâmica hidrossedimentar na confluência Beni-Mamoré é condicionada por fatores geológicos, hidroclimáticos e antrópicos que se manifestam em escalas temporal e espacial distintas. A variabilidade climática regional, caracterizada por aumento da frequência de dias secos e redução da precipitação média anual após 1991 na porção sul da bacia (rio Mamoré) contrastando com incremento nos dias úmidos na porção norte (rio Beni), influencia diretamente os padrões de transporte sedimentar (Espinoza et al., 2019).

Nesse contexto, os contrastes de MES entre os rios formadores também podem ser interpretados a partir das diferenças no trajeto do aporte sedimentar desde o piemonte andino até as seções de monitoramento. A associação entre variabilidade de precipitação e mudanças em MES no alto Madeira é consistente com resultados apresentados para a bacia por Rivera et al. (2019, 2021). No caso do Mamoré, a presença de planícies extensas e da região de antepaís (bacia de foreland) pode favorecer retenção/deposição de parte do material antes da transferência para jusante, contribuindo para menores concentrações médias em relação ao Beni (Vauchel et al., 2017). As mudanças no uso da terra descritas por Severo e Marinho (2023) fornecem contexto para a evolução recente da bacia, mas não explicam, isoladamente, as diferenças observadas nas concentrações médias de MES (639 mg.L⁻¹ no Beni e 218 mg.L⁻¹ no Mamoré).

A predominância do aporte sedimentar andino, quantificada por Guyot, Jouanneau e Wasson (1999), reflete-se nos elevados valores de produção específica observados, especialmente na seção BEN (2,07 ton.km⁻².ano⁻¹). Esta predominância andina exerce forte controle sobre a morfodinâmica fluvial por centenas de quilômetros a jusante da zona de cabeceira, conforme discutido por Constantine et al. (2014) para grandes rios amazônicos.

O material transportado pelo rio Madeira até sua foz provém principalmente dos rios Beni e Mamoré e os tributários de planície possuem pouca contribuição (Espinoza Villar et al., 2013; Filizola e Guyot, 2011; Vauchel et al., 2017). As variações observadas refletem tanto as características geomorfológicas das seções quanto as diferenças no regime sazonal dos rios, evidenciando a complexidade dos processos que governam o sistema. Por outro lado, grandes barragens em regiões de baixa altitude podem alterar as características e a morfologia do canal (Timpe; Kaplan, 2017).

No Madeira, esse tipo de intervenção é discutido também em termos de redução/redistribuição de sedimentos em suspensão e reorganização geomorfológica associada à implantação de UHes (Latrubesse et al., 2017; Santos et al., 2024). Além dos controles em escala de bacia, os padrões observados na relação MES-Q permitem discutir a resposta temporal do sistema hidrossedimentar ao longo do ciclo hidrológico.

Os laços de histerese MES-Q permitem discutir diferenças entre os ramos de subida e vazante e, em termos gerais, a rapidez com que a MES responde à variação de Q. Laços horários são usualmente associados a resposta mais rápida do sedimento em suspensão, enquanto padrões anti-horários indicam resposta mais tardia, com implicações para tempo de entrega e localização relativa das fontes (Jing et al., 2025). Como os laços aqui derivam de campanhas discretas, a interpretação é restrita ao padrão sazonal observado, sem pretensão de caracterizar eventos individuais.

Face a isso, os laços predominantemente horários nas seções analisadas são compatíveis com maior contribuição de fontes proximais/rápida mobilização. Além disso, os ajustes lineares MES-Q indicaram R² moderados em BEN e MAM (0,66–0,67) e menor em TAM (0,37), coerentes com maior dispersão dos pares MES-Q em TAM. Em conjunto, as diferenças de forma, dispersão e ajuste entre BEN/MAM e TAM/EST sugerem efeitos combinados de proximidade da fonte andina, armazenamento lateral e controle hidráulico a jusante.

O comportamento observado na seção BEN, com reduções bruscas na concentração de MES durante águas baixas seguidas por elevação gradual com aumento de vazão, é compatível com a dinâmica de grandes rios tropicais descritos por Latrubesse, Stevaux e Sinha (2005), onde alternâncias sazonais entre cheia e vazante condicionam a resposta morfológica do sistema. Nas seções TAM e EST, a resposta mais amortecida da concentração de MES em relação à variação de vazão pode estar associada à maior distância da fonte sedimentar andina e à influência dos sistemas hidráulicos a jusante (Charlton, 2008; Chow, 2009; Vanoni, 2006).

A estratificação vertical de MES apresentou padrões sazonais distintos, sendo mais pronunciada durante as cheias em todas as seções analisadas. Durante a cheia, há maior estratificação vertical dos sedimentos, especialmente em TAM, onde a razão profundidade/superfície atingiu 3,10. Os coeficientes observados - BEN (2,9), MAM (4,13), TAM (3,10) e EST (2,80) superaram significativamente os valores de 1,7 registrados por Filizola (2003) no baixo curso do Madeira, indicando condições de maior heterogeneidade vertical no trecho estudado.

Esta maior estratificação durante águas altas pode estar relacionada ao aumento do transporte de sedimentos provenientes das áreas de cabeceira andina, conforme sugerido por Vauchel et al. (2017). A distribuição mais uniforme observada no Rio Madeira na seção EST pode refletir processos de mistura e deposição associados à morfologia local do canal e à integração das contribuições dos principais afluentes, bem como à influência da velocidade reduzida do canal, que diminui a capacidade de transporte de material devido à proximidade do reservatório.

Os padrões de retroespalhamento do sinal ADCP apoiam as medições diretas, embora a relação entre intensidade do sinal e concentração de sedimentos não seja linear. De acordo com Filizola e Guyot (2004), a estimativa de MES pelo retroespalhamento exige calibração específica por trecho, limitando aplicações operacionais, mas oferecendo potencial para monitoramento complementar.

Em termos de balanço longitudinal, os resultados também indicam perdas entre a confluência e a seção a jusante. O déficit sedimentar de 15% observado entre a confluência e a seção EST representa continuidade da tendência de redução identificada por Rivera et al. (2019, 2021), embora em menor intensidade que as reduções de 36% (Beni) e 30% (Madeira) documentadas pelos autores entre 2003-2017. De forma semelhante, Latrubesse et al. (2017) também identificaram redução de ~20% na concentração média anual de sedimentos em suspensão na superfície no rio Madeira a jusante da UHE Santo Antônio, na região de Porto Velho, indicando diminuição na disponibilidade/concentração de sedimentos em suspensão no trecho sob influência do Complexo Madeira. Esta redução pode estar relacionada à deposição favorecida por zonas de baixa energia associadas à geometria retilínea do canal, que segundo Best e Rhoads (2008), promovem áreas de recirculação e remanso favoráveis à deposição sedimentar.

A elevada produção específica no rio Beni (2,07 ton.km⁻².ano⁻¹) confirma seu papel dominante na dinâmica sedimentar regional, enquanto a produção específica reduzida na seção EST (0,24 ton.km⁻².ano⁻¹) indica retenção associada à influência dos sistemas hidráulicos, com por exemplo a UHE Jirau. Esta retenção favorece a deposição de partículas mais finas, conforme apresentado por Rivera et al. (2019, 2021) e corroborado pelos dados batimétricos de Cordeiro et al. (2024) e de sensoriamento remoto por Santos et al. (2024).

A distribuição de velocidades apresentou forte assimetria sazonal na confluência, com dominância do Beni em águas baixas (1,10 versus 0,25 m.s⁻¹ no Mamoré) e inversão em águas altas, quando o Mamoré supera o Beni (1,38 versus 1,10 m.s⁻¹ do Beni). A configuração da geometria em Y (160°) da confluência limita a mistura dos fluxos e favorece zonas de recirculação (Best, 1987; Best; Rhoads, 2008).

Além de controles hidrodinâmicos locais, a geometria do vale e a presença de meandros a montante de Jirau podem favorecer o armazenamento de sedimentos antes do trecho mais estreito associado à seção EST. No alto Madeira, a compartimentação morfoestrutural está associada a trechos com estreitamento da planície de inundação e mudanças na sinuosidade, interpretadas em relação a barreiras/altos estruturais, com potencial para alterar a conectividade lateral e o armazenamento sedimentar no corredor fluvial (Souza Filho et al., 1999).

No trecho a montante de EST, a planície mais ampla e o desenvolvimento de meandros sugerem maior capacidade de troca canal-planície, que tende a diminuir em direção ao setor mais confinado. Nesse contexto, o meandramento é importante porque o aumento da migração lateral do canal e a ocorrência de cortes de meandro (*cutoffs*) tendem a ampliar a transferência de sedimentos do canal para a planície. À medida que meandros migram e são cortados, formam-se feições como meandros abandonados e novos setores de planície, que funcionam como áreas de acomodação e armazenamento de sedimentos. Com isso, parte do material transportado pode ser retida lateralmente, reduzindo a fração que permanece no canal e é exportada a jusante (Constantine et al., 2014).

Em rios amazônicos com elevada produtividade sedimentar, a troca canal-planície e o armazenamento na planície podem representar parcela relevante do balanço sedimentar, e as planícies do Beni e Mamoré são descritas como zonas de estocagem (Latrubesse et al., 2017). No contexto de barramentos no Madeira, há evidências de redução de sedimentos em suspensão a jusante de grandes UHEs e de controle geomorfológico na localização de trechos de erosão e assoreamento, reforçando a necessidade de interpretar diferenças entre TAM e EST considerando o contraste planície-estreitamento e a influência hidráulica do sistema (Latrubesse et al., 2017; Santos et al., 2024).

O contexto geomorfológico do trecho, situado nas bordas da bacia sedimentar amazônica em contato com o embasamento cristalino condiciona características de canal mais encaixado com menor desenvolvimento relativo de planícies de deposição. Esta configuração morfoestrutural limita a expansão lateral e restringe áreas de armazenamento sedimentar, favorecendo predominantemente o transporte longitudinal, em consonância com os

padrões descritos por Latrubesse (2008) para rios anabranching da Amazônia. Por outro lado, Rivera et al. (2021) ressaltam que variações espaciais e temporais na precipitação têm efeito direto sobre as concentrações de material em suspensão no alto curso da bacia.

A comparação com dados históricos de Guyot et al. (1995) confirma a consistência dos dados apresentados neste trabalho, com concentrações médias similares para Beni (690 versus 639 mg.L⁻¹) e valores ligeiramente diferentes para Mamoré e Madeira, refletindo variabilidade natural e mudanças ambientais no período entre estudos. Os valores absolutos de transporte sedimentar permanecem inferiores aos estimados por Vauchel et al. (2017) devido a diferenças metodológicas, mas confirmam a tendência de redução documentada regionalmente.

5. Conclusões

Este estudo analisou a dinâmica hidrossedimentar na confluência dos rios Beni e Mamoré com base em campanhas de campo (2021–2022) e em séries históricas do Observatório HYBAM, contribuindo para reduzir a lacuna de informações sobre o transporte de sedimentos em suspensão nesse trecho. Os resultados oferecem subsídios à interpretação de processos hidrossedimentológicos essenciais para a gestão do reservatório da UHE Jirau e para a hidrovia do rio Madeira.

Destaca-se diferenças expressivas nos regimes de transporte entre as seções analisadas. O rio Beni apresentou maior concentração de MES (639 mg.L⁻¹) e produção específica (2,07 ton.km⁻².ano⁻¹) comparado ao Mamoré (218 mg.L⁻¹ e 0,34 ton.km⁻².ano⁻¹), refletindo suas diferentes origens geológicas e condições geomorfológicas. As seções do rio Madeira demonstraram características intermediárias com padrões de histerese horários distintos dos rios formadores.

Os resultados do balanço realizado, indica um déficit no transporte de sedimentos da ordem de 15% entre a confluência e a seção EST, representando retenção de aproximadamente 40 milhões de toneladas ao longo de 220 km. Essa retenção pode ser atribuída a processos deposicionais decorrentes da redução de velocidade do escoamento no rio Madeira. Esse tipo de ocorrência constitui fenômeno normal quando da existência de mudanças hidráulicas significativas no sistema fluvial (Charlton, 2008, Chow, 2009 e Vanoni, 2006), tais como alterações no nível de base de um rio, decorrentes da construção de barramentos hidrelétricos, por exemplo.

A variabilidade sazonal e vertical da MES foi pronunciada, com máximos de estratificação em águas altas (2,9 em BEN; 4,13 em MAM; 3,10 em TAM; 2,80 em EST), indicando heterogeneidade vertical relevante para estimativas de concentração e para o cálculo de fluxos sedimentares. Os resultados apresentam continuidade da tendência de redução no transporte de sedimentos em suspensão documentada regionalmente, embora em menor intensidade que períodos anteriores. Os rios Beni e Mamoré contribuem com aproximadamente 291 milhões de toneladas anuais de MES para o rio Madeira, confirmando seu papel estratégico no balanço sedimentar amazônico. A predominância do aporte andino e os padrões sazonais de estratificação vertical têm implicações diretas para estimativas por sensoriamento remoto e cálculos de fluxo sedimentar total.

A configuração geomorfológica da confluência (situada nas bordas da bacia de deposição amazônica) condiciona características de canal encaixado que limitam áreas de armazenamento sedimentar, favorecendo transporte longitudinal. Esta configuração, associada à variabilidade hidroclimática regional e pressões antrópicas crescentes, destaca a necessidade de monitoramento hidrossedimentar contínuo para subsidiar estratégias de conservação e uso sustentável dos recursos na bacia.

Este trabalho contribui para suprir lacunas na compreensão dos impactos da regulação fluvial sobre regimes sedimentares em grandes rios tropicais, fornecendo base científica para pesquisas futuras e políticas de gestão ambiental na Amazônia. Os dados inéditos apresentados e o balanço hidrossedimentométrico proposto constituem ferramentas importantes para a gestão integrada dos recursos hídricos da bacia do rio Madeira frente às pressões ambientais crescentes.

Contribuições dos Autores: Concepção, E.B.S, R.R.M., J.M., N.P.F. e H.L.R.; metodologia, E.B.S, R.R.M., J.M., N.P.F., W.S. e K.A.; validação, E.B.S, R.R.M., J.M., N.P.F., H.L.R, K.A., D.O., A.Z. e O.S.; análise formal, E.B.S, R.R.M, J.M., H.L.R., W.S., M.S.Q., C.S. e D.F.; investigação, E.B.S., R.R.M., J.M., K.A., D.O., A.Z. e O.S.; recursos, J.M., N.P.F., H.L.C., K.A., C.S. e D.F.; curadoria dos dados, E.B.S. e J.M.; Redação - versão inicial, E.B.S., R.R.M., J.M., N.P.F., H.L.R., K.A., W.S., D.O., A.Z., O.S., M.S.Q., C.S. e D.F.; Redação - revisão e edição, E.B.S., R.R.M., J.M., N.P.F. e M.S.Q.; supervisão, R.R.M., J.M., N.P.F., H.L.R. e MSQ; administração do projeto, J.M, N.P.F. e H.L.R.; aquisição de financiamento, J.M., N.P.F., H.L.C., C.S. e D.F.; Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pela Jirau Energia por meio do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (PD-06631-0010/2020).

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao Programa de Pós-graduação em Geografia da UFAM. Agradecemos também aos grupos de pesquisas H2A e ao observatório de longo prazo HYBAM pelo fornecimento de equipamentos para o trabalho de campo. Os autores agradem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas (FAPEAM) pela bolsa de nível mestrado cedida no ano de 2021/2024 ao primeiro autor. Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001, e por fim, aos revisores da RBG pelos comentários e sugestões que contribuíram para a versão final do manuscrito.

Conflito de Interesse: Os autores declaram haver conflito de interesse. Os financiadores tiveram papel na análise e interpretação dos dados, na redação do manuscrito e na decisão de publicar os resultados.

Referências

1. ALCÁRCEL-GUTIÉRREZ, F. A.; TAPIAS, J. G.; RAMÍREZ, N. E. M.; ALMANZA-MELÉNDEZ, M. F. Geological Map of South America in Google Earth. *Journal of Maps*, v. 19, n. 1, p. 1-7, 2023. DOI: 10.1080/17445647.2023.2185167
2. BEST, J. L. FLOW DYNAMICS AT RIVER CHANNEL CONFLUENCES: IMPLICATIONS FOR SEDIMENT TRANSPORT AND BED MORPHOLOGY. In: ETHRIDGE, F. G.; FLORES, R. M.; HARVEY, M. D. (Eds). *Recent Developments in Fluvial Sedimentology*. 1997. p. 27–35.
3. BEST, J. L.; RHOADS, B. L. Sediment Transport, Bed Morphology and the Sedimentology of River Channel Confluences. In: RICE, S. P.; ROY, A. G.; RHOADS, B. L. (Eds.). *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*. 1. ed. Wiley, 2008. p. 45–72.
4. CHAPMAN, D. *Water Quality Assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. Abingdon, UK: Taylor & Francis, 1992.
5. CHARLTON, Ro. *Fundamentals of fluvial geomorphology*. London; New York: Routledge, 2008.
6. CHOW, Ven Te. *Open-channel hydraulics*. Caldwell, NJ: Blackburn Press, 2009.
7. CONSTANTINE, J. A.; DUNNE, T.; AHMED, J.; LEGLEITER, C.; LAZARUS, E. D. Sediment supply as a driver of river meandering and floodplain evolution in the Amazon Basin. *Nature Geoscience*, v. 7, n. 12, p. 899–903, 2014. DOI: 10.1038/ngeo2282
8. CORDEIRO, G. A. R. V.; IANNIRUBERTO, M.; ROIG, H. L.; FERREIRA, O. S.; MARTINEZ, J. M. Seismic assessment of sediment siltation in a tropical run-of-river hydroelectric reservoir. *Environmental Challenges*, v. 16, p. 1-18, 2024. DOI: 10.1016/j.envc.2024.100996
9. DNIT. *Hidrovia do Madeira – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes*. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/old/hidrovia-do-madeira>>. Acesso em: 27 out. 2023.
10. ESPINOZA, J. C.; SÖRENSSON, A. A.; MOLINA-CARPIO, J.; SEGURA, H.; GUTIERREZ-CORI, O.; RUSCICA, R. CONDOM, T.; WONGCHUIG-CORREA, S. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982–2017 period. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 26, p. 1-17, 2019. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100637
11. ESPINOZA VILLAR, R.; MARTINEZ, J. M.; LE TEXIER, M.; GUOYT, J. L.; FRAIZY, P.; MENESES, P. R.; OLIVEIRA, E. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 44, p. 45–54, 2013. DOI: 10.1016/j.jsames.2012.11.006
12. FILIZOLA, N. *Transfert sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens*. Tese (Doutorado em Hidrologia e Geologia) - U.F.R. Sciences de la Vie et de la Terre, Université Toulouse III Paul Sabatier. 2003. 283P.
13. FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon / L'utilisation des techniques Doppler pour la détermination du transport solide de l'Amazonie. *Hydrological Sciences Journal*, v. 49, n. 1, p. 143–153, 2004. DOI: 10.1623/hysj.49.1.143.53990
14. FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 41, n. 4, p. 566–576, 2011. DOI: 10.25249/0375-7536.2011414566576
15. GUYOT, J. L.; QUINTANILLA, J.; CORTÉS, J.; FILIZOLA, N. Les flux de matières dissoutes et particulaires des Andes de Bolivie vers le río Madeira en Amazonie Brésilienne. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, v. 24, n. 3, p. 415–423, 1995. DOI: 10.3406/bifea.1995.1192
16. GUYOT, J. L.; JOUANNEAU, J. M.; WASSON, J. G. Characterisation of river bed and suspended sediments in the Rio Madeira drainage basin (Bolivian Amazonia). *Journal of South American Earth Sciences*, v. 12, n. 4, p. 401–410, 1999. DOI: 10.1016/S0895-9811(99)00030-9

17. HYBAM. **Observation Service SO HYBAM.**, 2024. Disponível em: <SO-HyBam – Service d'observation des ressources en eaux du bassin de l'Amazonie (obs-mip.fr)>. Acesso em: 10 jan. 2023
18. JING, T.; ZENG, Y. FANG, N.; DAI, W.; SHI, Z. A Review of Suspended Sediment Hysteresis. **Water Resources Research**, v. 61, n. 1, p. 1–24, 2025. DOI: 10.1029/2024WR037216
19. LATRUBESSE, E. M. Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers. **Geomorphology**, v. 101, n. 1–2, p. 130–145, 2008. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.05.035
20. LATRUBESSE, E. M.; ARIMA, E. Y.; DUNNE, T.; PARK, E.; BAKER, V. R.; D'HORTA, F.; WIGHT, C.; WITMANN, F.; ZUANON, J.; BAKER, P. A.; RIBAS, C. C.; NORGAARD, R. B.; FILIZOLA JUNIOR, N. P.; ANSAR, A.; FLYVBJERG, B.; STEVAUX, J. C. Damming the rivers of the Amazon basin. **Nature**, v. 546, n. 7658, p. 363–369, 2017. DOI: 10.1038/nature22333
21. LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C.; SINHA, R. Grandes sistemas fluviais tropicais: uma visão geral. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, n. 1, 2005. DOI: 10.20502/rbg.v6i1.35
22. LI, J.; WANG, G.; SONG, C.; SUN, S. MA, J.; WANG, Y.; GUO, L.; LI, D. Recent intensified erosion and massive sediment deposition in Tibetan Plateau rivers. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 722, 2024. DOI: 10.1038/s41467-024-44982-0
23. LOPES, I. M. O.; MAGALHÃES, M. T. Q. Hidrovia do Rio Madeira como indutor de desenvolvimento microrregional das comunidades tradicionais do Baixo Madeira em Porto Velho. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, n. 22, p. 143–158, 2018. DOI: 10.18830/issn.1679-0944.n22.2018.10
24. PARSONS, D. R.; JACKSON, P. R.; CZUBA, J. A.; ENGEL, F. L.; RHOADS, B. L.; OBERG, K. A.; BEST, J. L.; MUELLER, D. S.; JOHNSON, K. K.; RILEY, J. D. Velocity Mapping Toolbox (VMT): a processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 11, p. 1244–1260, 2013. DOI: 10.1002/esp.3367
25. QUEIROZ, M. S.; MARINHO, R. R.; CARVALHO, J. A. L.; SILVA, C. F. The geomorphological landscape of the Mariuá Archipelago: An anabranching megacomplex system in the Negro River, Amazon Basin (Brazil). **Geomorphology**, v. 490, p. 1–17, 2025. DOI: 10.1016/j.geomorph.2025.110023
26. RIVERA, I. A.; ARMIJOS, E.; ESPINOZA-VILLAR, R.; ESPINOZA, J.; MOLINA-CARPIO, J.; AYALA, J.; GUTIERREZ-CORI, O.; MARTINEZ, J. M.; FILIZOLA, N. Decline of Fine Suspended Sediments in the Madeira River Basin (2003–2017). **Water**, v. 11, n. 3, p. 1–14, 2019. DOI: 10.3390/w11030514
27. RIVERA, I. A.; MOLINA-CARPIO, J.; ESPINOZA, J. C.; GUTIERREZ-CORI, O.; CERÓN, W. L.; FRAPPART, F.; ARMIJOS, E.; ESPINOZA-VILLAR, R.; AYALA, J. M.; FILIZOLA, N. P. The Role of the Rainfall Variability in the Decline of the Surface Suspended Sediment in the Upper Madeira Basin (2003–2017). **Frontiers in Water**, v. 3, p. 1–14, 2021. DOI: 10.3389/frwa.2021.738527
28. SANTOS, D. R. A.; MARTINEZ, J. M.; OLIVETTI, D.; ZUMAK, A.; GUIMARÃES, D. ANICETO, K.; SEVERO, E.; FERREIRA, O.; HARMEL, T.; CORDEIRO, M.; FILIZOLA, N. SELL, B.; FERNANDES, D.; SOUTO, C.; ROIG, H. Sentinel-2 MSI image time series reveal hydrological and geomorphological control of the sedimentation processes in an Amazonian hydropower dam. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 128, p. 1–13, 2024. DOI: 10.1016/j.jag.2024.103786
29. SEVERO, E. B.; MARINHO, R. R.; QUEIROZ, M. S.; APOMA, I. ANÁLISE MORFOMÉTRICA DAS BACIAS DOS RIOS BENI E MAMORÉ, BACIA DO RIO MADEIRA. **Margarida Penteadó Revista de Geomorfologia**, v. 1, n. 2, p. 1–12, 2024.
30. SEVERO, E. B.; MARINHO, R. R. ANÁLISE DAS MUDANÇAS NA COBERTURA DO SOLO E NA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DOS RIOS BENI E MAMORÉ. In: ALEIXO, Natacha Cíntia Regina; DINIZ, Raphael Fernando; VIEIRA, Antonio Fábio Sabbá Guimarães (Eds.). **A GEOGRAFIA AMAZÔNICA EM MÚLTIPLAS ESCALAS**. São Paulo; Manaus: Alexa Cultural; Edua, 2023. v. 3 p. 17–34.
31. SIOLI, H. The Amazon and its main affluents: Hydrography, morphology of the river courses, and river types. In: SIOLI, Harald (Ed.). **The Amazon**. Monographiae Biologicae. Dordrecht: Springer Netherlands, 1984. v. 56 p. 127–165.
32. SOUZA FILHO, P. W. M.; QUADROS, M. L. E. S.; SCANDOLARA, J. E.; SILVA FILHO, E. P.; REIS, M. R. COMPARTIMENTAÇÃO MORFOESTRUTURAL E NEOTECTÔNICA DO SISTEMA FLUVIAL GUAPORÉ-MAMORÉ-ALTO MADEIRA, RONDÔNIA-BRASIL. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 4, p. 469–476, 1999. DOI: 10.25249/0375-7536.1999294469476
33. SOUZA, V. A. S.; ROTUNNO FILHO, O. C.; RODRIGUEZ, D. A.; MOREIRA, D. M.; RUDKE, A. P.; ANDRADE, C. D. Dinâmica da conversão de floresta e tendências climáticas na bacia do rio Madeira. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 4, p. 2007–2034, 2022. DOI: 10.5902/1980509865211
34. TIMPE, K.; KAPLAN, D. The changing hydrology of a dammed Amazon. **Science Advances**, v. 3, n. 11, p. 1–13, 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1700611

35. VANONI, V. A. **Sedimentation engineering**. 2 ed. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2006.
36. VAUCHEL, P.; SANTINI, W.; GUOYT, 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.; OLIVEIRA, E.; FILIZOLA, N.; MOLINA-CARPIO, J.; RONCHAIL, J. A reassessment of the suspended sediment load in the Madeira River basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, based on 10 years of data from the HYBAM monitoring programme. **Journal of Hydrology**, v. 553, p. 35–48, 2017. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.07.018



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.