

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS - UFAM  
INSTITUTO DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS – IFCHS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA - DEGEOG  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**DINÂMICA HIDROSEDIMENTAR NA CONFLUÊNCIA DOS RIOS  
BENI E MAMORÉ**

EDNALDO BRAS SEVERO

MANAUS

2024

**EDNALDO BRAS SEVERO**

**DINÂMICA HIDROSEDIMENTAR NA CONFLUÊNCIA DOS RIOS  
BENI E MAMORÉ**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Amazonas – UFAM como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Geografia, linha de pesquisa Domínios da Natureza na Amazônia.

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Rogério Ribeiro Marinho

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. Jean-Michel Martinez

MANAUS

2024

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Severo, Ednaldo Bras

S498d Dinâmica hidrossedimentar na confluência dos rios Beni e Mamoré / Ednaldo Bras Severo . 2024

105 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Rogério Ribeiro Marinho

Coorientador: Jean-Michel Martinez

Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Geomorfologia Fluvial. 2. Sedimento Suspenso. 3. Rio Madeira.  
4. PlanetScope. I. Marinho, Rogério Ribeiro. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

**EDNALDO BRAS SEVERO**

**DINÂMICA HIDROSEDIMENTAR NA CONFLUÊNCIA DOS RIOS BENI E MAMORÉ**

**BANCA EXAMINADORA**

---

Presidente: Prof. Dr. Rogério Ribeiro Marinho  
(Universidade Federal do Amazonas – UFAM)

---

1º Avaliador: Prof. Dr. Naziano Pantoja Filizola Júnior  
(Universidade Federal do Amazonas – UFAM)

---

2º Avaliador: Prof. Dr. João Cândido André da Silva Neto  
(Universidade Federal do Amazonas – UFAM)

**Manaus, 2024**

À minha mãe, Maria Bras

Ao meu pai, Edinaldo Severo

Aos meus irmãos, Emerson, Ouriel, Leila e Thiago Elias

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha amada família, meu bem maior, em especial à minha mãe, Maria Antônia Bras, meu pai, Edinaldo Severo, meus irmãos, Emerson, Ouriel, Leila e o caçula Thiago Elias. Essa conquista é nossa!

Ao meu orientador, Rogério Ribeiro Marinho, pela sua disponibilidade, confiança, incentivo em todas as dificuldades e seus valiosos ensinamentos.

Ao meu coorientador, Jean-Michel Martinez, pelo apoio e ensinamentos durante toda a pesquisa.

Não posso deixar de expressar minha gratidão ao professor e amigo Naziano Pantoja Filizola Júnior. Desde a graduação até os projetos de iniciação científica e extensão que compartilhamos, seu apoio e confiança foram inestimáveis. Seus conselhos e ensinamentos foram essenciais para minha formação acadêmica.

Um agradecimento especial ao meu grande amigo e irmão, Felipe Galvão, por sua compreensão, apoio nos momentos difíceis e incentivo constante, mesmo durante minhas ausências durante as viagens a campo.

Ao meu grande amigo Cleyson Figueiredo (*In memoriam*), por ter feito parte desde o começo da jornada no ensino médio até os dias atuais.

Agradeço imensamente ao meu querido amigo Carlos Alberto pelo incentivo e apoio desde o ensino médio, pela compreensão durante minha ausência durante a graduação e no mestrado, e por demonstrar ser um verdadeiro amigo em todos os momentos.

À Dayana Esther Nascimento, minha companheira sempre presente no apoio e nos momentos mais difíceis desta caminhada, por toda compreensão em minha ausência e companheirismo ao longo desses anos.

Aos queridos amigos que fiz na UFAM, Carlos Eduardo (Kadu), Fernando Monteiro, Bruno Sarkis, Fredson Bernardino, Marcos Almir e Thiago Neto, pelo companheirismo, ajuda e incentivo desde os tempos da graduação até o momento desta jornada.

Agradeço a Karol Souza e Priscila Negreiros pelo apoio, incentivo e valiosos conselhos que foram fundamentais ao longo desta jornada.

Agradeço também aos queridos amigos que conheci durante o mestrado, em especial a Isabela Apoema e Matheus Queiroz.

Aos amigos do laboratório Hidrogeo, em especial a Catarina França, Leandro Félix e Diogo Ribeiro, pela ajuda e ensinamento durante toda essa caminhada.

Um agradecimento especial aos meus grandes amigos do “Malários” Lucas Brait, João Paulo, Yasmin, Kézia, Darlysson, Yara, Jullyete, Rafael, Shayenne, Dayana, Fábio, John, Hellen, Albert e Alessandro, pela compreensão na ausência e apoio durante a escrita da dissertação.

Aos meus queridos amigos de longa data nesta vida, Alessandro, Siellen, Gerlyane, Neyli e Neydson, por toda compreensão em minha ausência e apoio incondicional.

Aos amigos e colegas do grupo de pesquisa H2A, em especial a Vanessa Cunha, Iris Bandeira e Eduardo Noriega, pelos ensinamentos durante a trajetória acadêmica.

Agradeço às grandes amigas que fiz nas Geociências, Thayná Rosario (Geologuita) e Anna Beatriz “Kenobi”, por tornarem essa etapa da minha vida mais leve e divertida, além do apoio e incentivo ao longo desta jornada. Que a força esteja com vocês, sempre!

Aos membros e amigas do Laboratório de Geoquímica, professora Keila Aniceto, Leylane Lima e Ruth.

Aos amigos que fiz na CPRM/SGB, em especial a Daniel Garcia, Guilherme Costa, Carlos Da Matta e André Martinelli. O apoio e ensinamentos sobre o ADCP foram importantes na minha formação.

Aos colaboradores do Observatório HYBAM na Bolívia, que gentilmente disponibilizaram importantes dados hidrológicos que foram utilizados neste trabalho.

Agradeço à FAPEAM – Fundação de Amparo à Pesquisa no Amazonas, pelo apoio à pesquisa através da bolsa que me permitiu conduzir este trabalho com mais tranquilidade.

Aos colegas do Projeto SPECTROSED, que contribuíram com sua experiência e dedicação à pesquisa (André Zumak, David, Diego, Diogo, Henrique, Osmair, Fábio, Tayline, Henrique Roig).

À Energia Sustentável do Brasil S.A. (ESBR) que financiou a pesquisa do Projeto SPECTROSED e ofereceu uma bolsa que me permitiu desenvolver o trabalho.

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram indiretamente para este trabalho. Muito obrigado a todos!

“Por você ser preto,  
você tem que ser duas vezes melhor”

Racionais MC's

## RESUMO

Os rios Beni e Mamoré, localizados na fronteira entre Brasil e Bolívia, são os principais formadores do rio Madeira. Juntos, esses rios contribuem com um grande volume de água, apresentando uma descarga líquida média anual de 9.578 m<sup>3</sup>/s e 7.847 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, e aportam aproximadamente 282 milhões de toneladas de material em suspensão ao rio Madeira anualmente. Esta pesquisa teve como objetivo analisar a variabilidade hidrossedimentológica na região de confluência entre os rios Beni e Mamoré. Para alcançar esse objetivo, foram combinadas medições detalhadas in situ com análises de dados por sensoriamento remoto. Os parâmetros da dinâmica fluvial incluíram medições da descarga líquida (Q), descarga sólida (Qs), velocidade de fluxo, e concentração do material em suspensão (MES) em superfície e profundidade, utilizando informações das estações de Cachuela Esperanza, Guayaramerin e Porto Velho, provenientes do Observatório HYBAM. Adicionalmente, foram empregados dados de sensoriamento remoto para análise da dinâmica de uso e cobertura do solo (Mapbiomas), precipitação (CHIRPS) e concentração do material em suspensão (MES) obtidos por imagens de satélites PlanetScope. A descarga sólida anual foi calculada com base nos dados do Observatório HYBAM e nas medições realizadas no ano hidrológico de 2021/2022. Os resultados indicam que, na bacia dos rios Beni e Mamoré, ocorreram intensas mudanças no uso e cobertura do solo entre as décadas de 1990 e 2020, com grande expansão das áreas destinadas à agricultura, infraestrutura urbana e mineração. Apesar dessas mudanças intensas, não foi observada uma tendência clara de aumento ou redução da precipitação ao longo do período analisado nessas bacias. Em relação à descarga de fluxo sólido, constatou-se uma redução de 15% no material suspenso proveniente dos rios Beni e Mamoré entre a confluência desses rios e o reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Jirau, o que corresponde a cerca de 40 milhões de toneladas por ano em um trecho de 400 km, com menor redução registrada nos 200 km a jusante da confluência. A dinâmica hidrossedimentar nesta região apresenta uma marcante zona de deposição no rio Madeira, a montante da UHE de Jirau, onde aproximadamente 15% do material proveniente dos rios Beni e Mamoré é retido. Observou-se que a região mais próxima à confluência apresenta a maior área de deposição, embora não tenha sido encontrada uma relação direta com a redução da velocidade média do fluxo nesse trecho do rio. As estimativas da concentração do MES utilizando imagens PlanetScope apresentaram grandes divergências em relação aos valores observados em campo nos rios Beni, Mamoré e Madeira. Este estudo da dinâmica hidrossedimentar na confluência dos rios Beni e Mamoré fornece dados relevantes para melhor avaliação dos impactos da UHE de Jirau no transporte de sedimentos no rio Madeira, além de discutir a relação entre a dinâmica hidrossedimentar e eventos climáticos extremos na região. A dissertação faz parte do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Energia Sustentável do Brasil (ESBR), alinhada às orientações da ANEEL. O projeto de pesquisa "Espectrorradiometria para Monitoramento de Sedimentos em Reservatórios" (SPECTROSED), iniciado em 2020, conduziu campanhas de medição de parâmetros como concentração de material em suspensão, granulometria, mineralogia, vazão e radiometria na área a montante da Usina Hidrelétrica de Jirau, no rio Madeira. O projeto desenvolveu estações experimentais automatizadas para o monitoramento contínuo de sedimentos, financiado pela Fundação Universidade de Brasília (FUB), Fundação de Apoio à Pesquisa (FUNAPE) e Instituto João Neóricio (FARO).

**Palavras-Chave:** Geomorfologia fluvial; Sedimento Suspenso; Rio Madeira; PlanetScope.

## ABSTRACT

The Beni and Mamoré rivers, located on the border between Brazil and Bolivia, are the main tributaries of the Madeira River. Together, these rivers contribute a significant volume of water, with an average annual discharge of 9,578 m<sup>3</sup>/s and 7,847 m<sup>3</sup>/s, respectively, and they supply approximately 282 million tons of suspended sediments to the Madeira River annually. This research aimed to analyze the hydro-sedimentological variability in the confluence region of the Beni and Mamoré rivers. To achieve this objective, in situ measurements were combined with remote sensing data analyses. The fluvial dynamics parameters included measurements of water discharge (Q), solid discharge (Qs), flow velocity, and suspended sediment concentration (SSC) at the surface and depth, using data from the Cachuela Esperanza, Guayaramerin, and Porto Velho stations, provided by the HYBAM Observatory. Additionally, remote sensing data were employed to analyze land use and cover changes (Mapbiomas), precipitation (CHIRPS), and suspended sediment concentration obtained from PlanetScope satellites. The annual solid discharge was calculated based on data from the HYBAM Observatory and in situ measurements collected during the 2021/2022 hydrological year. The results indicate that significant changes in land use and cover occurred in the Beni and Mamoré river basins in Bolivia between the 1990s and 2020s, with a notable expansion of areas dedicated to agriculture, urban infrastructure, and mining. Despite these intense changes in land use and land cover, no clear trend of increase or decrease in precipitation was observed over the analyzed period in these basins. Regarding solid discharge, was found a reduction of 15% in suspended sediment from the Beni and Mamoré rivers between their confluence and the Jirau Hydroelectric Power Plant (HPP) reservoir on the Madeira River, corresponding to approximately 40 million tons per year over a 400 km stretch, with a small reduction observed in the 200 km downstream of the confluence. The hydro-sedimentological dynamics in this region exhibit a significant deposition zone in the Madeira River, upstream of the Jirau HPP, where approximately 15% of the suspended material from the Beni and Mamoré rivers is trapped. It was observed that the region closest to the confluence has the largest deposition area, although no direct relationship with the reduction in average flow velocity in that section of the river was found. The SSC estimates using PlanetScope images showed significant discrepancies compared to the in situ data in the Beni, Mamoré, and Madeira rivers. This study on the hydro-sedimentological dynamics at the confluence of the Beni and Mamoré rivers provides relevant data for a better assessment of the impacts of the Jirau HPP on sediment transport in the Madeira River and discusses the relationship between hydro-sedimentological dynamics and extreme climatic events in the region. This dissertation is part of the Research and Development Program (R&D) of Energia Sustentável do Brasil (ESBR), aligned with ANEEL's guidelines. The research project "Spectroradiometry" for Sediment Monitoring in Reservoirs" (SPECTROSED), started in 2020, conducted campaigns to measure parameters such as suspended sediment concentration, granulometry, mineralogy, flow, and radiometry in the area upstream of the Jirau Hydroelectric Power Plant on the Madeira River. The project developed an automated experimental station for continuous sediment monitoring, funded by the University of Brasília Foundation (FUB), the Research Support Foundation (FUNAPE), and the João Neóricio Institute (FARO).

**Keywords:** Fluvial Geomorphology; Suspended Sediment; Madeira River; PlanetScope

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Índice de Vulnerabilidade Ambiental de Barragens (DEVI) - Fonte: Adaptado de Latrubesse, et. al., 2017. ....	18
Figura 2: Trajetória da luz entre fonte (sol), alvo (corpo d'água) e sensor orbital. (1) processo de espalhamento atmosférico, (2) processo de reflexão especular da luz difusa do céu, (3) processo de reflexão especular da luz solar direta, (4) radiação emergente da coluna d'água, (5) processo de espalhamento e absorção da luz por fitoplâncton, (6) processo de espalhamento da luz por sedimentos, (7) processo de absorção da luz por matéria orgânica dissolvida. Fonte: Barbosa et al. (2019).....	32
Figura 3: Região de confluência entre os rios Beni e Mamoré, formadores do rio Madeira. ....	37
Figura 4: Regime de precipitação das bacias dos Rios Beni e Mamoré. Elaboração: Ednaldo Severo, 2023. ....	40
Figura 5: Regimes mensais de vazões. Elaboração: Ednaldo Severo, 2023. ....	41
Figura 6: Mapa hipsométrico das bacias dos rios Beni e Mamoré. Elaboração: Ednaldo Severo, 2023. ....	42
Figura 7: Fluxograma das etapas de processamento e análise de dados de MES, Q, Qs e velocidade. Adaptado de: Marinho et al, 2021 Org.: Ednaldo Severo, 2023 .....	46
Figura 8: Coleta de amostras de CSS no rio Madeira. Autor: André Zumak Ano: Dez/2021. ....	48
Figura 9: Etapas dos processamentos de amostras para determinação da concentração do MES. Autor: Ednaldo Severo Ano: 2022. ....	49
Figura 10: a) GNSS Trimble R4 e ADCP modelo Rio Grande, da RDI Instruments, com frequência de 600 kHz. b) Medição de Vazão. c) Embarcação usada durante os campos. d) Interface do Win River . Fonte: André Zumak, 2021. ....	50
Figura 11: Fluxograma das etapas de processamento e análise dos dados Mapbiomas, HYBAM e CHIRPS Org.: Ednaldo Severo, 2023. ....	51
Figura 12: Mudanças no uso e cobertura nas bacias dos rios Beni e Mamoré entre 1990-2020 Org.: Ednaldo Severo, 2023. ....	57
Figura 13: Transições das classes de uso e cobertura do solo na área de estudo. A) Bacia do Rio Beni; B) Bacia do Rio Mamoré. Na coluna da esquerda, os valores de porcentagem são referentes às classes de Recursos Hídricos e Uso Antrópico, e na direita, para Formação Vegetal. Org.: Ednaldo Severo, 2022.....	60
Figura 14: Precipitação média acumulada anual para o período de 1981 a 2020. <b>Org.:</b> Ednaldo Severo, 2023.....	61
Figura 15: Variabilidade interanual dos valores médios de vazão dos rios Beni, Mamoré e Madeira nas estações de Cachuela Esperanza, Guayaramerin e Porto Velho no período de 1984 a 2022. Os dados utilizados representam médias anuais de vazão e foram obtidos a partir do projeto Hybam. Fonte: Hybam, 2023.....	65
Figura 16: Regimes mensais de Q (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ). Fonte: HYBAM, 2023.....	66

Figura 17: Regime mensal da concentração de material em suspensão. O período de dados abrange 1984 a 2018 para Cachuela Esperanza e 1995 a 2023 para Guayaramerin e Porto Velho. Fonte: HYBAM, 2023.....	67
Figura 18: Material em suspensão versus precipitação nas bacias dos rios Mamoré (Guayaramerin) e Beni (Cachuela Esperanza). .....	69
Figura 19: Dados de material em suspensão versus descarga de água nos rios Beni (Cachuela Esperanza) e Mamoré (Guayaramerin). .....	70
Figura 20: Material em suspensão versus descarga de água no rio Madeira em Porto Velho. ....	71
Figura 21: Material em suspensão versus descarga líquida nos rios Beni (BEN), Mamoré (MAM) e Madeira (TAM e EST) no período de março de 2021 a abril de 2022.....	73
Figura 22: Variabilidade da concentração do material em suspensão (MES) em função da profundidade dos rios Beni (BEN), Mamoré (MAM) e Madeira (TAM e EST) no mês de novembro de 2021. ....	75
Figura 23: Perfis transversais dos rios Beni, Mamoré e Madeira com a variação do retroespalhamento em profundidade em novembro de 2021. LB: margem esquerda. RB: margem direita. Valores em decibéis (dB). .....	77
Figura 24: Variabilidade da concentração do material em suspensão (MES) em função da profundidade dos rios Beni (BEN), Mamoré (MAM) e Madeira (TAM e EST) no mês de abril de 2022. ....	79
Figura 25: Perfis transversais dos rios Beni (BEN), Mamoré (MAM) e Madeira (TAM e EST) com a variação do retroespalhamento em profundidade em abril de 2022. A localização dos perfis pode ser encontrada na Fig. 3. LB = margem esquerda. RB: Margem Direita.....	81
Figura 26: Vetores médios de velocidade em profundidade e direção do fluxo ( $\text{cm.s}^{-1}$ ) para as seções transversais nos rios Beni e Mamoré (C) e Madeira (A e B) na área de estudo em novembro de 2021. ....	84
Figura 27: Vetores médios de velocidade em profundidade e direção do fluxo ( $\text{cm. s}^{-1}$ ) para as seções transversais nos rios Beni e Mamoré (A) e Madeira (B e C) na área de estudo em abril de 2022. ....	85
Figura 28:(a) Perfil longitudinal (montante-jusante) da MES sobre os rios Beni e Madeira. (b) Perfil longitudinal da MES entre os rios Mamoré e Madeira. ....	90
Figura 29: Variabilidade espacial e temporal da concentração de MES nos meses de março, abril, agosto e outubro de 2021 nos rios Beni, Mamoré e Madeira. ....	91
Figura 30: Variabilidade espacial e temporal da concentração de Material em Suspensão (MES) nos meses de março, abril, agosto e outubro de 2021 no Rio Madeira, na seção da estação localizada a 2 km a montante da barragem. ....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do conjunto de satélites PlanetScope. ....	35
Tabela 2: Parâmetros Morfométricos das bacias dos rios Beni e Mamoré .....	44
Tabela 3: Dados Cadastrais .....	47
Tabela 4: Dados cadastrais das estações HYBAM. ....	53
Tabela 5: Datas das imagens, período hidrológico características dos satélites. ....	53
Tabela 6: Distribuição das classes de cobertura do solo (1990-2020) nas bacias dos rios Beni e Mamoré. Valores em km <sup>2</sup> . ....	56
Tabela 7: Variação espacial e temporal nas Sub-bacias do rio Madeira analisadas.....	58
Tabela 8 Precipitação média mensal nas Sub-bacias do rio Madeira analisadas.....	62
Tabela 9: Comparação da redução entre os dados Mapbiomas e Hybam .....	64
Tabela 10: Média da descarga total de sedimento em suspensão (QS), e variação observada da soma dos rios Beni e Mamoré para jusante em Porto Velho ( $\Delta$ ). ....	72
Tabela 11: Características das quatro seções analisadas no estudo. Valores que Qs observados em superfície .....	82
Tabela 12: Taxas de denudação na planície de inundação dos rios Beni, Mamoré e Madeira. ....	83
Tabela 13: Valores da concentração média do material em suspensão (MES) estimada por sensoriamento remoto e observada em campo. Os valores estão expressos em mg. L <sup>-1</sup> .....	87
Tabela 14: Diferença percentual entre o estimado por sensoriamento remoto e observado em campo para os rios Beni, Mamoré e Madeira. ....	88
Tabela 15: Concentração média de Material em Suspensão (MES) e diferença percentual entre os valores observados e estimados por sensoriamento remoto na seção Estação do Rio Madeira. Os valores estão expressos em mg·L <sup>-1</sup> e em porcentagem. ....	92

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	19
1.2 Justificativa	20
1.3 PROJETO SPECTROSED	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 Geomorfologia fluvial	22
2.2 Hidrologia	27
2.3 Sensoriamento remoto	30
3. ÁREA DE ESTUDO	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS	46
4.1 Dados primários	47
4.1.1 Coleta e processamento do material em suspensão (MES)	47
4.1.2 Medição ADCP	49
4.2 Dados secundários	50
4.2.1 MapBiomass	52
4.2.2 CHIRPS	52
4.2.3 Observatório HYBAM	52
4.3 Processamento e análise dos dados	53
5. RESULTADOS	56
5.1 Análise das mudanças no uso e cobertura do solo na bacia dos rios Beni e Mamoré	56
5.2 Análise da descarga líquida e sólida na confluência dos rios Beni e Mamoré	66
5.3 Avaliação do uso de imagens PlanetScope para monitoramento de material em suspensão nos rios Beni e Mamoré	87
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	95

7.	CRONOGRAMA	97
8.	REFERÊNCIAS	98
9.	ANEXO I	105

## 1. INTRODUÇÃO

Na Amazônia os rios desempenham um papel fundamental, seu uso vai além de fornecer abastecimento para consumo ou irrigação, possui um sentido vinculado as atividades comerciais além de um delimitador natural de fronteiras (NOGUEIRA e OLIVEIRA NETO, 2022). O rio não é apenas uma fonte de água, mas uma hidrovia crucial, conectando comunidades remotas e facilitando o comércio entre diferentes regiões da Amazônia.

Os rios Beni e Mamoré, principais formadores do rio Madeira, nascem na região andina da Bolívia, com elevadas produções de sedimentos. Estes rios aportam juntos cerca de  $430 \times 10^6$  ton.ano<sup>-1</sup> de material transportado em suspensão e de fundo (VAUCHEL et al., 2017). O rio Beni desempenha um papel fundamental no fornecimento de sedimentos e água, enquanto o rio Mamoré possui área de drenagem maior, porém menor transporte de sedimentos em relação ao rio Beni.

Ambos os rios são responsáveis pela maior parte do aporte hídrico do rio Madeira, com descarga líquida média anual de  $9578 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  e  $7847 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  próximo a sua foz respectivamente. Os rios Beni e Mamoré são classificados como altamente irregulares do ponto de vista da descarga sólida, ou seja, possuem grande amplitude entre o período de maior e menor aporte de sedimentos, com variações entre 50-1000 vezes o material transportado, e irregular em sua descarga líquida com variação entre 10-50 vezes (FILIZOLA; GUYOT, 2011). Essa sazonalidade e variações no canal fluvial impactam as comunidades ribeirinhas de modos distintos, que dependem diretamente do rio para sua subsistência. Essas mudanças são marcadas por períodos de cheia e vazante, que afetam várias dimensões da vida cotidiana dos ribeirinhos.

A bacia amazônica concentra três dos dez maiores rios do mundo em termos de vazão. Dentre eles, os rios Negro, Madeira e Japurá são tributários do canal principal e se equiparam, em termos de vazão, a outros grandes rios do planeta, como o rio Congo na África, o Orinoco na América do Sul e o Brahmaputra na Ásia (LATRUBESSE; STEVAUX; SINHA, 2005). No contexto dos rios Beni e Mamoré, o volume de água e os sedimentos são importantes aspectos que se destacam na hidrovia do rio Madeira em território brasileiro, uma das mais importantes do país. O rio Madeira é o segundo maior contribuinte em volume de água e o principal tributário de sedimentos (aproximadamente 50%) para o rio Amazonas (RIVERA et al., 2019, 2021; VAUCHEL et al., 2017).

Seu curso é completamente navegável, o rio Madeira desempenha um papel crucial na integração comercial entre as regiões Norte e Centro-Oeste, oferecendo uma alternativa à BR-319, que conecta o estado de Rondônia ao estado do Amazonas e contribui significativamente

para a economia regional. Além disso, a hidrovia é essencial para o escoamento da produção de grãos, principalmente soja e milho, conforme indicado pela Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2015). A hidrovia do rio Madeira não apenas desempenha um papel vital nas políticas de mobilidade do município de Porto Velho, mas também é fundamental para o desenvolvimento econômico regional (LOPES; MAGALHÃES, 2018).

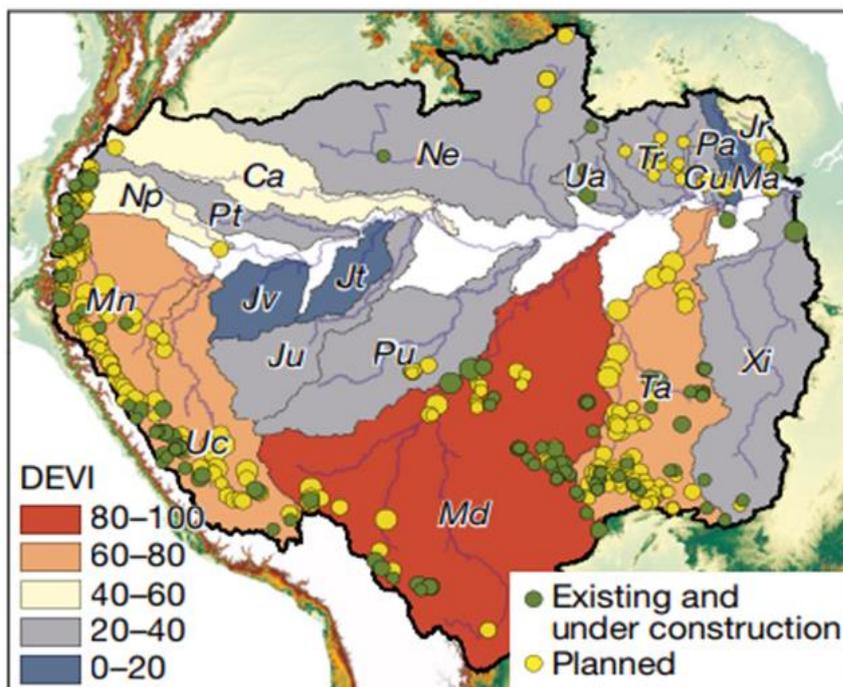
No entanto, a construção de grandes obras de infraestrutura como hidrelétricas e a intensificação no uso do solo, principalmente na bacia do rio Mamoré na Bolívia, têm resultado em uma série de questões, cujos impactos ainda precisam ser melhor compreendidos. Tais atividades incluem a redução das áreas de coberturas naturais enquanto as áreas destinadas a agricultura, infraestrutura urbana e mineração avançam rapidamente.

Essas atividades podem causar mudanças no comportamento de um canal fluvial, intensificando ou reduzindo processos como erosão e deposição do sedimento transportado. Rivera et al. (2019, 2021), observaram uma redução no transporte de sedimento na parte alta da bacia do rio Madeira, utilizando dados da estação de Cachuela Esperanza no rio Beni e Guayaramerin no rio Mamoré, além de Porto Velho no rio Madeira, a jusante da Usina Hidroelétrica de Jirau e Santo Antônio.

Espinoza-Villar et al. (2013) observaram redução no transporte de sedimentos suspensos entre as estações de Porto Velho e Fazenda Vista Alegre, no médio e baixo curso do rio Madeira. Por outro lado, Latrubesse et al. (2017) destacam que as barragens de Santo Antônio e Jirau, construídas no rio Madeira, retêm cerca de 97% da carga de areia, alterando significativamente a dinâmica sedimentar. Entre 2001 e 2015, essas barragens reduziram em aproximadamente 20% a concentração média de sedimentos suspensos a jusante da barragem de Santo Antônio, impactando os ecossistemas aquáticos e as planícies de inundação do rio Madeira.

Neste sentido, o soergimento de uma barragem implica em alterações na paisagem do rio, com processos de deposição a montante do barramento e resulta na redução da velocidade da corrente, afetando a capacidade de transporte de sedimentos pelo canal fluvial (BERNINI et al., 2016; COELHO, 2008). Os impactos das barragens na geomorfologia a jusante envolvem diversos processos, como a possibilidade de influenciar a mudança no regime hidrológico, a redução da carga de sedimentos, a modificação na morfologia do canal, a ocorrência de erosão ou deposição excessiva de sedimentos, e podem provocar alterações na qualidade da água e a perda de habitats aquáticos (BRANDT, 2000).

A intensidade desses efeitos é variável e depende do tipo de barragem, das dimensões do reservatório, da localização geográfica e das características específicas do rio e da bacia hidrográfica. Na bacia dos rios Beni e Mamoré, na Bolívia, existem diversas barragens planejadas para a construção de hidroelétricas (Figura 1), conforme destacam Latrubesse et al. (2017). Esses autores desenvolveram ainda uma metodologia para avaliar o índice de vulnerabilidade ambiental (Dam Environmental Vulnerability Index – DEVI) em bacias hidrográficas, considerando os impactos potenciais ocasionados pelo barramento de um canal fluvial.



**Figura 1:** Índice de Vulnerabilidade Ambiental de Barragens (DEVI) **Fonte:** Latrubesse, et. al., 2017.

O DEVI utiliza três índices para classificar o grau de vulnerabilidade: o Índice de Integridade da Bacia (Basin Integrity Index – BII) avalia a vulnerabilidade da bacia à mudança de uso da terra, erosão e poluição por escoamento, visando analisar sua integridade ecológica. O Índice de Dinâmica Fluvial (Fluvial Dynamics Index – FDI) mensura a influência dos fluxos de sedimentos, a atividade morfodinâmica e a amplitude do pulso de inundação para avaliar a dinâmica fluvial. Por sua vez, o Índice de Impacto de Barragem (Dam Impact Index – DII) quantifica o impacto das barragens no sistema fluvial e na biodiversidade, proporcionando uma visão abrangente das condições presentes e potenciais na bacia.

Esses índices se articulam para gerar o Dam Environmental Vulnerability Index (DEVI), fornecendo uma avaliação abrangente da vulnerabilidade ambiental de uma bacia hidrográfica. Ao combinar os três índices, o DEVI oferece uma visão holística da

vulnerabilidade ambiental. Ele considera não apenas os impactos diretos das barragens (DII), mas também como as mudanças no uso da terra (BII) e a dinâmica fluvial (FDI) podem interagir para afetar a saúde geral da bacia. Dessa forma, o DEVI se torna uma ferramenta valiosa para avaliar e comparar a vulnerabilidade de diferentes sub-bacias na Amazônia, auxiliando na tomada de decisões sobre o planejamento e a gestão de recursos hídricos. O DEVI varia de 0 a 100, sendo valores mais elevados indicativos de maior vulnerabilidade em uma bacia. No caso dos rios Beni e Mamoré, eles se encontram na faixa de maior vulnerabilidade, com valores entre 80 e 100.

Nesse contexto, o presente projeto de pesquisa teve como objetivo geral analisar a variabilidade hidrossedimentológica na região de confluência entre os rios Beni e Mamoré, utilizando dados coletados em campo e imagens de satélites da constelação PlanetScope. O estudo permitiu estimar o regime da concentração do material em suspensão (MES), a descarga líquida (Q) e descarga sólida (Qs) dos rios Beni, Mamoré e Madeira, além de propor um balanço hidrossedimentométrico na região de confluência entre os rios Beni e Mamoré, utilizando dados de campo e sensoriamento remoto. Adicionalmente, foram analisadas as mudanças ocorridas na paisagem ao longo das últimas décadas no uso e na cobertura do solo, bem como a variabilidade na precipitação na bacia dos rios Beni e Mamoré, que constituem o alto curso do rio Madeira.

## **1.1 Objetivos**

### **Geral:**

Analisar a variabilidade hidrossedimentológica na região de confluência entre os rios Beni e Mamoré.

### **Específicos:**

1. Analisar as mudanças no uso e cobertura do solo nas bacias dos Rios Beni e Mamoré.
2. Propor um balanço hidrossedimentométrico na região de confluências entre os rios Beni e Mamoré com uso de dados de campo.
3. Avaliar o uso de imagens dos satélites PlanetScope para o monitoramento do transporte de sedimentos na área de confluência dos Rios Beni e Mamoré.

## **1.2 Justificativa**

Os rios Beni e Mamoré, que formam o Rio Madeira na fronteira entre o Brasil e a Bolívia, possuem importância econômica e ambiental. Compreender a região de confluência entre esses cursos d'água é crucial devido à sua influência na geração de energia elétrica do país, por meio da Usina Hidrelétrica de Jirau, que tem uma capacidade instalada de 3750 MW, correspondendo a 3,7% da totalidade da energia hidrelétrica gerada no país (JIRAU ENERGIA, 2023). Essa infraestrutura contribui para a oferta de energia, beneficiando mais de 40 milhões de pessoas.

O fluxo de água e sedimentos provenientes dos rios Beni e Mamoré interfere no escoamento da produção de grãos de soja e milho pela hidrovia do rio Madeira no Brasil, a jusante da usina. No período de águas baixas, o nível d'água dificulta a navegação. Por outro lado, no período de águas altas, o rio emerge como alternativa à BR 319, levando em consideração as dificuldades enfrentadas nesse trecho durante o período de chuvas. No entanto, a variabilidade hidrológica e sedimentológica dessa região ainda é pouco conhecida após a construção das UHEs de Jirau e Santo Antônio. Estudar a hidrossedimentologia dos rios Beni e Mamoré envolve desafios significativos, como altos custos operacionais, complexidade logística e necessidade de segurança e pessoal especializado para realizar um monitoramento eficaz em áreas extensas do canal fluvial.

No entanto, a análise da variabilidade espacial e temporal da concentração do material suspenso e da descarga líquida e sólida dos rios Beni e Mamoré é essencial para entender a geomorfologia fluvial da região e identificar os possíveis impactos das atividades humanas no transporte de sedimentos, variações sazonais e suas tendências ao longo do tempo. Essas informações contribuem para uma visão abrangente da dinâmica hidrossedimentar, permitindo a identificação de padrões recorrentes ou alterações significativas.

Nesse contexto, a análise espacial e temporal das mudanças na paisagem se configura como uma importante ferramenta para fundamentar estratégias de monitoramento e avaliação de impactos ambientais na região fluvial dos rios Beni e Mamoré. Essa abordagem permite entender melhor a variabilidade hidrossedimentológica e a dinâmica do espaço produzido nessa área em estudo.

## **1.3 PROJETO SPECTROSED**

Esta dissertação de mestrado é parte do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Energia Sustentável do Brasil (ESBR), alinhada às orientações da Agência Nacional

de Energia Elétrica (ANEEL). O projeto de pesquisa denominado "Espectrorradiometria para Monitoramento de Sedimentos em Reservatórios" - SPECTROSED foi estabelecido em 2020 como parte desse programa, conduzindo campanhas de medição de parâmetros como Concentração de Material em Suspensão (MES), granulometria, mineralogia, vazão e radiometria desde abril de 2021, na área a montante da Usina Hidrelétrica de Jirau, no rio Madeira.

O escopo do projeto visou o desenvolvimento de duas estações experimentais espectrorradiométricas automatizadas, possibilitando o monitoramento contínuo e cálculo remoto da concentração do MES em rios e lagos, sem a necessidade de amostragem de águas ou imersão de sensores. Financiado pela Fundação Universidade de Brasília (FUB), Fundação de Apoio à Pesquisa (FUNAPE) e Instituto João Neóricio (FARO), o projeto teve uma previsão inicial de 24 meses, abrangendo dois ciclos hidrológicos nos anos de 2021 e 2022. Os resultados apresentados neste trabalho derivam de um conjunto de amostras de sedimentos e medições de vazão coletadas em 13 campanhas realizadas entre março de 2021 e abril de 2022.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Geomorfologia fluvial**

Um sistema fluvial é descrito por Charlton (2008) como um conjunto inter-relacionado de componentes, incluindo encostas, redes de canais e planícies de inundação, que são conectados por processos que movem água e sedimentos entre eles. Esses sistemas são abertos, trocando energia e materiais com o ambiente ao redor. Além disso, os sistemas fluviais são hierárquicos, contendo subsistemas integrados que funcionam dentro do sistema maior. A bacia hidrográfica é a unidade básica desse sistema, desempenhando um papel essencial na dinâmica e no funcionamento global dos sistemas fluviais.

Uma bacia hidrográfica, também conhecida como bacia de drenagem, é definida como uma área delimitada para a captação natural de água da precipitação, composta por superfícies vertentes e uma rede de cursos d'água que confluem até um ponto de saída, conhecido como exutório. Este sistema, conforme Pinto et al. (1976), é dinâmico e aberto, onde a entrada é o volume de água precipitado, e a saída é o volume de água escoado, que pode ocorrer através de fluxos superficiais acanalados, não acanalados ou subterrâneos, como descrito por Stevaux e Latrubesse (2017).

Esse sistema é dinâmico e sujeito a mudanças contínuas, exibindo diferentes tipos de canais, como retilíneos, meandantes e anabranching. Esses canais podem coexistir na mesma área ou estar setorizados, dependendo das variações temporais no regime de drenagem. A variedade e as mudanças dos canais fluviais refletem a complexidade dos ambientes fluviais, sendo fundamental para a compreensão da geomorfologia fluvial (CHARLTON, 2008).

Neste estudo, a bacia hidrográfica é conceituada como uma região delimitada e naturalmente destinada à captação da precipitação, manifestando-se por meio de um fluxo canalizado e superficial. Os limites dessa bacia são determinados pelos divisores de água, que são linhas que demarcam as áreas onde as águas se direcionam para destinos finais distintos. Conforme apontado por Cunha (2002), o sistema de uma bacia é complexo, envolvendo diversos níveis de organização.

Todo sistema de drenagem possui conectividade fluvial, caracterizada pelo uso dos rios como principais vetores de ligação para transporte e conexão dentro de um sistema fluvial. Isso envolve a transferência de energia e matéria, que moldam a paisagem fluvial e possibilitam o movimento de organismos, sedimentos e nutrientes (ZANANDREA et al., 2020). A regulação do fluxo é um dos principais efeitos das atividades antrópicas nos rios, a construção

de barragens e represas são um exemplo dessa alteração. Embora estruturas como barragens apresentem benefícios econômicos, como a geração de energia hidrelétrica e o abastecimento de água, também acarretam implicações para o sistema fluvial. Conforme Hinderer (2012), essas estruturas podem modificar a dinâmica natural dos rios, impactando a sedimentação, a conectividade ecológica e a hidrologia.

Desta forma, a geomorfologia fluvial é fundamental para entender essa conectividade, que está profundamente interligada com outras formas de conectividade, tanto ecológica quanto hidrológica. A configuração da paisagem influencia todos os vetores de transferência de sedimentos e água, e as alterações provocadas por barragens e outras intervenções humanas podem desencadear efeitos em cascata na conectividade fluvial e, conseqüentemente, nos ecossistemas associados (CHARLTON, 2008; HINDERER, 2012).

A produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica está diretamente ligada à dinâmica hidrológica, dependendo de fatores como precipitação, escoamento e interação água-solo. Atividades humanas, como desmatamento, urbanização e construção de barragens, podem reduzir a conectividade dos sedimentos (CHARLTON, 2008). A conectividade refere-se à capacidade dos sedimentos de se moverem pelo sistema fluvial, desde as áreas de produção até as áreas de deposição.

A redução dessa conectividade pode causar acúmulo de sedimentos em locais indesejados, degradação da qualidade da água e alteração de habitats aquáticos, comprometendo a capacidade natural dos rios de transportar sedimentos e nutrientes essenciais para os ecossistemas fluviais. O transporte de sedimentos exerce influência na dinâmica e na configuração de um canal fluvial específico (HINDERER, 2012). De acordo com a classificação estabelecida no estudo de Latrubesse, Stevaux e Sinha, (2005), os rios Beni e Mamoré são categorizados como rios de tipo misto. Esses rios apresentam cabeceiras bem desenvolvidas em áreas de cinturão orogênico, além de estreitas planícies aluviais. A morfogênese é caracterizada por um padrão misto, exibindo características tanto entrelaçadas quanto meandantes.

A sinuosidade de um curso d'água, o gradiente do vale e os padrões de canal desempenham um papel importante na determinação da velocidade do fluxo do rio (SUMMERFIELD, 2008). A sinuosidade pode influenciar a resistência ao fluxo, afetando assim a velocidade do rio. Canais com alta sinuosidade apresentam um caminho mais longo para a água, o que pode reduzir a velocidade média do fluxo. Além disso, rios com alta sinuosidade tendem a formar meandros, enquanto rios com baixa sinuosidade são mais

retilíneos (CONSTANTINE et al., 2014). Para compreender melhor a relação entre sinuosidade e velocidade do fluxo, é necessário considerar os fatores hidráulicos e sedimentológicos que influenciam essas características nos canais fluviais.

Os rios de uma bacia hidrográfica possuem diferentes características, como o padrão do canal fluvial, a velocidade do fluxo, o volume de água, a profundidade, a largura, a temperatura das águas, e a quantidade e origem do material transportado, que pode estar em suspensão, dissolvido ou particulado. O sedimento abrange desde partículas muito finas, como argilas e siltes, até grãos maiores, como areia e cascalho (CHARLTON, 2008). Ele é gerado principalmente por processos de erosão, nos quais rochas e solos são desgastados e fragmentados, sendo um componente crucial na dinâmica dos sistemas fluviais (SUMMERFIELD, 2008).

O material sedimentar transportado pelos rios desempenha um papel importante na evolução de meandros e outras formas fluviais, nutre as várzeas com nutrientes dissolvidos ou particulados e pode alterar o padrão do canal, aumentando sua sinuosidade e gerando meandros abandonados ou formando ilhas fluviais (CONSTANTINE et al., 2014). Os tipos de canais meandrantés podem ser classificados como regulares, irregulares e tortuosos, sendo que suas formações estão associadas principalmente ao tipo de fluxo, às condições das margens e à declividade do canal (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017).

A principal fonte do material transportado pelos rios amazônicos origina-se na cadeia de montanhas dos Andes. Na bacia do rio Madeira, particularmente nos rios Beni, Mamoré, Madre de Dios, Guaporé e San Miguel, o material transportado é predominantemente de origem andina (GUYOT; JOUANNEAU; WASSON, 1999). Esse material é resultado, principalmente, da ação erosiva nas encostas andinas e na bacia de drenagem (VAUCHEL et al., 2017).

O material transportado pelo rio além de influenciar sua dinâmica, pode ocasionar mudanças na confluência entre dois canais. Entende-se como confluência a junção de rios de quaisquer ordens, onde ocorrem interações entre a matéria (água e sedimento) e energia (potência do canal), resultando na combinação dos dois fluxos (BEST, 1987; STEVAUX; LATRUBESSE, 2017).

As confluências de canais apresentam diferentes configurações que podem alterar a morfologia e os processos fluviais de uma área (SANTOS; STEVAUX, 2017). Define-se confluência como a junção de dois ou mais canais formando um único rio, sendo os tipos mais comuns de confluência: ângulo agudo, reto e obtuso (BEST, 1987). Nas confluências de ângulo agudo (15° a 20°), a deflexão do fluxo e a separação de sedimentos são mínimas, resultando em

uma morfologia de leito simples. Nas confluências de ângulo reto ( $90^\circ$ ), a interação entre o fluxo tributário e o fluxo principal é intensa, criando escavações centrais mais profundas e maiores zonas de separação. Já nas confluências de ângulo obtuso (maior que  $90^\circ$ ), a segregação de sedimentos é acentuada, levando a padrões complexos de transporte de sedimentos e formação de barras na zona de separação (BEST, 1987).

Esses diferentes tipos de confluências possuem papéis distintos na modelagem dos ambientes fluviais, na morfologia e os processos que ocorre nessas áreas (SANTOS; STEVAUX, 2017). O estudo de Marinho et al. (2022b) destaca como a morfologia em forma de delta na foz do rio Branco, que penetra no vale do rio Negro, contribui para a configuração atual da confluência entre esses dois rios. Nessa região, a interação fluvial é controlada por fatores neotectônicos, exemplificando bem a influência da morfologia na dinâmica dos sistemas fluviais bem como no transporte do material sedimentar.

O transporte dos sedimentos presentes em um rio pode ocorrer nas formas dissolvida, suspensão ou particulada a depender do tipo de material predominante no canal até chegar nas áreas de sedimentação ou deposição fluvial, que inclui os processos como a erosão, transporte e a deposição dessa carga sedimentar, envolvendo toda a dinâmica da bacia de drenagem (STEVANUX; LATRUBESSE, 2017).

Nesse sentido, de acordo com Charlton (2008), a carga particulada consiste em partículas maiores, como areia e cascalho, que se movem pelo fundo do rio por saltação ou rolamento, moldando a morfologia do leito. A carga suspensa é formada por sedimentos finos, como silte e argila, mantidos em suspensão pela turbulência da água. A carga dissolvida inclui materiais como sais e nutrientes dissolvidos na água. Aumento ou redução na quantidade desses materiais pode contribuir para mudanças na dinâmica dos canais fluviais (CONSTANTINE et al., 2014). Portanto, é crucial compreender a influência dos sedimentos na rede de drenagem de uma bacia (CHRISTOFOLETTI, 1981). Desta forma, o barramento de um rio pode provocar alterações nos ecossistemas aquáticos (TIMPE; KAPLAN, 2017).

Os impactos ambientais de uma barragem vão além de simples mudanças hidrológicas no canal principal. Fearnside (2015) destaca as influências relacionadas à inundação de áreas florestais e à alteração dos ecossistemas locais. A formação de reservatórios pode levar à perda de biodiversidade e à modificação dos habitats aquáticos e terrestres. Esses impactos também interferem na hidrodinâmica e os processos de sedimentação, incluindo a redução do material transportado em determinados trechos do rio, conforme identificado nos estudos de Bernini et al. (2016), (Latrubesse et al. (2017) e Rivera et al. (2019; 2021) na bacia do Rio Madeira.

A construção de barragens resulta na inundação de vastas áreas de floresta, causando perda de biodiversidade e destruição de habitats naturais, afetando a fauna e flora locais, bem como os serviços ecossistêmicos fornecidos por essas florestas. Além disso, a formação de reservatórios altera o fluxo natural dos rios, impactando na migração de peixes e outros organismos aquáticos (FEARNSIDE, 2015).

Neste sentido, a caracterização morfométrica da bacia hidrográfica se mostra como uma das formas de analisar e compreender melhor seu funcionamento em diferentes escalas, buscando analisar as relações quantitativas nessas bacias. A análise quantitativa na geomorfologia tem como propósito estudar as características geométricas e altimétricas das bacias hidrográficas, fornecendo indicadores que se relacionam com a forma, a estrutura e a composição dos elementos integrados (CHEREM et al., 2020).

O estudo morfométrico consiste na descrição detalhada de parâmetros físicos que compõem um sistema de drenagem, com informações que dão embasamento no entendimento da influência que a morfometria do relevo tem sobre o tamanho, forma, declividade, densidade de drenagem, tamanho e comprimento dos cursos d'água. A morfometria é uma técnica de apoio para realizar análises hidrológicas e ambientais, com o objetivo de responder questões que visam o entendimento da dinâmica ambiental local ou regional (MELO; FILIZOLA JUNIOR; GUYOT, 2012). No Brasil alguns trabalhos neste sentido já foram realizados em diversos canais e bacias de diferentes escalas, como no caso de grandes rios amazônicos como Juruá e Purus (MELO; FILIZOLA JUNIOR; GUYOT, 2012), no rio Madeira no Brasil (SOUZA et al., 2019). Em pequenos canais como rio Farinhas (GOMES, 2016), na bacia do rio Una (LOPES et al., 2018) e na microbacia do córrego (TEODORO et al., 2007).

Cada bacia hidrográfica possui características fisiográficas distintas, como exemplificado pela diferença na precipitação média entre as bacias dos rios Beni e Mamoré. Embora ambos nasçam na região andina, eles apresentam padrões distintos em morfologia, altitude, tamanho de área, quantidade de canais, padrão de drenagem e outros parâmetros morfométricos. A morfometria de uma bacia hidrográfica pode ser analisada a partir de três principais características: geométricas, de relevo e da rede de drenagem (MELO; FILIZOLA JUNIOR; GUYOT, 2012).

Os parâmetros geométricos incluem a área total (A), perímetro total (P), largura (L), comprimento axial, coeficiente de compactidade (Kc), fator de forma (Kf), índice de circularidade (IC) e densidade de drenagem (Dd). Esses parâmetros são fundamentais para compreender e avaliar o funcionamento de uma bacia hidrográfica, baseando-se no

comportamento esperado. As características do relevo englobam a orientação, altitude mínima, média e máxima, além da declividade média do curso d'água principal. Já os parâmetros da rede de drenagem abrangem o comprimento do curso d'água principal, o comprimento total dos cursos d'água, a densidade de drenagem (Dd) e a ordem dos cursos d'água.

Os cálculos dos parâmetros morfométricos podem ser realizados conforme os estudos de Teodoro et al. (2007), Melo, Filizola Junior e Guyot (2012), Gomes (2016) e Lopes et al. (2018), utilizando as fórmulas de Villela e Matos (1975), Christofolletti (1981), e Stevaux e Latrubesse (2017). Essas métricas são essenciais para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, permitindo a identificação de áreas propensas a enchentes, a avaliação da capacidade de escoamento da bacia e a orientação de práticas sustentáveis para a preservação ambiental.

## **2.2 Hidrologia**

O estudo da Hidrologia experimentou um elevado crescimento devido ao aumento dos problemas observados nas bacias hidrográficas. Um exemplo desses problemas é a construção de grandes barragens em rios e afluentes, sem levar em consideração as consequências cumulativas, o que tem levado a uma degradação em larga escala da planície de inundação e dos ambientes costeiros (LATRUBESSE et al., 2017). A ocupação inadequada próxima aos leitos de rios e em suas nascentes também contribuem para esses problemas, assim como a utilização da água para diversos fins (PINTO et al., 1976). Portanto, compreender os conceitos básicos da hidrologia é essencial para analisar e gerenciar os recursos hídricos de forma sustentável.

O ciclo hidrológico descreve o processo contínuo de circulação da água na Terra, envolvendo a transferência de água entre a atmosfera, a superfície terrestre e o subsolo. Esse ciclo é impulsionado pela energia solar, que aquece a superfície da Terra e causa a evaporação da água dos oceanos, rios, lagos e solo (PINTO et al., 1976). A água evaporada forma as nuvens, que posteriormente se condensam e causam precipitação na forma de chuva, neve ou granizo. Essa precipitação recarrega os corpos d'água e se infiltra no solo, alimentando aquíferos e fluxos subterrâneos (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017). Portanto, o ciclo hidrológico é um processo dinâmico que regula a disponibilidade de água em diferentes regiões do planeta.

Dentro do ciclo hidrológico, o balanço hídrico é essencial para entender o comportamento de um rio em uma determinada área ou bacia hidrográfica definida como um sistema (TUCCI, 1993). Esse balanço é calculado como a diferença entre as entradas e as saídas de água em uma determinada área ao longo de um período de tempo. As entradas de água

ocorrem pela precipitação, enquanto as saídas consistem na evaporação e no escoamento superficial para corpos d'água (CHARLTON, 2008). Um balanço hídrico positivo indica um acúmulo de água, enquanto um balanço negativo indica uma perda líquida de água na área considerada.

Para compreender essa dinâmica, é preciso realizar o monitoramento de um rio ao longo do ano. O regime de fluxo é uma forma de analisar seu comportamento, referindo-se às variações temporais e espaciais dos fluxos de água (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017). Esse regime é influenciado por fatores como a quantidade de precipitação, relevo, geologia, vegetação e uso da terra. O regime de um canal fluvial pode variar de forma sazonal, apresentando padrões distintos em diferentes períodos hidrológicos como enchente, cheia, vazante e seca, de acordo com as características fisiográficas de cada bacia hidrográfica (CHARLTON, 2008). O conhecimento do regime fluvial de um rio é essencial para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, prevenção de enchentes e garantia de disponibilidade de água para diversos usos.

A vazão ou descarga líquida de um rio representa o volume de água que passa por uma determinada seção do rio em uma unidade de tempo. É expressa em unidades de volume por unidade de tempo, como metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$  ou  $m^3.s^{-1}$ ) e litros por segundo (L/s) (PINTO et al., 1976). Por sua vez, a descarga sólida, refere-se à quantidade de sedimentos transportados pelo rio em um determinado período de tempo, expressa em toneladas por dia ( $ton.dia^{-1}$ ) ou por ano ( $ton.ano^{-1}$ ).

Para medir a descarga líquida, são empregados diversos métodos como os medidores de corrente, como correntômetro, molinetes e medidores de velocidade acústicos, são utilizados para medir a velocidade da água em diferentes pontos transversais do rio (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017). Na Amazônia, o ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) é amplamente utilizado para medir as correntes de água. Esse instrumento utiliza o efeito Doppler acústico para estimar a velocidade e direção do fluxo com base nas mudanças de frequência do som refletido por partículas em suspensão presentes na água (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017).

Para calcular a vazão de um canal fluvial, é necessário levar em consideração uma série de variáveis, como a velocidade do fluxo, a profundidade, a largura e a área da seção transversal do canal. O ADCP utiliza feixes acústicos para medir as velocidades em diferentes profundidades em tempo real (GAMARO, 2012). A partir dessas medições, é possível obter uma série temporal de perfis de velocidade, que são essenciais para determinar a vazão. O

ADCP é composto por uma sonda equipada com quatro transdutores que estão distribuídos em um ângulo de 20° sobre a vertical e emite pulsos que são refletidos pelas partículas de material suspenso que viajam na coluna de água (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017).

Filizola e Guyot (2004) indicam que é possível utilizar o retorno do sinal acústico refletido pelos sedimentos em suspensão para estimar a concentração do material em suspensão. O estudo demonstrou uma relação estabelecida entre o sinal de retroespalhamento do ADCP e a concentração total de sedimentos suspensos. No entanto, é importante ressaltar que no estudo Filizola e Guyot (2004) também mencionam a necessidade de mais pontos de amostragem e melhores procedimentos de calibração para obter uma correlação mais precisa e justificar completamente o uso desse método. Em comparação ao molinete, o ADCP desempenha um papel essencial na obtenção de dados hidrológicos de maneira mais rápida e eficaz, além de possuir mais quantidade variadas de informações coletadas.

No que diz respeito à coleta de amostras para determinação da concentração do material em suspensão (MES), é fundamental avaliar a quantidade e a composição dos sedimentos transportados pelo rio. Existem diferentes tipos de amostragem, como a amostragem pontual instantânea, a amostragem pontual por integração e a amostragem por integração na vertical ou em profundidade. Um método comum é a coleta de amostras de água em diferentes profundidades utilizando garrafas de amostragem.

Para analisar a qualidade da água, são realizados procedimentos como a coleta de amostras em diferentes pontos do rio para análises laboratoriais. Essas análises avaliam parâmetros físicos, químicos e biológicos, incluindo pH, oxigênio dissolvido, turbidez, condutividade, nutrientes, metais pesados, DBO e outros. Também é possível usar equipamentos portáteis para medições *in situ*, obtendo informações rápidas sobre a qualidade da água como sondas multiparâmetros.

A gestão desses recursos em regiões de rios internacionais é uma questão complexa que envolve a cooperação entre diferentes países e a consideração dos interesses e necessidades de cada nação. Portanto, é essencial adotar abordagens integradas e colaborativas para garantir a sustentabilidade e a proteção desses valiosos recursos naturais. No contexto brasileiro e boliviano, Ribeiro (2008) destaca que, apesar da oferta hídrica favorável, há uma falta de investimentos em áreas urbanas, resultando na privação de acesso à água para uma grande parcela da população.

Nesse contexto, tanto o Brasil quanto a Bolívia têm adotado estratégias específicas para a gestão sustentável da água e dos sedimentos suspensos em suas áreas de influência. No

Brasil, a gestão de recursos hídricos é regulada pela Lei nº 9.433/97, que estabelece os fundamentos e diretrizes para a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos (BRASIL, 1997). O país possui uma política nacional de recursos hídricos que promove a participação social, a descentralização da gestão e a integração entre os diferentes setores envolvidos. Além disso, o Brasil tem desenvolvido ações de cooperação com outros países da região amazônica por meio da OTCA, visando à gestão conjunta e sustentável dos rios internacionais.

Da mesma forma, na Bolívia, a gestão de recursos hídricos é competência do Ministério do Meio Ambiente e Águas, regida pela Lei nº 1493 de 27 de abril de 1992 (BOLÍVIA, 2000). O país tem buscado fortalecer a governança da água, promovendo a participação social e o envolvimento das comunidades locais na tomada de decisões. Em relação aos rios internacionais, a Bolívia, bem como o Brasil, tem se engajado em iniciativas regionais, como a OTCA (Organização do Tratado de Cooperação Amazônica), para a cooperação e a gestão conjunta dos recursos hídricos compartilhados, visando melhorar a qualidade de vida das populações amazônicas (OTCA, 2010).

A gestão sustentável da água e dos sedimentos suspensos em regiões de rios internacionais enfrenta desafios, como a falta de dados integrados, a coordenação entre países, a degradação ambiental e a pressão do desenvolvimento econômico. No entanto, há oportunidades para uma gestão sustentável, como a cooperação internacional, o uso de tecnologias avançadas e a conscientização pública. Estratégias abrangentes e sustentáveis são necessárias, com cooperação entre os países e a adoção de políticas adequadas, fortalecendo a governança da água e utilizando tecnologias avançadas. Isso garantirá a disponibilidade de recursos hídricos de qualidade para as atuais e futuras gerações.

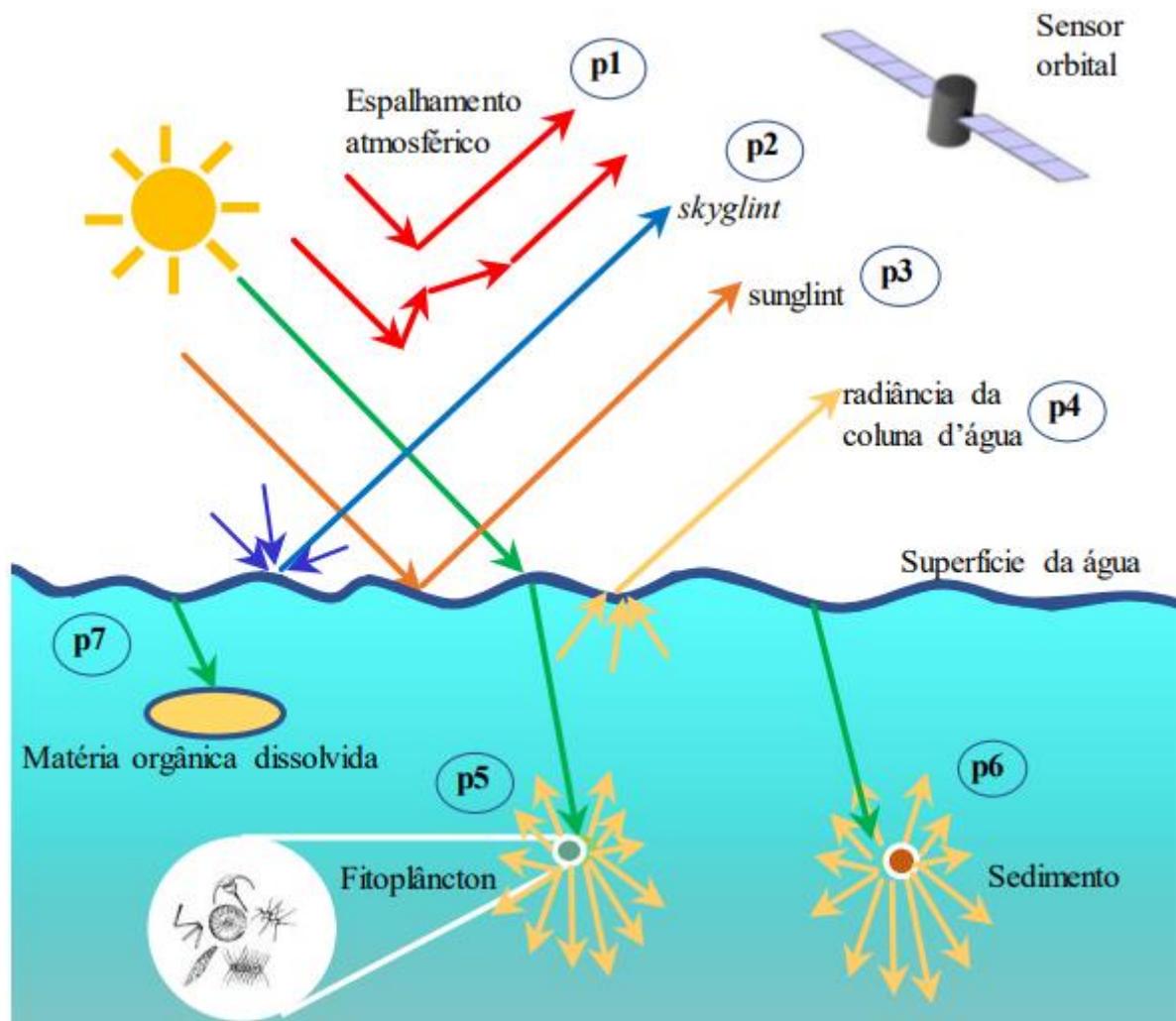
### **2.3 Sensoriamento remoto**

Estudos que utilizam o sensoriamento remoto para monitoramento do transporte de sedimentos nos rios da Amazônia têm crescido de forma considerável nos últimos anos (ESPINOZA VILLAR et al., 2013; FASSONI-ANDRADE et al., 2023; FASSONI-ANDRADE et al., 2021; MARINHO, 2019; MARINHO et al., 2018, 2022a; MARTINEZ et al., 2009, 2015; SANTOS, 2015; SANTOS et al., 2018), visto que essas ferramentas se mostram como alternativa para os trabalhos em áreas remotas em um intervalo de tempo maior, podendo obter informações sobre a superfície terrestre a partir dos diferentes tipos de dados disponibilizados nas imagens de satélites.

Os satélites de sensoriamento remoto compreendem sensores com sistemas passivos e ativos. Os sensores ativos (Radar/Lidar) emitem sua própria energia e mensura a reflexão dela para poder transformar este dado em uma imagem digital ou dados pontuais. No caso dos sensores passivos, é utilizada a energia eletromagnética refletida pela superfície por diferentes alvos em direção ao espaço (MENDES; CIRILO, 2013). São exemplos de sensores passivos o OLI (Landsat-8 e Landsat-9), MSI (Sentinel-2) e DOVE (PlanetScope), este último utilizado neste estudo.

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que nos permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre (FLORENZANO, 2007), tanto por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície, pode-se entender o sensoriamento remoto como uma ferramenta ou técnica similar a matemática, que utiliza algoritmos para mensurar a energia eletromagnética emitida pelo alvo (JENSEN, 2009). Podemos definir o sensoriamento remoto como o processo de detectar e monitorar características físicas, químicas e biológicas da superfície da Terra e de outros objetos distantes usando sensores montados em aeronaves, satélites, drones ou outras plataformas.

Segundo Marinho (2019), a presença das diferentes substâncias na água influencia os processos de espalhamento e absorção da luz. Com base nisso, é possível estimar a concentração de constituintes transportados pelos rios, como partículas inorgânicas e orgânicas suspensas, substâncias orgânicas dissolvidas e organismos vivos. A figura 2 apresenta a trajetória da luz solar ao se propagar e atingir os alvos aquáticos, retornando em direção ao sensor orbital. Ao interagir com a atmosfera, superfície da água e coluna d'água, a luz sofre processos de atenuação antes de chegar ao sensor (BARBOSA, 2019).



**Figura 2:** Trajetória da luz entre fonte (sol), alvo (corpo d'água) e sensor orbital. (1) processo de espalhamento atmosférico, (2) processo de reflexão especular da luz difusa do céu, (3) processo de reflexão especular da luz solar direta, (4) radiação emergente da coluna d'água, (5) processo de espalhamento e absorção da luz por fitoplâncton, (6) processo de espalhamento da luz por sedimentos, (7) processo de absorção da luz por matéria orgânica dissolvida. **Fonte:** Barbosa et al. (2019)

A radiação emergente (figura 2) do corpo d'água possui informações essenciais sobre a composição das massas de água, permitindo a relação entre os constituintes da água e os sinais registrados pelos sensores remotos (BARBOSA; DE MORAES NOVO; MARTINS, 2019). Por meio de sensores instalados em satélites artificiais, a energia refletida ou emitida pela superfície terrestre é captada e transformada em sinais elétricos, que são registrados e transmitidos para estações de recepção na Terra, equipadas com antenas parabólicas (FLORENZANO, 2007). Esses sinais são convertidos em dados, como gráficos, tabelas e imagens, permitindo a obtenção de informações sobre as características químicas, físicas e biológicas dos alvos presentes na superfície terrestre.

A energia utilizada pode ter origem tanto em fontes naturais quanto artificiais. Conforme destacado por Fitz (2007), para que os sensores possam adquirir dados são

necessários elementos básicos, tais como uma fonte de energia radiante (como a energia solar), um objeto de visada que representa o alvo na superfície e um sistema composto por um dispositivo de imageamento óptico e um detector, que formam o sensor. A radiação incidente na superfície terrestre, bem como a radiação refletida por ela, pode ser captada por sensores instalados em satélites artificiais que orbitam o planeta (FITZ, 2007).

O processo de reflexão da energia eletromagnética é de suma importância para o sensoriamento remoto, uma vez que nem todos os satélites utilizam energia artificial para produzir imagens de determinadas áreas na superfície terrestre. No caso de satélites com sensores a bordo apenas receptores, eles se baseiam na reflexão da energia natural do sol incidida sobre os diferentes alvos na superfície da Terra (FLORENZANO, 2007).

As imagens de satélite são produzidas através da captação da energia eletromagnética, que, ao ser refletida pela Terra, se dirige para o espaço. É importante ressaltar que também é possível emitir uma energia artificial produzida pelo próprio satélite a fim de captar sua reflexão, como ocorre nas imagens de radar. Zanotta, Ferreira e Zortea (2019) reforçam a importância da reflexão dos objetos, que reagem de maneiras distintas em determinados intervalos ou comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

Cada alvo ou objeto possui uma assinatura espectral distinta, que pode ser adquirida ou definida a partir da resposta espectral em diferentes bandas. É com base nessa assinatura espectral que podemos interpretar os dados obtidos pelo sensor. Uma banda espectral pode ser definida como segmentos da energia eletromagnética com diferentes comprimentos ou intensidades (MENDES e CIRILO, 2013). O olho humano é capaz de enxergar apenas na faixa de comprimentos de onda denominada faixa do visível, enquanto espectroradiômetros abarcam um comprimento de onda maior do que esse intervalo.

Após a obtenção das informações espectrais e das assinaturas dos alvos na superfície terrestre, é importante considerar a aplicação de métodos de sensoriamento remoto no estudo de sistemas aquáticos. Nesse contexto, é crucial reunir informações adicionais sobre a área de estudo, tais como dados climáticos, topografia da região, regime hidrológico, uso da terra e cobertura da bacia de drenagem (NOVO, 2019). Esses dados complementares permitem uma caracterização mais abrangente do ambiente aquático, contribuindo para uma análise mais precisa e contextualizada dos dados obtidos pelos sensores remotos.

Os conceitos fundamentais no campo do sensoriamento remoto são essenciais para compreender o funcionamento das tecnologias utilizadas e sua aplicação na análise dos recursos hídricos (NOVO, 2019). Entre eles estão a resolução espacial, espectral, o espectro

eletromagnético e o comportamento espectral da água nos rios amazônicos. A resolução espacial refere-se à capacidade de um sensor detectar e distinguir objetos ou características presentes na superfície terrestre (FITZ, 2007). Desta forma, quanto maior a resolução espacial, maior é a capacidade de identificar detalhes dos alvos. A resolução espacial é medida em metros por pixel, representando o tamanho mínimo de uma área na qual o sensor pode distinguir objetos.

A resolução temporal refere-se à capacidade de um sensor ou sistema de sensoriamento remoto registrar imagens repetidamente de uma mesma área ao longo do tempo, ou seja, é o intervalo de tempo necessário para que o sensor complete uma nova aquisição de dados de uma determinada região (JENSEN, 2009). Quanto menor for esse intervalo, maior será a resolução temporal do sensor, permitindo o monitoramento mais frequente e atualizada de mudanças e eventos na área em estudo.

A resolução espectral por sua vez, é o número e a dimensão/tamanho de intervalos de comprimentos de onda específicos no espectro eletromagnético aos quais um instrumento de sensoriamento remoto é sensível ou é capaz de detectar (JENSEN, 2009). Cada intervalo de comprimento de onda corresponde a uma banda específica, sensores com maior resolução espectral são capazes de capturar informações mais detalhadas sobre a composição dos objetos presentes na superfície. O espectro eletromagnético abrange todas as faixas de comprimento de onda das ondas eletromagnéticas, incluindo desde raios gama até ondas de rádio (FITZ, 2007). As diferentes regiões do espectro eletromagnético são utilizadas para fins específicos, como a detecção de radiação infravermelha próxima e média para análise da vegetação.

Portanto, para analisar o comportamento espectral da água nos rios amazônicos, é necessário compreender a interação entre a água e a radiação eletromagnética em diferentes faixas espectrais. No estudo de sistemas aquáticos continentais, essa interação é influenciada pelas características fisiográficas de cada região (NOVO, 2019). A compreensão do comportamento espectral da água desempenha um papel fundamental na interpretação precisa das imagens de satélite e na estimativa de parâmetros hidrológicos

Para uma compreensão abrangente da dinâmica espaço-temporal, é recomendado utilizar dados provenientes de satélites equipados com sensores de média e alta resolução espacial, como a constelação PlanetScope (Tabela 1). Esses satélites permitem a obtenção de uma série temporal de dados em intervalos mais espaçados do que as coletas realizadas em campo pela rede hidrosedimentométrica nacional.

**Tabela 1:** Características do conjunto de satélites PlanetScope.

Sensor	Instrumento	Resolução			Bandas			
		Espectral (nm)	Espacial (m)	Temporal (dias)	Azul (nm)	Verde (nm)	Vermelho (nm)	Infravermelho (nm)
Dove	PS2	455-860	03	Diária	455-517	500-590	590-670	780-860
Dove-R	PS2.SD	464-888	03	Diária	464-517	547-585	650-682	846-888
Super Dove	PSB.SD	431-885	03	Diária	465-515	547-585	650-680	845-885

Em relação aos sistemas sensores, o PlanetScope é um exemplo importante com três gerações (ver Tabela 1). A constelação de satélites foi inicialmente lançada a partir de 2016, cada um com órbita polar e resolução espacial variando de 3 a 5 metros (PLANET, 2024). Cada satélite tem o formato CubeSat 3U (10 cm x 10 cm x 30 cm). Os satélites lançados a partir de novembro de 2018 apresentam uma resolução espectral aprimorada, constituindo a primeira geração. A segunda geração, conhecida como Dove-R ou PS2.SD, possui um sensor composto por quatro faixas separadas verticalmente ao longo da trilha de voo. As imagens PS2.SD estão disponíveis desde março de 2019 até 22 de abril de 2022. A terceira geração de sensores PlanetScope, chamada SuperDove ou PSB.SD, está atualmente em órbita e produz imagens diárias com 8 bandas espectrais desde março de 2020.

Esses sistemas sensores desempenham um papel importante na obtenção de dados para o monitoramento ambiental e a análise dos recursos hídricos, fornecendo informações valiosas sobre a superfície terrestre e seus processos. No entanto, é necessário realizar a calibração dos sensores com as assinaturas espectrais obtidas por radiômetros em campo. No estudo de Martinez et al. (2015) ressaltam a eficácia da reflectância da superfície da água como uma variável confiável para estimar a concentração de sedimentos nos rios da bacia Amazônica.

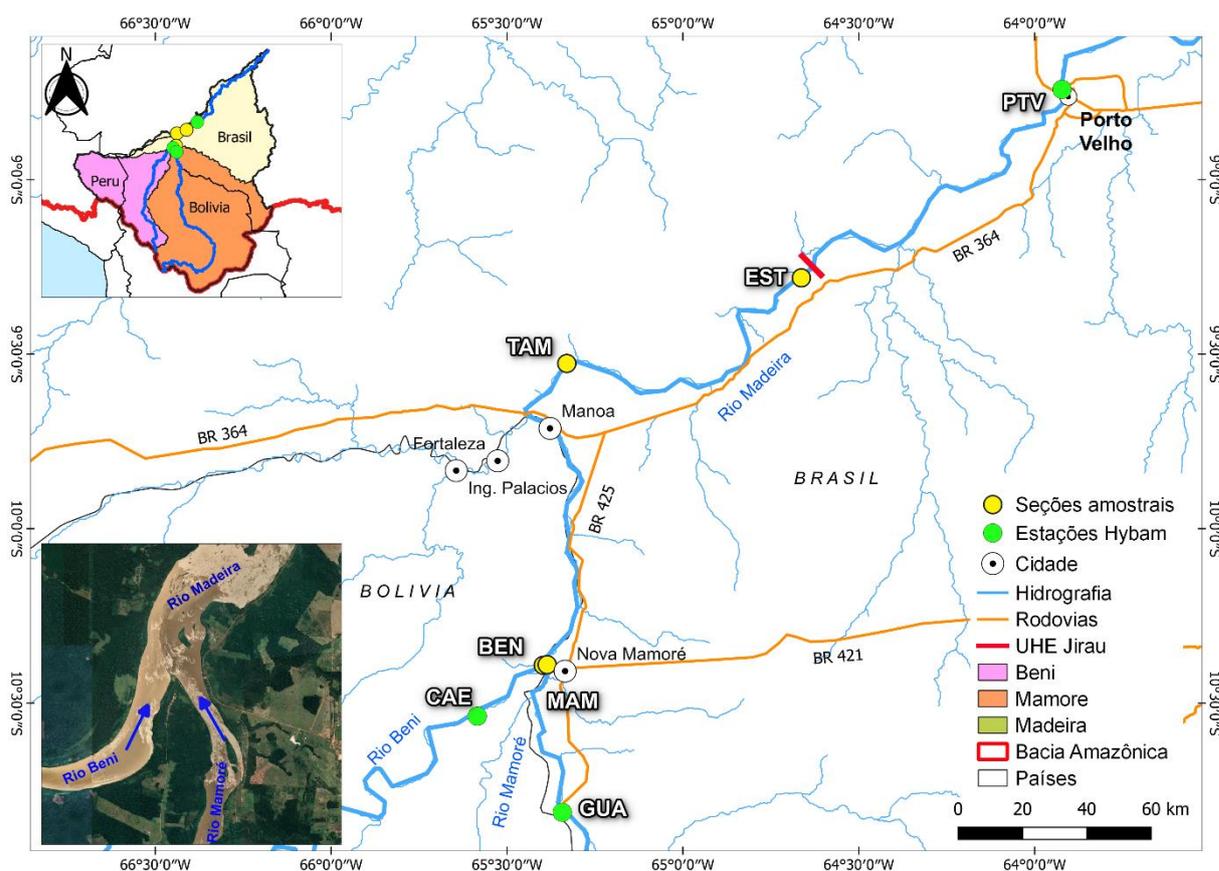
Neste sentido, alguns estudos já foram realizados em diferentes rios da Amazônia, como na região de confluência entre os canais fluviais Solimões e Negro (MARINHO et al., 2018), na calha principal do rio Madeira (ESPINOZA VILLAR et al., 2013; ESPINOZA-VILLAR et al., 2017; SANTOS et al., 2024), rio Negro (MARINHO et al., 2018; MARINHO, 2019; MARINHO et al., 2022a) rio Uatumã (MARINHO; SEVERO, 2023), rio Purus (SANTOS, 2015; SANTOS et al., 2018) e para os principais rios da Amazônia (MARTINEZ et al., 2009, 2015). Esses estudos demonstraram que o uso da tecnologia de sensoriamento remoto é viável para monitorar a dinâmica hidrossedimentar em grandes rios, especialmente em regiões de difícil acesso, onde a coleta de dados in situ é limitada.

No entanto, os resultados indicam que a precisão das estimativas pode variar dependendo das características específicas de cada rio, como turbidez, tamanho da partícula sedimentar e complexidade do canal fluvial. Em geral, a tecnologia se mostrou mais adequada

para o monitoramento em rios de maior porte e com alta carga sedimentar, como o rio Madeira e o rio Solimões, onde as estimativas de material em suspensão apresentaram maior consistência com os dados observados em campo.

### 3. ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Beni abrange territórios da Bolívia e do Peru, com uma área estimada de 282.000 quilômetros quadrados. Desse total, 61% está localizada na Bolívia, enquanto os restantes 39% pertencem ao Peru. Por sua vez, a bacia do rio Mamoré cobre uma área de 636.000 quilômetros quadrados, sendo que 81% desse território está na Bolívia, enquanto os 19% restantes encontram-se no Brasil (Figura 3).



**Figura 3:** Região de confluência entre os rios Beni e Mamoré, formadores do rio Madeira. Estações Hybam: GUA (Guayaramerin); CAE (Cachuela Esperanza) e PTV (Porto Velho). Seções amostrais: BEM (Beni); MAM (Mamoré); TAM (Tamborete) e EST (Estação).

A área de estudo engloba a região da confluência dos rios Beni e Mamoré (figura 3), bem como o trecho do rio Madeira que se estende a jusante dessa confluência, localizada no estado de Rondônia, na fronteira entre Brasil e Bolívia. O acesso a essa área é viabilizado através das rodovias BR-424, que conecta a cidade de Guajará-Mirim a Abunã (percorrendo Nova Mamoré), e da BR-364, que liga Abunã a Porto Velho, a capital estadual. Ambas as rodovias seguem a margem direita do rio Madeira, proporcionando uma conexão fundamental para a região.

A bacia hidrográfica do Beni é composta geologicamente por rochas sedimentares Paleozóicas associadas a rochas plutônicas mesozoicas e rochas metamórficas Proterozóicas que sustentam o relevo da Cordilheira dos Andes. Já na porção leste da bacia verifica-se uma extensa área de sedimentos siliciclásticos do Quaternário, oriundo dessas rochas mais antigas. A bacia do Mamoré, além de englobar as mesmas rochas da bacia do Beni, uma vez que estão no mesmo contexto geológico-tectônico, apresentam também rochas metamórficas Paleoproterozóicas e Mesoproterozóica e rochas sedimentares Mesozoicas (ALCÁRCEL-GUTIÉRREZ et al., 2023).

Ambas as bacias apresentam uma ampla diversidade de características climáticas. A região engloba desde áreas semiáridas e altamente erodíveis nos Andes até bacias densamente vegetadas em rochas paleozoicas (GUYOT; JOUANNEAU; WASSON, 1999). De acordo com a classificação de Souza Filho et al. (1999), a compartimentação fluvial da bacia do rio Madeira está localizada no domínio I. Este domínio é composto pela bacia hidrográfica do Guaporé e parte do Mamoré, que se encontra sobre a Unidade Geomorfológica das Planícies e Pantanaís do Médio e Alto Guaporé.

O sistema deposicional fluvial instalado neste domínio é constituído pelos ambientes sedimentares de pântanos, planície de inundação, canal fluvial meandrante, lagos e leques aluviais. A parte sub-andina do rio Beni por sua vez, compreende uma extensa área no norte da Bolívia, situada entre a Cordilheira Andina, a sudoeste, e o Arco do rio Guaporé, a nordeste, que delimita o Escudo Brasileiro (SOUZA FILHO et al., 1999). Aqueles autores colocam que essa bacia é caracterizada como uma zona de transição, conhecida como bacia periandina, resultante da atividade tectônica colisional envolvendo o movimento da placa Sul-americana para o oeste e da placa de Nazca para o leste.

As principais áreas fontes de sedimentos para os rios da bacia Amazônica são as montanhas dos Andes, do escudo Brasileiro e do escudo das Guianas (FILIZOLA; GUYOT, 2009). Os rios Beni, Mamoré e Madeira podem ser categorizados como rios de águas brancas, seguindo a classificação de Sioli (1984), no qual categorizou os diferentes tipos de águas dos rios amazônicos considerando suas características físicas e químicas, especialmente com base em sua coloração. Esses cursos d'água atravessam uma área com terrenos mistos e exibem um padrão de drenagem que se destaca pela presença de vários canais separados por ilhas fluviais com o padrão do tipo multicanal. Essas características estão vinculadas a uma carga sedimentar elevada (LATRUBESSE; STEVAUX; SINHA, 2005).

Em relação ao tipo de vegetação, Severo e Marinho (2024) utilizando dados do Projeto Mapbiomas, observaram que cerca de 1,17% da área da bacia do rio Beni é composta por superfícies hídricas, englobando classe como rios e lagos. Em contrapartida, a ocupação antrópica representa 3,69% da bacia, compreendendo as atividades agrícolas, infraestrutura urbana e mineração. A expressiva maioria, equivalente a 95,15%, é composta por coberturas naturais, que inclui formações florestais, savanas, florestas inundáveis, formações florestais não inundáveis, áreas campestres ou de pastagem, outras formações naturais não florestais, áreas sem vegetação observada e não observada.

No contexto da bacia do rio Mamoré, Severo e Marinho (2024) apresentam que cerca de 1,21% de sua extensão é ocupada por superfícies hídricas, enquanto a influência antrópica é mais evidente, abarcando 17,96% da bacia. As coberturas naturais compreendem apenas 80,83% do território. Nesta bacia, as transformações no uso e cobertura do solo nas últimas décadas ocorreram de forma mais acentuada em comparação com a bacia do rio Beni, que apesar de se observar um aumento nas áreas destinadas à agricultura naquela área, a expansão é menos acentuada que no Mamoré.

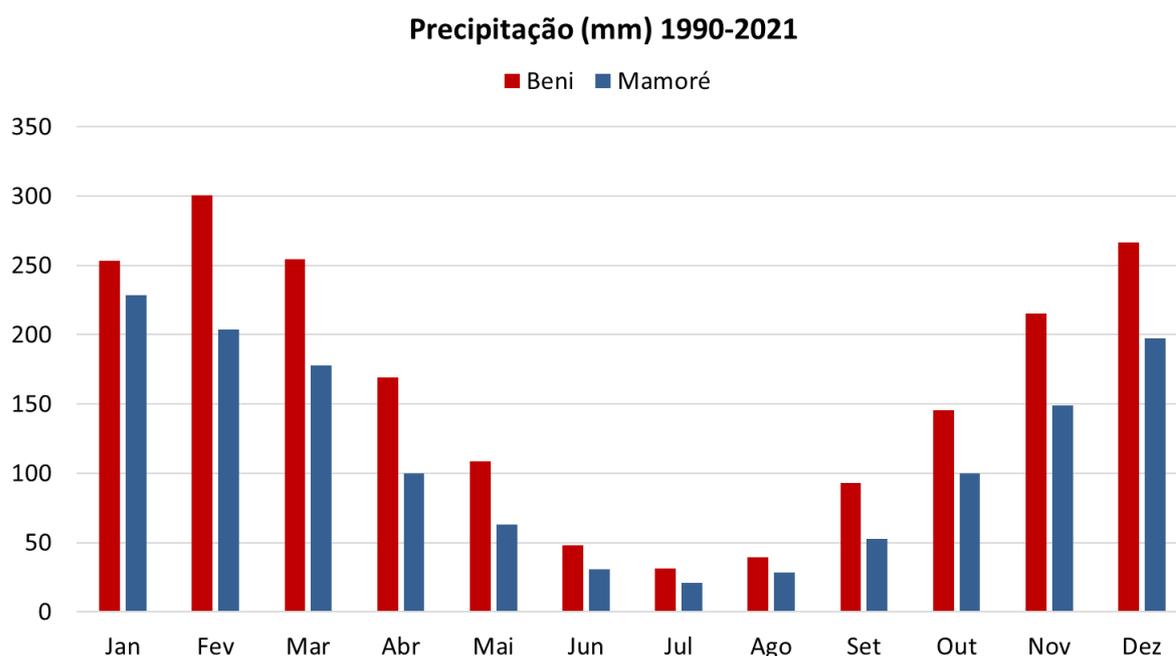
Os dados de precipitação utilizados para a caracterização do regime de precipitação nas sub-bacias dos rios Beni e Mamoré foram obtidos a partir do projeto CHIRPS v.2. O CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) é um conjunto de dados que combina informações de precipitação por satélite com dados de estações terrestres, proporcionando uma cobertura espacial detalhada e contínua, especialmente útil para regiões com monitoramento limitado.

Este conjunto de dados foi considerado adequado para estudos climatológicos por Marinho e Rivera (2019). Dada as limitações em termos de monitoramento nessas áreas, os dados de precipitação fornecidos pelo CHIRPS v.2 constituem uma fonte valiosa de informações para a caracterização climática de regiões pouco monitoradas na bacia Amazônica. Os dados podem ser acessados no site oficial do projeto: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>.

A bacia do rio Beni abrange uma área estimada em  $2,82 \times 10^5$  km<sup>2</sup>, enquanto a bacia do rio Mamoré cobre  $6,36 \times 10^5$  km<sup>2</sup>. A precipitação média anual na bacia do rio Beni é de 1.900 mm.ano<sup>-1</sup>, e na bacia do rio Mamoré é de 1.350 mm.ano<sup>-1</sup>. Ambas as bacias seguem um padrão sazonal bem definido, com a estação chuvosa ocorrendo de janeiro a março e a estação seca de abril a agosto. A partir de setembro, ocorre uma transição gradual para a estação chuvosa.

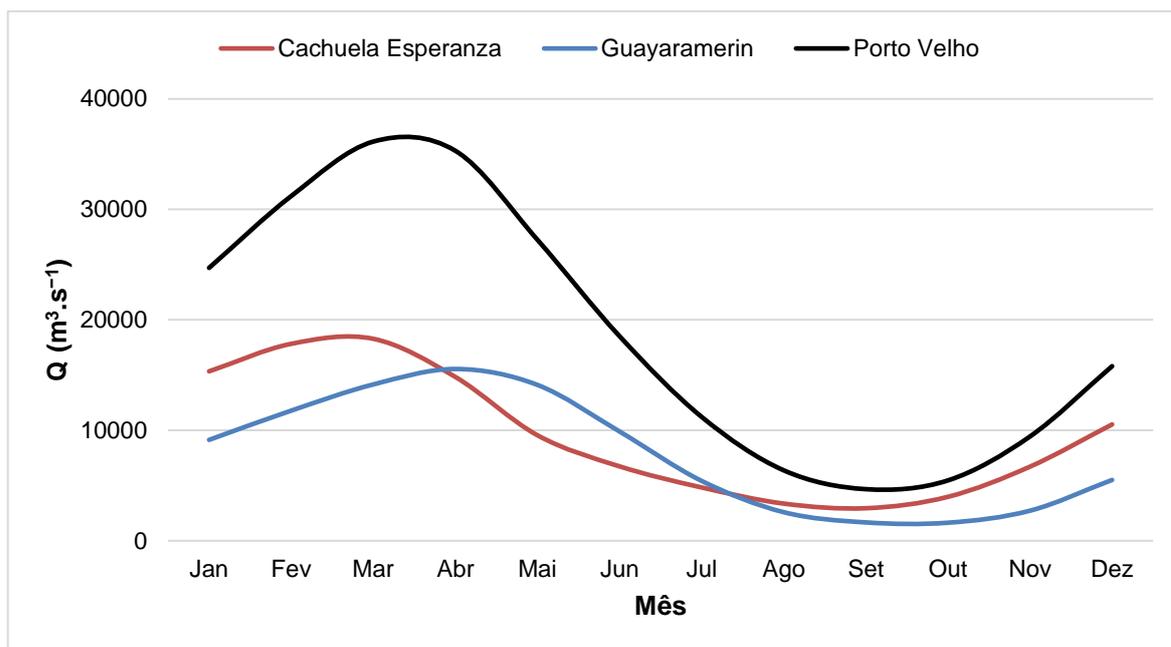
No rio Beni (Figura 4), os valores máximos de precipitação ocorrem entre janeiro e

março, variando entre 250 e 300 mm, enquanto os mínimos ocorrem entre junho e agosto, variando de 30 a 50 mm. Na bacia do rio Mamoré (Figura 4), o período de menor precipitação ocorre entre junho e agosto, com valores médios mensais variando entre 20 e 30 mm. De setembro a dezembro, a precipitação aumenta, atingindo o pico em janeiro com cerca de 230 mm, seguido por uma leve redução em fevereiro e uma rápida diminuição até julho, com um valor médio de 21 mm. Essas flutuações nas chuvas são influenciadas por fatores climáticos regionais e sazonais.



**Figura 4:** Regime de precipitação das bacias dos Rios Beni e Mamoré.

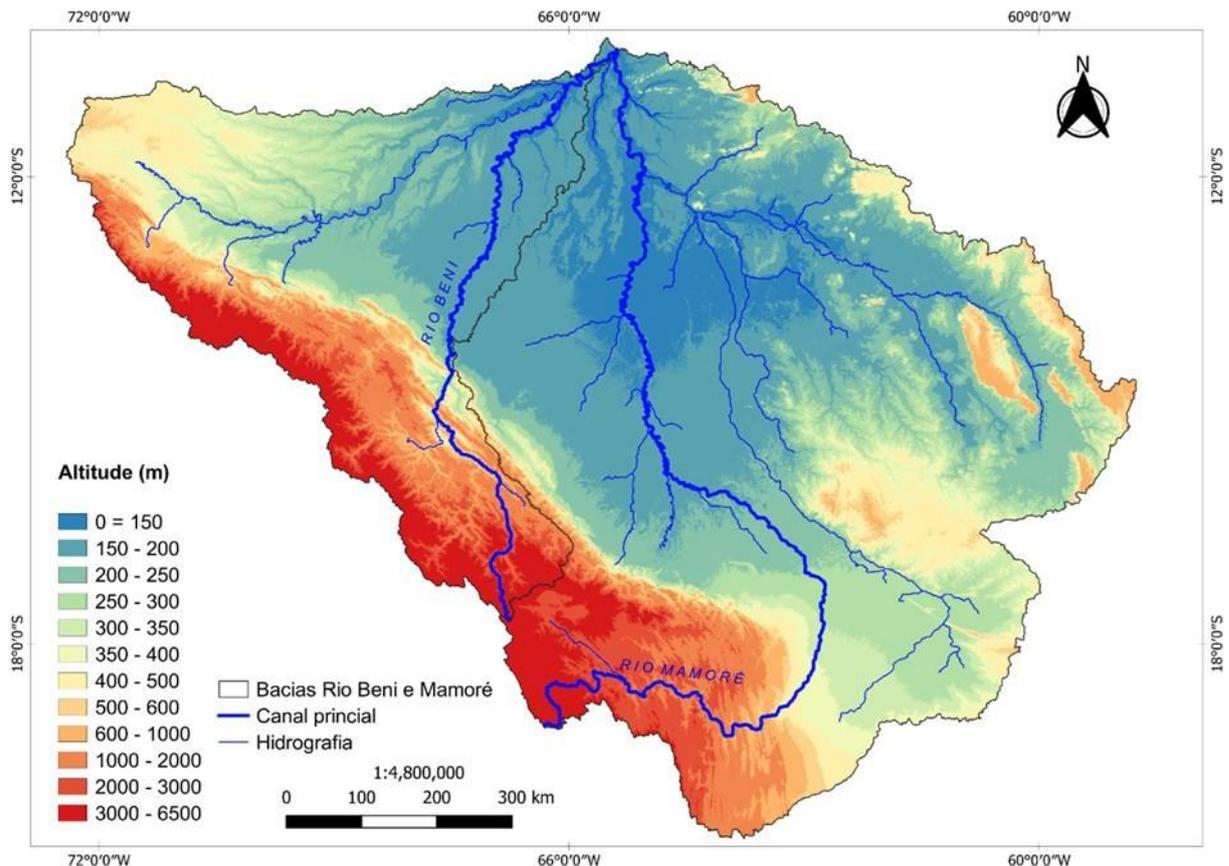
A figura 5 apresenta o regime mensal de vazão (Q) em três diferentes estações hidrométricas do Observatório Hybam: Cachuela Esperanza, Guayaramerin e Porto Velho. Em Cachuela Esperanza, a vazão é 91% superior à média anual em março, enquanto Guayaramerin registra um aumento de cerca de 80% em abril. Porto Velho, influenciada pelo rio Mamoré, atinge valores máximos em março e abril. Durante as águas baixas, Cachuela Esperanza tem o menor valor em setembro, Guayaramerin mantém a defasagem de um mês com o mínimo em outubro, e Porto Velho atinge o menor valor em setembro, com um forte aumento em novembro.



**Figura 5:** Regimes mensais de vazões.

As bacias dos rios Beni e Mamoré compõe a parte alta da bacia do Madeira, e esta por sua vez é delimitada topograficamente ao sul pela cordilheira dos Andes, atingindo elevações de 6500 metros de altitude. Suas nascentes estão localizadas nos Andes, no território boliviano, e drenam áreas que variam de 5 mil metros de altitude até a planície Amazônica, próxima a 70 metros, na fronteira entre Brasil e Bolívia.

O canal do rio Mamoré, conforme ilustrado na figura 6, possui uma extensão total de aproximadamente 2341 km desde sua nascente na Bolívia até sua foz em território brasileiro. Sua cabeceira nasce em elevações próximas de 5000 metros de altitude, descendo de forma acentuada por cerca de 400 km. Posteriormente, percorre regiões de relevo mais suave e planícies, apresentando um grau médio de sinuosidade estimado em 1,42 para todo o seu curso fluvial, o que é característico de bacias com forma mais alongada. O rio Beni, é aproximadamente 37% menor que o rio Mamoré, com uma extensão total de 1468 km. Ele flui de uma área montanhosa para a planície amazônica e apresenta um grau médio de sinuosidade aqui estimado em torno de 1,42 para toda a sua extensão até a foz.



**Figura 6:** Mapa hipsométrico das bacias dos rios Beni e Mamoré.

A sinuosidade dos rios Beni e Mamoré apresenta uma variação ao longo de sua extensão, refletindo as características geomorfológicas e hidrológicas das diferentes áreas da bacia. Entretanto, estes canais podem ser classificados como mistos se analisados em partes ou setores (alto, médio e baixo curso), visto que possuem trechos retilíneos (porções mais elevadas da bacia) e sinuosos (regiões mais baixas e de planície). Constantine et al., (2014) coloca que a sinuosidade dos rios é influenciada pela oferta de sedimentos e pela dinâmica de migração dos meandros.

Canais fluviais sinuosos são classificados como do tipo meandrante, caracterizados pela ausência de harmonia ou regularidade em suas curvas. Conforme Stevaux e Latrubesse (2017), existem três tipos de meandros: irregulares, regulares e tortuosos, o que torna difícil uma classificação precisa com base nesses parâmetros. Ao analisar os rios em estudo, observou-se que existem trechos em que apresentam formas retilíneas e outros com meandros de tipo irregular, alternando em tamanho e forma, o que de acordo com Constantine et al. (2014), a sinuosidade dos rios é um aspecto dinâmico que pode ser modificado pela quantidade de sedimentos disponíveis e pela atividade de migração dos meandros, refletindo a interação complexa entre sedimentação e morfologia fluvial.

Face a isso, o coeficiente de compacidade ( $K_c$ ) quantifica a forma da bacia em relação a um círculo e fornece uma ideia de quão "circular" ou "alongada" é a bacia hidrográfica. Para as bacias do rio Beni (3,07) e do rio Mamoré (2,57) mostram que são irregulares, sendo que o rio Beni é mais irregular que o rio Mamoré, assumindo uma forma elíptica. Essa característica também é refletida no fator de forma ( $K_f$ ), que é de 0,26 para o rio Beni e 0,23 para o rio Mamoré. Conforme Christofolletti (1981), se o índice  $K_f$  for menor que 1,0, as bacias são classificadas como compridas e possuem mais tempo de concentração da água no sistema.

Para as bacias dos rios Beni e Mamoré, isso significa que, devido à sua forma alongada, a água leva mais tempo para se concentrar nos canais principais após um evento de precipitação. Isso pode resultar em uma resposta mais lenta às chuvas intensas, reduzindo a probabilidade de enchentes rápidas, mas também podendo prolongar os períodos de inundação quando ocorrem eventos fortes de chuva. Por outro lado, o índice de circularidade ( $I_c$ ) do rio Beni é 0,10, menor que o rio Mamoré com 0,15, ambas são bacias alongadas e possuem menor concentração do deflúvio, o que favorece o escoamento superficial. A densidade de drenagem ( $D_d$ ) é de 0,69  $\text{km}/\text{km}^2$  para o rio Beni e 0,62  $\text{km}/\text{km}^2$  para o rio Mamoré, classificados como regulares e de baixa capacidade de drenagem.

A partir da delimitação da área total das bacias em estudo, foi possível calcular alguns parâmetros morfométricos, no qual estão apresentados na tabela 2. Ambas as bacias possuem grandes áreas de drenagem e diferente hierarquia fluvial, conforme dados disponibilizados por Venticinque et al. (2016), no qual utilizaram da metodologia proposta por Strahler (1957) que consiste no grau de ramificação dentro de uma bacia, para categorizar os canais fluviais em diferentes ordens. Os canais principais das bacias analisadas são de 9° ordem para o rio Beni e 10° ordem para o rio Mamoré, que é maior no tamanho de sua área e quantidade de canais na bacia.

O índice de sinuosidade ( $I_s$ ) de ambos os rios foi 1,42, que tende a serem canais retilíneos de baixa sinuosidade ( $< 1,5$ ), e que conforme Christofolletti (1981), rios de baixa sinuosidade podem estar associadas a falhas, fraturas ou desenvolvimento em leitos rochosos homogêneos que oferecem a mesma resistência a água, mas no caso dos rios Beni e Mamoré, estes canais apresentam trechos anastomosados e meandranes com padrão de drenagem dendrítico a subparalelos, com os canais tributários sub paralelos a retangular.

Os rios de traçado retilíneo possuem alta competência de transporte de sedimentos, enquanto aqueles possuidores de um traçado meandranes favorecem o armazenamento de sedimentos. Os rios Beni e Mamoré situam-se numa extensa planície aluvial pediplanada e

relevos residuais, canais instáveis e migrantes e altitudes acima dos 3000 metros, constituem um ambiente deposicional, com predomínio de sedimentos inconsolidados areno-argilosos (SOUZA FILHO et al., 1999).

**Tabela 2:** Parâmetros Morfométricos das bacias dos rios Beni e Mamoré

<b>Parâmetro</b>	<b>Rio Beni</b>	<b>Rio Mamoré</b>
Área Total (km <sup>2</sup> )	280.43	636.93
Perímetro (km)	5803	7312
Canal Principal Total (km)	1468	2341
Comprimento Axial (km)	1035	1649
Largura média (km)	433	721
Coefficiente de compacidade (Kc)	3,07	2,57
Índice de sinuosidade (Is)	1,42	1,42
Fator de forma (Kf)	0,26	0,23
Índice de circularidade (Ic)	0,10	0,15
Ordem do canal	9°	10°
Densidade de drenagem (km/km <sup>2</sup> )	0,69	0,62
Altitude Máxima (m)	6427	5138
Altitude Média (m)	1002	526
Altitude Mínima (m)	73	80
Amplitude Altimétrica (m)	6354	5058

Os parâmetros (Tabela 2) analisados indicam que as bacias dos rios Beni e Mamoré são morfometricamente de baixa predisposição para enchentes e inundações, com bom escoamento superficial no curso principal. Embora o rio Beni seja menor que o rio Mamoré em extensão, ambos apresentaram valores iguais para a sinuosidade média do curso fluvial. Isso

significa que, devido à menor predisposição para enchentes e inundações, as bacias têm uma capacidade maior de transportar materiais em suspensão (MES) de maneira eficiente, reduzindo a probabilidade de sedimentação excessiva nos canais principais.

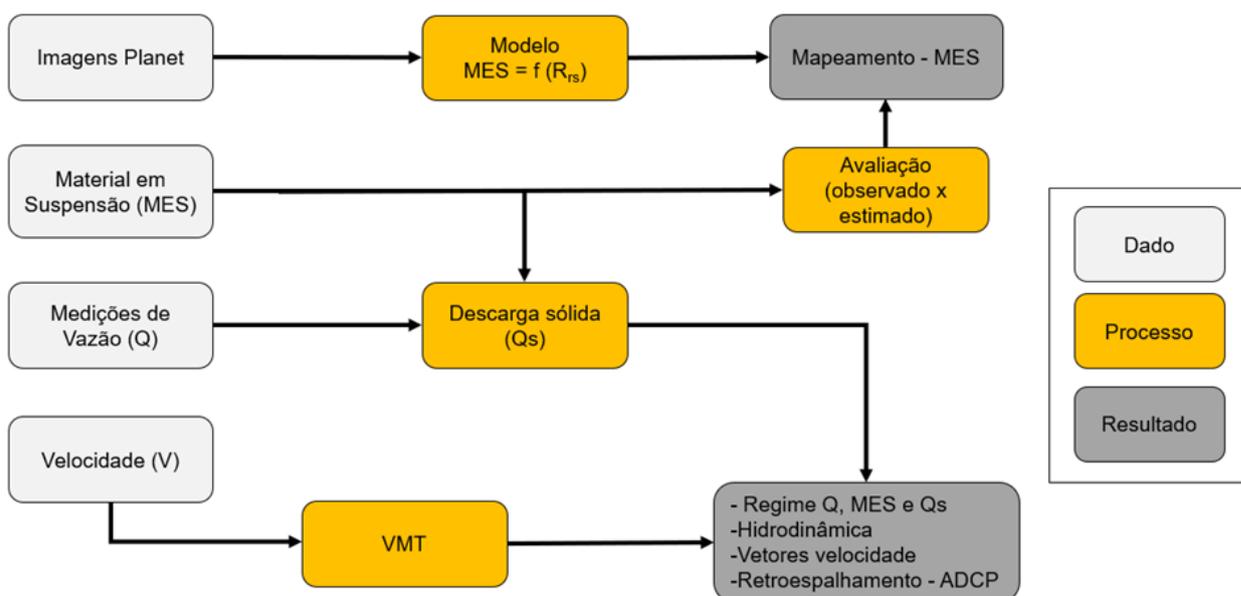
Além disso, a competência, que se refere à capacidade do rio de transportar sedimentos de diferentes tamanhos, é influenciada pela morfometria e pela energia do fluxo. A alta sinuosidade e a baixa densidade de drenagem sugerem que os rios podem transportar MES de forma contínua, mas com menor energia, o que pode afetar a deposição de sedimentos mais finos ao longo do curso fluvial.

Apesar dos parâmetros morfométricos indicarem uma baixa predisposição para enchentes e inundações, a região é caracterizada pelos Llanos de Moxos, uma extensa área de savana com cerca de 150.000 km<sup>2</sup>. Hamilton, Sippel e Melack, (2004) afirmam que o desmatamento e as queimadas para criação de pastagens podem ter contribuído para o aumento da extensão da savana, substituindo áreas que anteriormente eram cobertas por florestas.

A vegetação natural nos Llanos de Moxos geralmente consiste em floresta perene em áreas que não são afetadas pela inundação sazonal, enquanto as áreas sujeitas à inundação mantêm uma vegetação de campo ou savana (HAMILTON; SIPPEL; MELACK, 2004). A diversidade na vegetação pode influenciar a quantidade do material em suspensão (MES) nos rios, uma vez que a dinâmica de sedimentação e a oferta de sedimentos são influenciadas por fatores externos, como a erosão e a sedimentação, que podem ser afetados pela cobertura vegetal (CONSTANTINE et al., 2014).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa se baseou principalmente em um conjunto de dados coletados entre 2021 e 2022 pelo projeto SPECTROSED e dados hidrológicos históricos de 1984 a 2022 do observatório Hybam. O SPECTROSED realizou amostragens para determinar a concentração de material em suspensão (MES), bem como medições de vazão (Q) e velocidade (V) do fluxo. Os dados utilizados foram processados em laboratório e em computadores, utilizando softwares específicos para manipular os resultados obtidos pelo ADCP e em sistema de informação geográfica (SIG). O fluxograma que apresenta o conjunto de dados e processamentos é apresentado na Figura 7.



**Figura 7:** Fluxograma das etapas de processamento e análise de dados de MES, Q, Qs e velocidade. **Fonte:** Adaptado de Marinho et al, 2021.

Para analisar a dinâmica temporal e espacial do material em suspensão (MES) nos pontos amostrais, foram utilizadas imagens da constelação de satélites PlanetScope, disponibilizados pelo Planet Education and Researcher Program. Com os dados em posse, aplicou-se o modelo utilizado por Santos (2022) para estimar, a partir da reflectância de superfície d'água, a concentração do material em suspensão (MES).

## 4.1 Dados primários

Os pontos de coleta e monitoramento foram escolhidos com base na disponibilidade de dados regularmente coletados pela Jirau Energia e pelas estações hidrométricas da rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA). O estudo utilizou dados das estações do Observatório Hybam, incluindo Cachuela Esperanza (CAE), localizada a cerca de 30 km da foz, Guayaramerin (GUA), situada a 53 km da foz, e Porto Velho (PTV), na cidade homônima. Os pontos de coleta de amostras em campo abrangeram um trecho de 230 km, desde a área de confluência dos rios Beni (BEN) e Mamoré (MAM) na fronteira com a Bolívia.

A seção Tamborete (TAM) foi selecionada devido à sua posição intermediária, aproximadamente 120 km da confluência dos rios, e à sua proximidade com a seção Estação (EST), localizada a montante da Usina Hidrelétrica (UHE) de Jirau. Além disso, TAM está a jusante do rio Abunã, permitindo avaliar a influência desse afluente na concentração de sedimentos e na dinâmica do rio até a barragem. A seção EST está próxima à hidrelétrica, no município de Porto Velho.

Dados de concentração de material em suspensão (MES), vazão (Q) e velocidade (V) foram coletados mensalmente desde março de 2021 (Tabela 03). Essas coletas ocorreram nas seções BEN e MAM, localizadas na foz dos rios Beni e Mamoré, e nas seções TAM e EST no rio Madeira, a jusante da confluência. O objetivo era obter uma série de dados abrangendo um ciclo hidrológico completo para analisar a dinâmica sazonal do rio na área de estudo, a montante do reservatório. Foram realizadas 13 campanhas amostrais entre março de 2021 e abril de 2022.

**Tabela 3:** Dados cadastrais das seções de medição nos rios Beni, Mamoré e Madeira em 2021-2022

Seção	Nome	Rio	Nº amostras MES (mg.L <sup>-1</sup> )	Nº medições Q (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )
BEN	Beni	Beni	39	11	280.43
MAM	Mamoré	Mamoré	39	11	636.93
TAM	Tamborete	Madeira	36	10	953.57
EST	Estação	Madeira	39	10	959.93

### 4.1.1 Coleta e processamento do material em suspensão (MES)

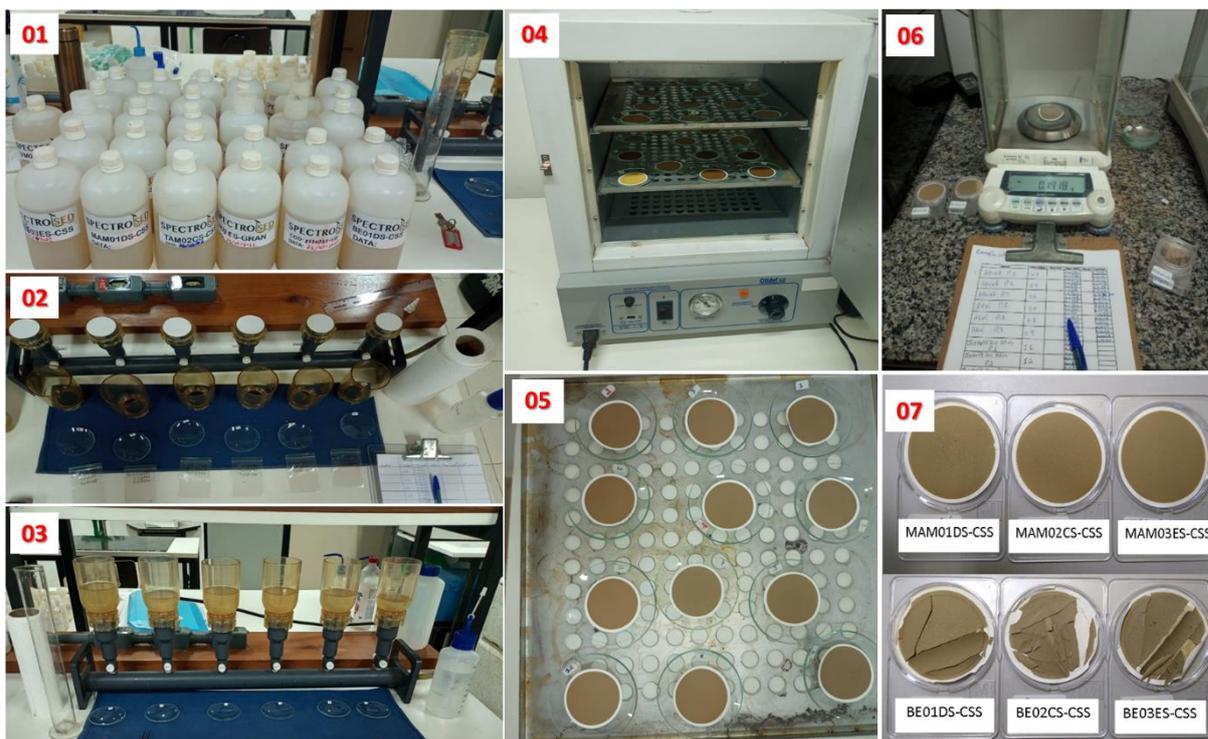
As amostras de água coletadas em campo para a determinação da concentração de material em suspensão (MES) foram obtidas manualmente, conforme ilustrado na Figura 08. A coleta foi realizada utilizando garrafas de 500 ml, com as amostras sendo retiradas da superfície,

a aproximadamente 20 cm de profundidade, em três posições ao longo da largura do canal fluvial: DS - 25% (margem direita), CS - 50% (centro) e ES - 75% (margem esquerda). Nessas mesmas posições, amostras também foram coletadas em diferentes profundidades, correspondendo a 25%, 50% e 75% da profundidade total da coluna d'água. Após a coleta, as amostras foram processadas no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geociências da UFAM.



**Figura 8:** Coleta de amostras de CSS no rio Madeira. **Fonte:** André Zumak, Dez/2021.

As amostras de água foram filtradas (Figura 9) para determinar a concentração do material em suspensão (MES) presente no canal. Neste estudo, seguiu-se o protocolo estabelecido pelo Observatório HYBAM (2023) para o processamento das amostras. Esse protocolo envolve o método de filtração de amostras de 500 ml de água coletadas a cada 10 dias, as quais foram processadas no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geociências da UFAM. Foi utilizado filtros de acetato de celulose de 0,45  $\mu$ m, previamente pesados. Após a passagem das amostras pelo filtro, este foi seco em estufa e pesado novamente. A diferença entre os pesos final e inicial proporcionou o peso da amostra, que foi ponderado pelo volume da amostra e calculado para um litro de volume.



**Figura 9:** Etapas dos processamentos de amostras para determinação da concentração do MES. **Fonte:** Ednaldo Severo Ano: 2022.

Os dados obtidos foram compilados e inseridos no banco de dados desenvolvido com os resultados das campanhas realizadas. Para os cálculos, foram empregadas as médias dos pesos iniciais e finais. A fórmula para a obtenção da concentração do material em suspensão é descrita pela Equação 1:

$$\text{MES} = ((\text{Pf}-\text{Pi}) * 1000000/\text{V}) \quad (1)$$

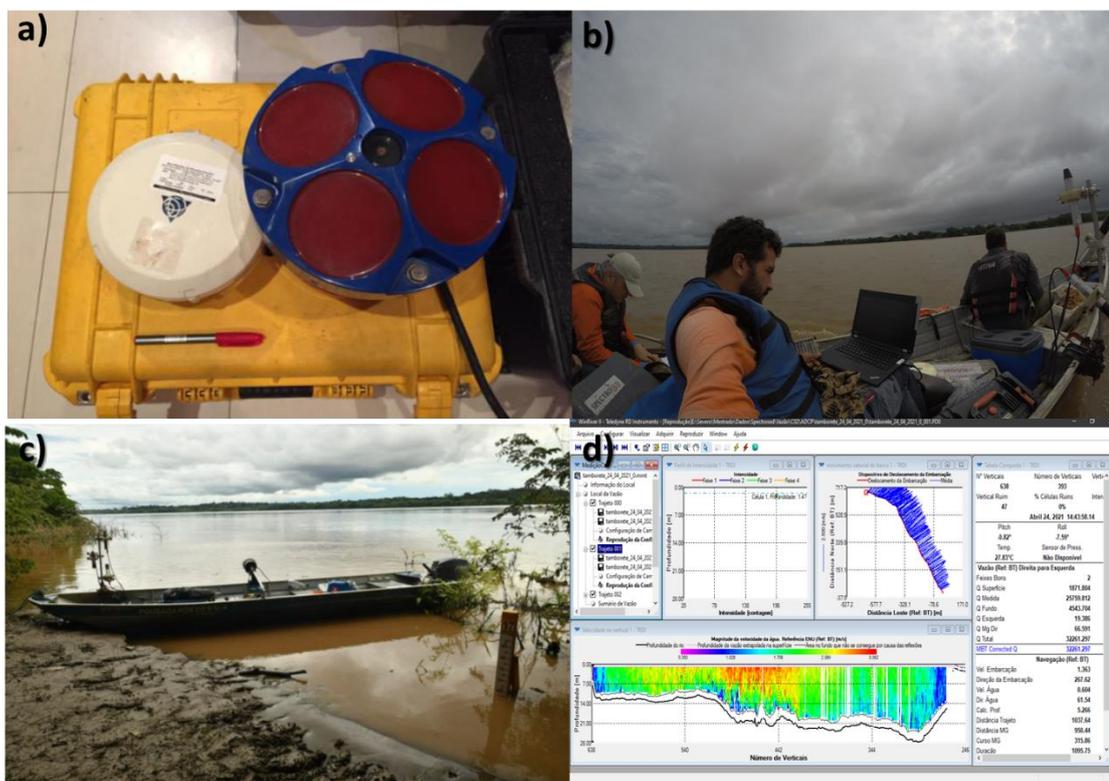
onde MES ( $\text{mg. L}^{-1}$ ) é determinada a partir da subtração dos pesos iniciais (Pi) e pesos finais (Pf) dos filtros, multiplicados por \*1000000 (fator de conversão) e dividido pelo volume de amostras filtrados (V).

#### 4.1.2 Medição ADCP

As medições de vazão e velocidade (figura 10) foram realizadas com um ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler – Correntômetro Acústico por Efeito Doppler) modelo Rio Grande, da RDI Instruments, com frequência de 600 kHz, instalado em uma embarcação local. Um GNSS Trimble R4 foi acoplado a esse equipamento. Em cada seção, foram realizadas de 2 a 4 travessias com o ADCP, e a média foi calculada para determinar a vazão correspondente à respectiva seção. O equipamento opera por meio do software WinRiver II (figura 10d), responsável pela aquisição e armazenamento em tempo real dos dados coletados pelo ADCP.

Simultaneamente, o receptor GNSS (conforme mostrado na figura 10a) fornece informações de posicionamento global via satélite.

Os vetores de velocidade e o retroespalhamento do sinal do ADCP foram processados por meio do software VMT - Velocity Mapping Tool, uma ferramenta especializada para a interpretação e representação dos dados de velocidade de fluxo em rios (PARSONS et al., 2013). Ele utiliza os dados coletados pelo ADCP para mapear a distribuição das velocidades e direções do fluxo em uma determinada área. Além disso, o VMT também processa o retroespalhamento do sinal do ADCP, que fornece informações sobre a presença e a distribuição de sedimentos na coluna d'água. Com essa análise conjunta, permite uma compreensão mais detalhada dos padrões de fluxo e sedimentação em rios, contribuindo para estudos hidrodinâmicos e ambientais.

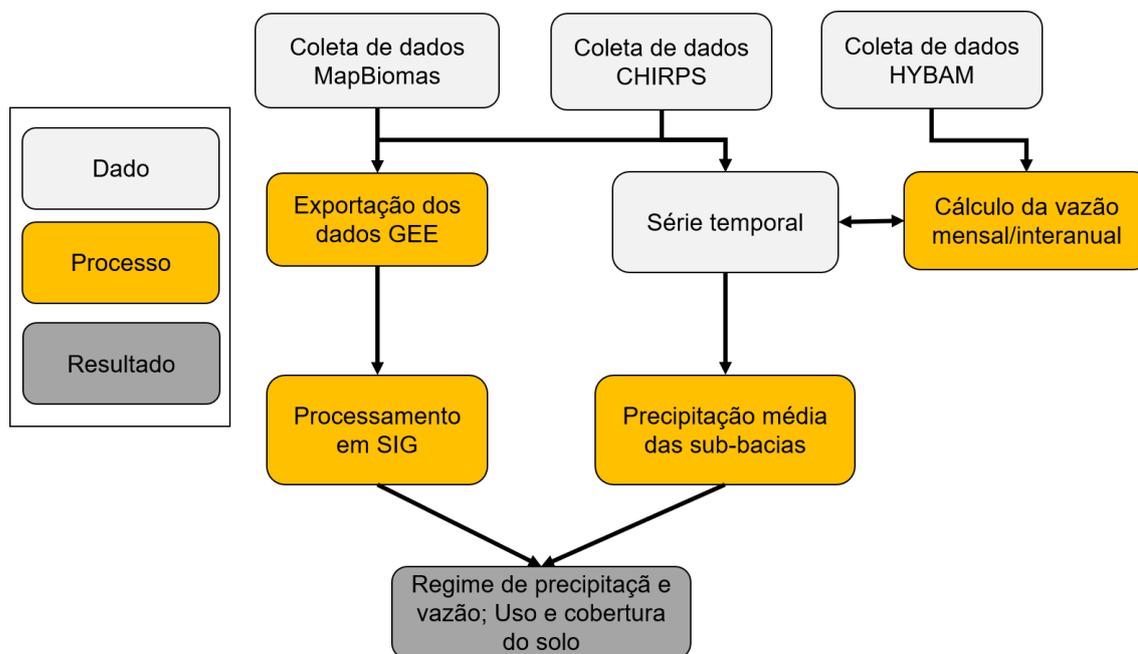


**Figura 10:** a) GNSS Trimble R4 e ADCP modelo Rio Grande, da RDI Instruments, com frequência de 600 kHz. b) Medição de Vazão. c) Embarcação usada durante os campos. d) Interface do Win River. **Fonte:** André Zumak, 2021.

## 4.2 Dados secundários

Os dados secundários (Uso e Cobertura do Solo, Precipitação, Vazão e Material em Suspensão) foram obtidos de três fontes principais: i) MapBiomás (2023), ii) Observatório HYBAM (2023) e iii) projeto CHIRPS (2023) v.2. Esses dados abrangem um período de 30

anos, de 1990 a 2020, e foram utilizados para analisar as alterações no uso e cobertura do solo, na precipitação, na vazão e no material em suspensão nas bacias dos rios Beni e Mamoré. Para alcançar o objetivo proposto, foram utilizadas diversas abordagens e técnicas de análise, conforme ilustrado na Figura 11 e descritas a seguir.



**Figura 11:** Fluxograma das etapas de processamento e análise dos dados Mapbiomas, HYBAM e CHIRPS.

Os dados do MapBiomas incluem informações detalhadas sobre o uso e cobertura do solo, disponibilizadas em formato raster, representando diferentes classes de uso ao longo dos anos. O processamento desses dados foi realizado na plataforma do Google Earth Engine (GEE) e, posteriormente, em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), permitindo a análise espacial e temporal das mudanças na cobertura do solo nas bacias do Beni e Mamoré.

Os dados de precipitação foram obtidos do projeto CHIRPS v.2, que combina informações de satélite e estações terrestres para fornecer dados de alta resolução espacial e temporal. Originalmente em formato raster, a série temporal compreende o período de 1990 a 2020 e foi utilizada para calcular a precipitação média para as sub-bacias.

Os dados hidrológicos, incluindo concentração de Material em Suspensão (MES) e Vazão (Q), foram obtidos do Observatório HYBAM (SO-HyBam – Service d'observation des ressources en eaux du bassin de l'Amazonie (obs-mip.fr)). Disponíveis em formato de série temporal, utilizou-se esses dados para caracterizar o regime hidrológico, realizar comparações

com os dados coletados em campo e os estimados por sensoriamento remoto. O cálculo da vazão mensal e interanual foi baseado nesses dados.

### **4.2.1 MapBiomias**

Para a análise das mudanças no uso da terra e cobertura do solo, foram utilizados os dados do programa MapBiomias coleção 4.0, disponíveis no endereço eletrônico: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1>. O recorte temporal abrangeu um período de 30 anos, compreendendo as décadas de 1990, 2000, 2010 e 2020.

Os dados do MapBiomias foram empregados para visualizar mudanças na paisagem das bacias dos rios Beni e Mamoré. Estes dados foram obtidos por meio do toolkit da plataforma Google Earth Engine (GEE). Essa plataforma do MapBiomias oferece informações detalhadas sobre a cobertura vegetal e as mudanças no uso da terra em diferentes biomas do continente sul-americano, possibilitando uma análise abrangente e precisa das transformações ocorridas na região (MapBiomias, 2019).

### **4.2.2 CHIRPS**

Os dados do Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS, 2023) foram utilizados para estimar a precipitação. Estes dados são derivados de imagens de satélite. O CHIRPS é um raster georreferenciado que combina dados de satélite com informações provenientes de estações meteorológicas, fornecendo dados confiáveis sobre os padrões de chuva em nível global (FUNK et al., 2015). Os dados do CHIRPS acessíveis em [https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global\\_daily/](https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/).

### **4.2.3 Observatório HYBAM**

Os dados referentes à concentração de material em suspensão (MES) e vazão (Q) provenientes do Observatório HYBAM foram usados para a análise do regime hidrológico nos rios Beni, Mamoré e Madeira. Em particular os dados de concentração de MES e Q das estações de Cachuela Esperanza no rio Beni, Guayaramerin no rio Mamoré e Porto Velho no rio Madeira (Tabela 4), devido à sua localização a montante e jusante da confluência. Essas estações também apresentam uma longa e consistente série de dados, possibilitando a construção do regime hidrológico mensal naqueles canais ao longo do período de 1984 a 2022. Com base nesse conjunto de dados, foi possível visualizar as características hidrológicas dos rios, abrangendo

diferentes períodos hidrológicos. Na tabela subsequente, encontram-se os dados cadastrais das estações utilizadas.

**Tabela 4:** Dados cadastrais das estações HYBAM.

<b>Código</b>	<b>Estação</b>	<b>Sigla</b>	<b>Rio</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
15295500	Cachuela Esperanza	CAE	Beni	10°32'13.92"S	65°35'4.92"O
15250010	Guayaramerin	GUA	Mamoré	10°48'45.00"S	65°20'33.97"O
15400000	Porto Velho	PTV	Madeira	08°44'53.88"S	63°55'0.84"O

### 4.3 Processamento e análise dos dados

A análise da variabilidade espacial e temporal da concentração de material em suspensão por satélite (MES<sub>s</sub>) foi conduzida com base nas datas listadas na Tabela 5, abrangendo períodos de águas altas e baixas, utilizando um conjunto de imagens da constelação de satélites PlanetScope. Os satélites da constelação PlanetScope, operados pela empresa Planet Labs, são usados para capturar imagens de alta resolução da superfície terrestre (PLANET, 2024). A segunda geração de satélites PlanetScope, conhecida como PS2, é equipada com sensores multiespectrais que capturam dados em várias bandas espectrais, incluindo o visível e o infravermelho próximo. As características dos sensores Planet Dove e Planet Super Dove são descritas abaixo.

**Tabela 5:** Datas das imagens, período hidrológico características dos satélites.

<b>Data</b>	<b>Período</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Satélite ID</b>
17/03/2021	Águas Altas	PS2	101f
27/05/2021	Águas Altas	PSB.SD	2441
16/08/2021	Águas Baixas	PSB.SD	2423
31/10/2021	Águas Baixas	PSB.SD	2423

O identificador "101f" especifica um satélite particular dentro dessa geração. Já os satélites designados como PSB.SD pertencem ao PlanetScope Block 3, uma versão aprimorada com sensores de imagem de alta resolução e melhorias na qualidade dos dados. Os identificadores "2441" e "2423" se referem a satélites específicos dentro desse grupo. Essas características são fundamentais para entender a capacidade desses satélites em fornecer

imagens detalhadas, essenciais para o monitoramento da superfície terrestre e a análise dos períodos hidrológicos.

Com base neste conjunto de informações, foi construído um banco de dados em planilha eletrônica de cálculo, contendo informações de vazão (Q), velocidade (V) e material em suspensão (MES) obtidas durante as campanhas de campo, além de dados secundários, como séries históricas e imagens de satélite. Posteriormente, foi aplicado um modelo estatístico adaptado de estudos anteriores por Santos (2022) para estimar as Concentrações de Material em Suspensão (MES) a partir dos dados de reflectância obtidos das imagens do satélite Sentinel-2 para o rio Madeira, a montante da UHE de Jirau. No presente estudo, foi utilizado o modelo descrito a seguir para estimar a concentração de sedimentos em suspensão por satélite (MES<sub>s</sub>) com base nas imagens do PlanetScope.

Para calcular a concentração de material em suspensão (MES<sub>s</sub>) a partir da reflectância de superfície (R<sub>rs</sub>) por satélite, foram utilizadas imagens das bandas do vermelho (640-680 nm) e infravermelho próximo (840-880 nm), harmonizadas para garantir a consistência radiométrica com o satélite Sentinel-2 (PLANET, 2024). Neste estudo, aplicou-se a equação descrita por Santos (2022) para estimar a MES utilizando imagens do PlanetScope:

$$MES_s = 945,1 * \frac{b4^{1,9463}}{b3} \quad (2)$$

onde MES<sub>s</sub> é a concentração de Material em Suspensão estimada por Satélite (MES<sub>s</sub>), b4 a banda do infravermelho próximo, b3 a banda do vermelho. A aplicação desta equação permite estimar a concentração MES<sub>s</sub> na água a partir de dados de reflectância por satélite, possibilitando um monitoramento contínuo da dinâmica hidrossedimentar tanto espacial quanto temporal do rio Madeira.

No entanto, a precisão das estimativas pode ser afetada por fatores como a presença de nuvens e a variabilidade óptica da água (MARTINEZ et al., 2015). Comparado com métodos tradicionais de campo, o sensoriamento remoto oferece maior área de monitoramento, mas pode apresentar discrepâncias devido a diferenças de calibração e características fisiográficas da região. Além disso, a equação foi adaptada especificamente para a bacia do rio Madeira, no trecho a montante da UHE de Jirau, o que pode limitar sua aplicação em outras regiões ou tipos de rios com diferentes características sem os devidos ajustes.

Os dados de descarga líquida e material em suspensão (MES) coletados em campo,

foram utilizados para calcular a descarga sólida ( $Q_s$ ), conforme a Equação 3. O transporte médio anual de sedimentos ( $Q_{sa}$ ) e a produção específica de sedimentos ( $Q_{sp}$ ) do rio Madeira na área estudada foram definidos por meio das Equações 4 e 5.

$$Q_s = Q \times \text{MES} \times 0,0864 \quad (3)$$

$$Q_{sa} = Q_s \times 365 \quad (4)$$

$$Q_{sp} = Q_{sa} / A_b \quad (5)$$

onde  $Q$  representa a descarga líquida da seção ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\text{MES}$  representa a concentração do material em suspensão na água ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), e o fator de conversão 0,0864 é utilizado para transformar as unidades para toneladas por dia (ton/dia), conforme Filizola e Guyot (2011).  $A_b$  refere-se à área da bacia dos rios Beni, Mamoré e Madeira até a seção EST, respectivamente com valores de 280.000, 636.000 e 959.000  $\text{km}^2$ .

O conjunto de dados de  $\text{MES}$ ,  $Q$  e  $Q_s$  foi processado em planilha eletrônica de cálculo, possibilitando a estimativa de valores de fluxo médios, mínimos e máximos das 13 campanhas de coletas e do observatório HYBAM, bem como a mensuração de seu volume d'água e sedimentos para o período

## 5. RESULTADOS

Os resultados obtidos e sua discussão são apresentados na seguinte sequência: i) Análise das mudanças no uso e cobertura do solo e na precipitação na bacia dos rios Beni e Mamoré; ii) Balanço hidrossedimentológico na região de confluência entre os rios Beni e Mamoré; iii) Avaliação do uso de imagens do PlanetScope para monitoramento de Material em Suspensão nos rios Beni e Mamoré.

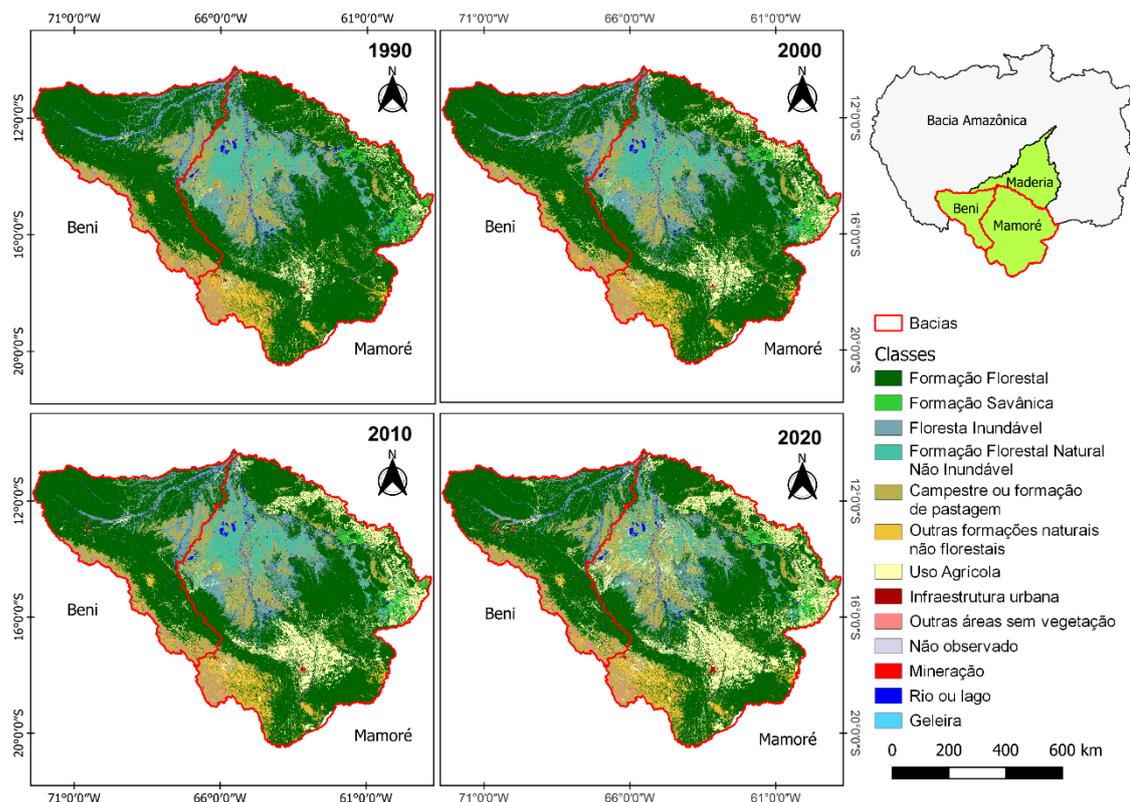
### 5.1 Análise das mudanças no uso e cobertura do solo na bacia dos rios Beni e Mamoré

A Tabela 6 apresenta os dados referentes à distribuição das diferentes classes de uso e cobertura do solo ao longo dos anos de 1990, 2000, 2010 e 2020, permitindo uma visão geral das mudanças na paisagem na região em estudo. Durante esse período, observou-se transformações como o aumento das áreas destinadas para uso agrícola, aumento da infraestrutura urbana, redução da formação florestal e inundável, por exemplo.

**Tabela 6:** Distribuição das classes de cobertura do solo (1990-2020) nas bacias dos rios Beni e Mamoré. Valores em km<sup>2</sup>.

Nome	1990	2000	2010	2020
Formação Florestal	552.754	524.661	504.750	502.471
Formação Savana	11.778	11.250	10.712	9.985
Floresta Inundável	87.551	88.672	85.561	66.322
Formação Florestal Natural Não Inundável	55.907	59.838	59.273	34.721
Campestre ou formação de pastagem	116.669	111.506	111.633	124.798
Outras formações naturais não florestais	31.487	31.302	30.822	29.748
Uso Agrícola	35.014	64.323	88.647	122.330
Infraestrutura urbana	1.029	1.179	1.378	1.557
Outra área sem vegetação	11.351	11.499	11.749	12.419
não observado	4	5	5	6
Mineração	56	85	293	597
Rio e lago	11.734	11.115	10.702	10.633
Geleira	575	474	385	324
<b>ÁREA TOTAL (km<sup>2</sup>)</b>			<b>915.909</b>	

Os principais impulsionadores dessas mudanças ocorrem devido ao desmatamento na região leste da Bolívia (Figura 12), no processo de expansão da fronteira agrícola, com destaque para a produção de soja e pecuária, construção de estradas, exploração madeireira ilegal, a falta de governança territorial. Este processo é resultado da carência de alternativas econômicas para as comunidades locais (KILLEEN et al., 2007).



**Figura 12:** Mudanças no uso e cobertura nas bacias dos rios Beni e Mamoré entre 1990-2020.

Destaca-se a redução da área de "Formação Florestal", que passou de 552.754 km<sup>2</sup> em 1990 para 502.471 km<sup>2</sup> em 2020, representando uma redução de 9.1%. Áreas de "Formação Savana" também apresentou redução de 15%, passando de 11.778 km<sup>2</sup> em 1990 para 9.985 km<sup>2</sup> em 2020. Na classe "Floresta Inundável", ocorreram fortes mudanças que apresentou a redução mais acentuada, de 24.3%, passando de 87.551 km<sup>2</sup> em 1990 para 66.322 km<sup>2</sup> em 2020, e na área de "Formação Florestal Natural Não Inundável" que apresentou redução de 37.9%, passando de 55.907 km<sup>2</sup> em 1990 para 34.721km<sup>2</sup> em 2020.

Por outro lado, observou-se um aumento expressivo nas áreas ocupadas pelas classes "Campestre ou formação de pastagem" e "Uso Agrícola". A primeira apresentou um crescimento de 7%, passando de 116.669 km<sup>2</sup> em 1990 para 124.798 km<sup>2</sup> em 2020, enquanto a segunda teve um crescimento de 249.1%, passando de 35.014 km<sup>2</sup> em 1990 para 122.330 km<sup>2</sup> em 2020. As classes "Infraestrutura urbana" e "Mineração" também apresentaram aumentos no período analisado, refletindo o crescimento das atividades humanas na região. A primeira teve um aumento de 51.3%, passando de 1029 km<sup>2</sup> em 1990 para 1557 km<sup>2</sup> em 2020, enquanto a segunda registrou um crescimento de 965%, passando de 56 km<sup>2</sup> em 1990 para 597 km<sup>2</sup> em 2020.

Essas mudanças na paisagem têm implicações diretas na biodiversidade e no equilíbrio ambiental da região, destacando a necessidade urgente de implementar políticas de manejo sustentável e conservação dos recursos naturais. As mudanças no uso da terra na Bolívia são influenciadas por diversos fatores, como políticas econômicas neoliberais, expansão da produção de culturas comerciais, construção de estradas e o modelo de criação de gado (REDO; AIDE; CLARK, 2012).

A expansão das áreas de pastagem e agricultura, assim como o crescimento das áreas urbanas e das atividades mineradoras, podem causar impactos significativos e evidenciam a importância de promover o desenvolvimento sustentável, com o objetivo de preservar a biodiversidade, os ecossistemas e garantir a qualidade da água e de vida das futuras gerações (KILLEEN et al., 2008).

Para facilitar a análise as classes de cobertura do solo referentes aos recursos hídricos e do uso antrópico, foram agrupadas em categorias mais abrangentes. As áreas relacionadas à formação florestal, formação savana, floresta inundável, formação florestal natural não inundável, campestre ou formação de pastagem, outras formações naturais não florestais, outra área sem vegetação e não observado foram agregadas à categoria "Coberturas Naturais".

Por sua vez, as áreas correspondentes a rios, lagos ou oceanos foram agrupadas sob a categoria "Recursos Hídricos". As áreas de uso agrícola, infraestrutura urbana e mineração foram classificadas como "Uso Antropogênico". Esse agrupamento de classes apresentado na Tabela 7 permitiu análise mais ampla e direcionada em relação as mudanças relacionadas a paisagem fluvial e a produção do espaço pelo homem, o que facilita a compreensão dos padrões e tendências observados.

**Tabela 7:** Variação espacial e temporal nas Sub-bacias do rio Madeira analisadas.

Nome	1990		2000		2010		2020	
	Beni	Mamoré	Beni	Mamoré	Beni	Mamoré	Beni	Mamoré
Recursos Hídricos	3.235	9.075	3.287	8.303	3.215	7.872	3.275	7.682
Uso Antrópico	3.517	32.584	4.628	60.963	6.221	84.101	10.326	114.163
Coberturas Naturais	273.461	594.052	272.297	566.446	270.776	543.739	266.611	513.866
<b>Area total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>280.212</b>	<b>635.712</b>	<b>280.212</b>	<b>635.712</b>	<b>280.212</b>	<b>635.712</b>	<b>280.212</b>	<b>635.712</b>
Recursos Hídricos	1,15%	1,43%	1,17%	1,31%	1,15%	1,24%	1,17%	1,21%
Uso Antrópico	1,25%	5,13%	1,65%	9,59%	2,22%	13,23%	3,69%	17,96%
Coberturas Naturais	97,59%	93,45%	97,18%	89,10%	96,63%	85,53%	95,15%	80,83%
<b>Total (%)</b>	<b>100%</b>							

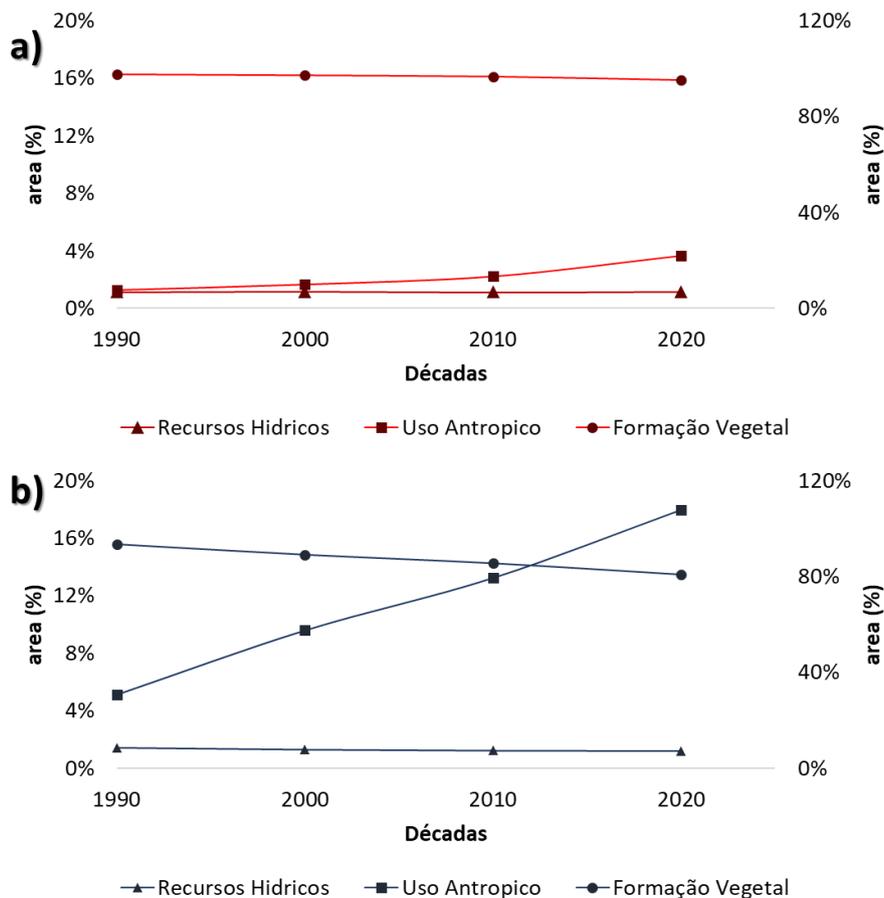
Ao longo das décadas observou-se uma redução na extensão dos recursos hídricos de 0,21% na bacia do Mamoré e aumento de 0,02% no Beni. Esse padrão sugere possíveis impactos nas disponibilidades e na qualidade dos recursos hídricos da região. Por outro lado,

um expressivo aumento no uso antrópico da área também foi observado. Essa expansão da ocupação humana nas bacias do Beni e Mamoré, reflete a intensificação de atividades como agricultura, pecuária, infraestrutura urbana e industrialização, resultando em transformações expressivas na paisagem e possíveis implicações para a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos.

Essas mudanças na paisagem ocorreu devido as políticas de ajuste estrutural da Bolívia que tiveram impactos no meio ambiente, contribuindo para o desmatamento em grande escala, principalmente para a produção de soja destinada à exportação (KAIMOWITZ; THIELE; PACHECO, 1999). No que diz respeito às coberturas naturais, observa-se uma redução gradual de sua área ao longo do tempo. Na bacia do Beni, os valores aumentaram de 273.461 km<sup>2</sup> em 1990 para 266,611 km<sup>2</sup> em 2020 indicam perdas de 2,44% da vegetação natural. Na bacia do rio Mamoré essa perda ocorreu de forma mais acentuada, em 1990 possui uma área de 594.052 km<sup>2</sup>, passando para 513.866 km<sup>2</sup> em 2020, uma perda de 12,62% de sua área.

Esse processo pode ser relacionado a dinâmica de desmatamento do leste boliviano, onde está situado a bacia do rio Mamoré (Figura 13 b). De acordo com Killeen et al., (2007) isso ocorre devido a expansão da fronteira agrícola, especialmente para a produção de soja e pecuária, exploração madeireira, conversão de áreas florestais em pastagens, representando uma ameaça à conservação da biodiversidade e aos serviços ecossistêmicos.

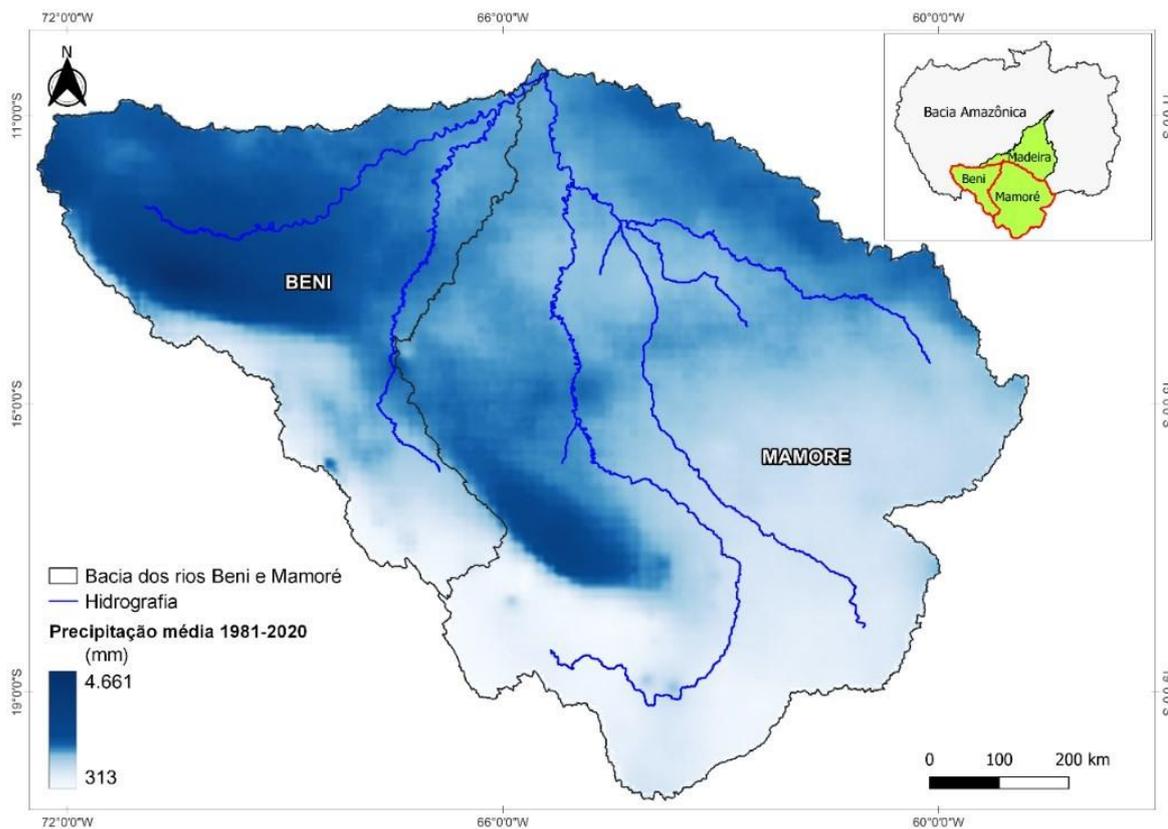
Essas alterações, conforme apresentado na Figura 13 a) e b), fornecem uma perspectiva sobre a proporção relativa das diferentes classes de cobertura do solo e são indicativos da intensificação das atividades humanas e das transformações nos ecossistemas locais nas bacias dos rios Beni e Mamoré.



**Figura 13:** Transições das classes de uso e cobertura do solo na área de estudo. A) Bacia do Rio Beni; B) Bacia do Rio Mamoré. No eixo Y da esquerda os valores de porcentagem são referentes às classes de Recursos Hídricos e Uso Antrópico, e na direita, para Formação Vegetal.

Os resultados apresentados na Tabela 7 e Figura 13 a) e b) demonstram as mudanças espaciais e temporais de uso e cobertura do solo na área estudada. Essas informações são importantes para compreender processos de transformação nestas paisagens, bem como apoiar elaboração de estratégias e políticas eficazes de conservação e manejo sustentável dos recursos naturais. Conforme Killeen et al., (2008) medidas como fortalecer a governança territorial e os direitos das comunidades locais, implementar mecanismos de compensação financeira, melhorar a fiscalização e aplicação da lei, promover práticas agrícolas sustentáveis, investir em tecnologias de monitoramento remoto e desenvolver políticas públicas para conservação e restauração são essenciais para enfrentar o desmatamento e conservar a biodiversidade.

Para o mesmo período foram analisados os regimes de precipitação afim de comparar os dados de precipitação com as mudanças ocorridas no uso e cobertura do solo nas respectivas bacias, conforme apresentado na tabela 8 e Figura 14.



**Figura 14:** Precipitação média acumulada anual para o período de 1981 a 2020.

A análise espacial da precipitação na bacia do rio Beni (Figura 14) indica que a maior média anual de precipitação excede 4000 mm em grande parte da região, especialmente na área drenada pelo rio Madre de Dios. Por outro lado, a bacia do rio Mamoré também apresenta áreas de precipitação intensa, com valores superiores a 4000 mm por ano. No entanto, as nascentes dos rios San Miguel, Guaporé e o próprio canal principal recebem uma menor quantidade de chuvas ao longo de seu curso situado na porção mais ao sul e leste.

Esses resultados detalham as regiões de maior concentração de precipitação dentro das bacias, complementando os dados médios anuais apresentados anteriormente, onde a bacia do rio Beni tinha uma média anual de 1900 mm e a bacia do rio Mamoré, 1350 mm. A discrepância entre os valores médios anual e os picos de precipitação observados espacialmente destaca a variabilidade dentro das bacias. Além disso, é importante notar que as áreas no leste da Bolívia enfrentam desmatamento e expansão agrícola, influenciadas pelas políticas nacionais, contribuindo de forma substancial para o desmatamento e produção de soja para exportação, além da degradação florestal causada pelas empresas madeireiras (KAIMOWITZ; THIELE; PACHECO, 1999).

Na bacia do rio Mamoré (Tabela 8), observou-se manutenção nas médias de precipitação ao longo das décadas. Os meses de janeiro, fevereiro e dezembro apresentaram as

maiores médias, enquanto os meses de março, abril e maio apresentaram menores valores. Esses padrões sugerem uma sazonalidade na distribuição da chuva, com os meses de verão no Hemisfério Sul apresentando maior precipitação. Destaca-se a redução na média de precipitação nos meses de junho e julho ao longo das décadas analisadas.

**Tabela 8:** Precipitação média mensal nas Sub-bacias do rio Madeira analisadas.

<b>Bacia do rio Mamoré (mm)</b>												
<b>Décadas</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
<b>1990-2000</b>	217	187	178	88	56	33	20	29	58	96	152	179
<b>2001-2010</b>	240	207	182	100	58	25	24	26	51	113	141	205
<b>2011-2021</b>	229	217	172	111	75	34	19	30	49	91	154	209
<b>1990-2021</b>	228	203	178	100	63	31	21	28	53	100	149	198
<b>Média Geral</b>	228	203	178	100	63	31	21	28	53	100	149	198

<b>Bacia do rio Beni (mm)</b>												
<b>Décadas</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
<b>1990-2000</b>	220	195	181	95	57	30	23	28	57	108	151	195
<b>2001-2010</b>	237	224	186	105	69	29	22	27	47	97	138	196
<b>2011-2021</b>	231	203	170	106	67	33	19	31	50	95	158	213
<b>1990-2021</b>	229	207	180	101	64	31	22	28	52	100	149	201
<b>Média Geral</b>	229	207	180	101	64	31	22	28	52	100	149	201

Na bacia do rio Beni, observou-se uma tendência semelhante em relação à sazonalidade da precipitação. Os meses de janeiro, fevereiro e dezembro também apresentaram as maiores médias de precipitação, enquanto os meses de março, abril e maio mostraram médias mais baixas. No entanto, em comparação com a bacia do rio Mamoré, a bacia do rio Beni apresentou médias de precipitação ligeiramente mais elevadas em alguns meses, como junho, julho e setembro.

A comparação entre as duas bacias expõe semelhanças nos padrões sazonais de precipitação. Ambas possuem maior precipitação nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro, caracterizando um período chuvoso. Além disso, ambas mostram uma redução na precipitação durante os meses intermediários, principalmente março, abril e maio. No entanto, as médias de precipitação na bacia do rio Beni parecem ser ligeiramente mais altas em alguns meses em comparação com a bacia do rio Mamoré.

Com base nos dados apresentados na Tabela 8 não é possível afirmar de forma conclusiva se existe uma tendência clara de aumento ou redução na precipitação média mensal nas bacias dos rios Mamoré e Beni. As variações ao longo das décadas são relativamente

pequenas e não seguem um padrão consistente. Entretanto, Rivera et al. (2021) apontaram uma redução na precipitação no mês de janeiro, contudo, no presente estudo, essa redução não foi observada ao analisar as médias por décadas. A divergência pode ser atribuída à diferença na abordagem metodológica, enquanto este estudo analisou as médias decadais, Rivera et al. (2021) focaram na variabilidade interanual, utilizando testes estatísticos como o de Mann-Kendall para detectar tendências significativas nas séries temporais.

Além disso, Rivera et al. (2021) utilizaram um conjunto de dados homogenizado de estações meteorológicas na Bolívia, elaborado por Hunziker et al., (2017) para o período de 2003 a 2013, o que pode ter contribuído para uma maior precisão nas análises de precipitação na região. Os autores apontaram que as variações na precipitação nas áreas andinas das bacias do Beni e Madre de Dios, assim como na sub-bacia do Guaporé, mostraram tendências negativas, embora a significância dessas tendências tenha variado.

Apesar de algumas décadas apresentem valores ligeiramente mais elevados ou baixos em determinados meses, não é possível estabelecer uma tendência notável de longo prazo. Essa falta de tendência pode ser atribuída a fatores como a variabilidade natural do clima, a influência de fenômenos climáticos de curto prazo e a complexidade dos sistemas climáticos regionais (SOUZA et al., 2022).

No entanto, é importante considerar que o manejo e as mudanças no uso e cobertura do solo em uma bacia podem desempenhar um papel importante na preservação dos recursos hídricos, mas isso requer análises e estudos mais detalhados (CARVALHO; BRUMATTI; DIAS, 2012). Segundo Latrubesse et al., (2017), as políticas de gestão de bacias em andamento na Amazônia ainda são incipientes, mas o MAP reflete algumas das ações de governança que estão sendo buscadas para enfrentar os desafios ambientais. O MAP é uma área de cooperação entre o Peru (Madre de Dios), o Brasil (Acre) e a Bolívia (Pando), focada na gestão e conservação dos recursos naturais, desenvolvimento sustentável e cooperação transfronteiriça.

Portanto, para determinar com maior precisão qualquer tendência de longo prazo na precipitação das duas bacias e sua possível relação com as mudanças no uso e cobertura do solo, é necessário realizar estudos mais abrangentes, com um período de observação mais extenso e considerando outros aspectos relevantes, como os padrões climáticos regionais e eventos climáticos extremos.

Do ponto de vista das vazões, as estações de Cachuela Esperanza no rio Beni e Guayaramerin no Mamoré (Tabela 9) não demonstram uma tendência clara e consistente de redução ou aumento. Embora os valores médios de vazão (Q) nesses canais exibam certa

variabilidade ao longo dos anos, as pequenas flutuações são consideradas normais e podem estar associadas a uma possível maior incidência de eventos extremos durante o período analisado.

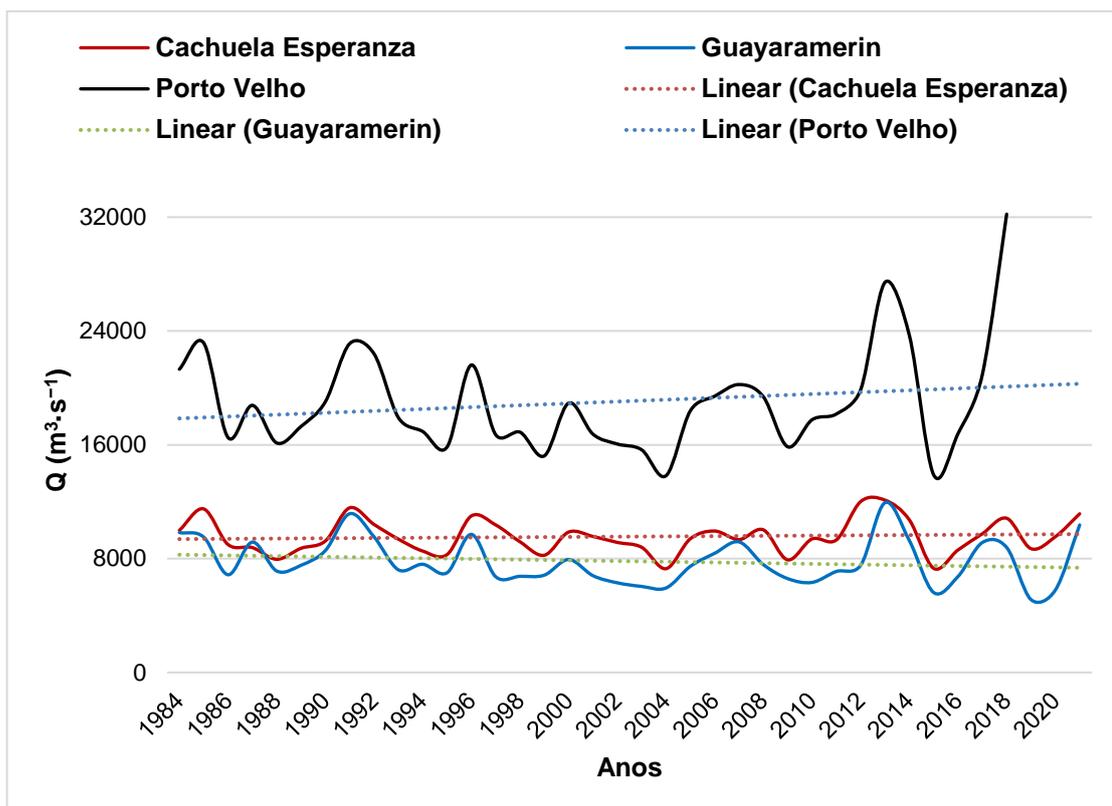
**Tabela 9:** Comparação da redução entre os dados Mapbiomas e Hybam.

Classe e Estação	1990	2000	2010	2020	Diferença	
					Area e Volume	%
<b>Recursos Hídricos (km<sup>2</sup>)</b>	12.310	11.589	11.088	10.957	-1.353	-10,99%
<b>Cachuela Esperanza (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	9.167	9.619	9.127	9.954	-787	-8,58%
<b>Guayaramerin (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	7.790	8.111	7.221	7.810	-20	-0,26%

Conforme mostrado na Tabela 9, a área de recursos hídricos mapeada pelo MapBiomas diminuiu cerca de 11%. Essa categoria inclui rios, lagos e áreas úmidas. No entanto, essa redução na área mapeada não corresponde a uma diminuição nos volumes de vazão registrados nas estações de Cachuela Esperanza e Guayaramerin. A redução na área pode estar relacionada a mudanças na visibilidade superficial da água, influenciada por fatores como uso do solo, variações climáticas temporárias na aquisição de imagens ou diferenças na metodologia de mapeamento, sem necessariamente indicar uma menor quantidade de água na bacia.

A Figura 15 apresenta as vazões médias nas estações de monitoramento de Cachuela Esperanza e Guayaramerin, localizadas nos rios Beni e Mamoré, respectivamente. A vazão média desses canais é da ordem de 9578 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> e 7847 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, com variações entre 6000 e 12000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Embora os picos médios se aproximem de 12000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, ambos os canais não demonstram tendências fortes de aumento ou redução expressiva, conforme indicado pelos dados do MapBiomas para os recursos hídricos.

Somando-se as vazões médias de Cachuela Esperanza e Guayaramerin, obtém-se um total de aproximadamente 17.425 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Comparativamente, a vazão média anual do rio Madeira em Porto Velho é de 19.103 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, variando entre 14.000 e 32.000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> ao longo de toda a série. Essa diferença indica uma contribuição adicional significativa de afluentes como o rio Abunã e canais menores ao longo do curso do rio Madeira, que eleva a vazão até Porto Velho.



**Figura 15:** Variabilidade interanual dos valores médios de vazão dos rios Beni, Mamoré e Madeira nas estações de Cachuela Esperanza, Guayaramerin e Porto Velho no período de 1984 a 2022. Os dados utilizados representam médias anuais de vazão e foram obtidos a partir do projeto Hybam.

A expansão das áreas destinadas ao uso humano e a redução das coberturas naturais podem estar exercendo influência sobre o processo de evapotranspiração. Quando a cobertura natural é reduzida, isso tende a favorecer um aumento no escoamento superficial. No entanto, a expectativa seria de que esse aumento no escoamento fosse refletido nas medições de vazão nas estações terrenas. Contudo, os dados coletados nessas estações não corroboram para uma tendência significativa, assim como observado por Rivera et al. (2019) para as estações de Cachuela Esperanza e Porto Velho. Portanto, é necessário realizar uma avaliação mais detalhada do uso dos dados estimados por sensoriamento remoto, especialmente em relação à classe correspondente à massa d'água, a fim de analisar possíveis mudanças nos canais fluviais.

## 5.2 Análise da descarga líquida e sólida na confluência dos rios Beni e Mamoré

A Figura 16 apresenta o regime mensal de vazão (Q) em três diferentes estações hidrométricas do Hybam: Cachuela Esperanza, Guayaramerin e Porto Velho, com dados coletados no período de 1984 a 2022. A vazão média anual nessas estações é de  $9.578 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  em Cachuela Esperanza,  $7.847 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  em Guayaramerin e  $18.842 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  em Porto Velho, valores próximos aos apresentados por (GUYOT et al., 1996). Durante o período de águas altas, a vazão em Cachuela Esperanza é cerca de 91% maior que a média anual, enquanto nas águas baixas, ela é 69% menor. Nas outras estações, o comportamento é semelhante, com um aumento de cerca de 80% e 92% nas águas altas e uma redução mais acentuada nas águas baixas, de 79% e 71% para Guayaramerin e Porto Velho, respectivamente.

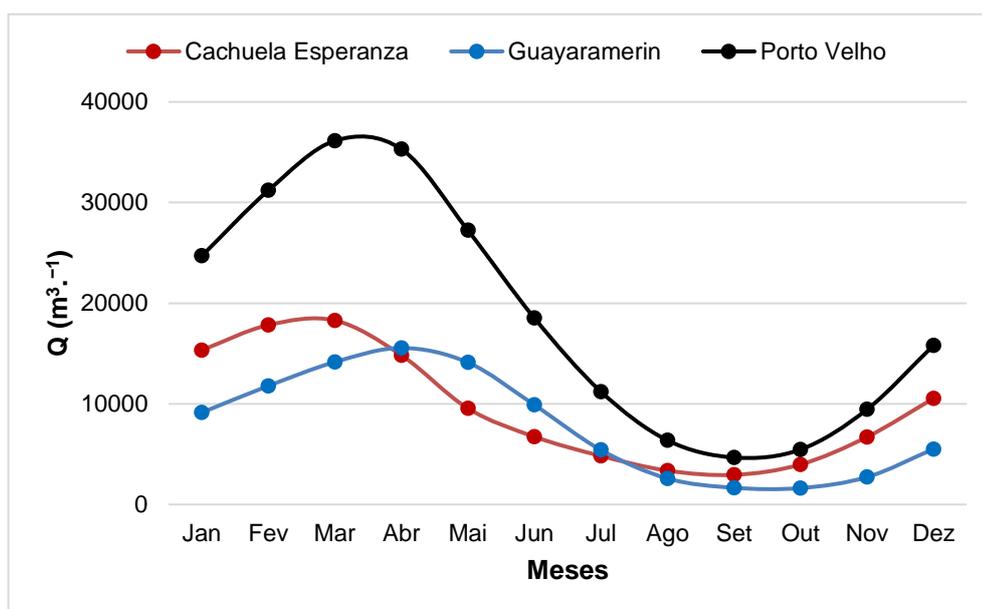


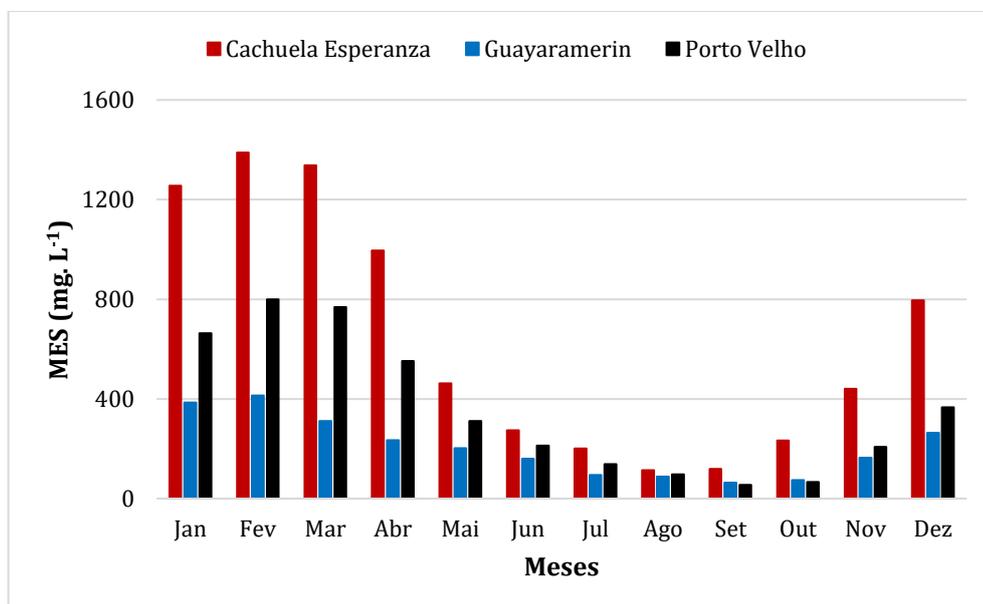
Figura 16: Regimes mensais de Q ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ).

Em Cachuela Esperanza, o período de águas altas ocorre em março, com vazão média de  $18.286 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , enquanto em Guayaramerin, o pico de vazão ocorre em abril, com  $15.552 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , um mês após o pico do rio Beni. Esse comportamento observado nessas duas estações se reflete em Porto Velho, que apresenta valores de vazão semelhantes nos meses de março e abril, devido à contribuição tardia do rio Mamoré, com  $36.139 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  e  $35.305 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , respectivamente.

O mesmo comportamento é observado no período de águas baixas. Em Cachuela Esperanza, o menor valor de vazão ocorre em setembro, com uma média de  $2.946 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ . No

rio Mamoré, em Guayaramerin, a defasagem de um mês se mantém, com a menor vazão ocorrendo em outubro, a  $1.635 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Entretanto, em Porto Velho, o menor valor de vazão registrado é em setembro, com  $4.672 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ . Em outubro, a vazão se mantém baixa devido à pouca contribuição do rio Mamoré, iniciando uma subida mais acentuada em novembro.

A figura 17 apresenta informações mensais sobre a concentração média de material em suspensão (MES) em três estações chaves do Observatório Hybam para monitoramento ao longo do ano nos rios Beni, Mamoré e Madeira. Os valores estão expressos em miligramas por litro ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), representando a quantidade de sedimento suspenso presente na água nas estações de Cachuela Esperanza no rio Beni, Guayaramerin no rio Mamoré, e Porto Velho no rio Madeira.



**Figura 17:** Regime mensal da concentração de material em suspensão. O período de dados abrange 1984 a 2018 para Cachuela Esperanza e 1995 a 2023 para Guayaramerin e Porto Velho.

Os meses de julho, agosto e setembro apresentam concentrações mais baixas de sedimentos em suspensão, com valores mínimos observados em setembro nas três estações analisadas. Em setembro, a estação de Cachuela Esperanza registra uma concentração média superficial de  $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , Guayaramerin com cerca de  $64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , e Porto Velho com o menor valor de  $55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Esses dados, obtidos a partir da rede HYBAM, refletem um período em que as chuvas são escassas, o que resulta em uma diminuição na capacidade de transporte de sedimento suspenso. É importante destacar que os valores aqui apresentados referem-se às concentrações da MES na superfície, não considerando a variação da concentração ao longo da profundidade da coluna d'água.

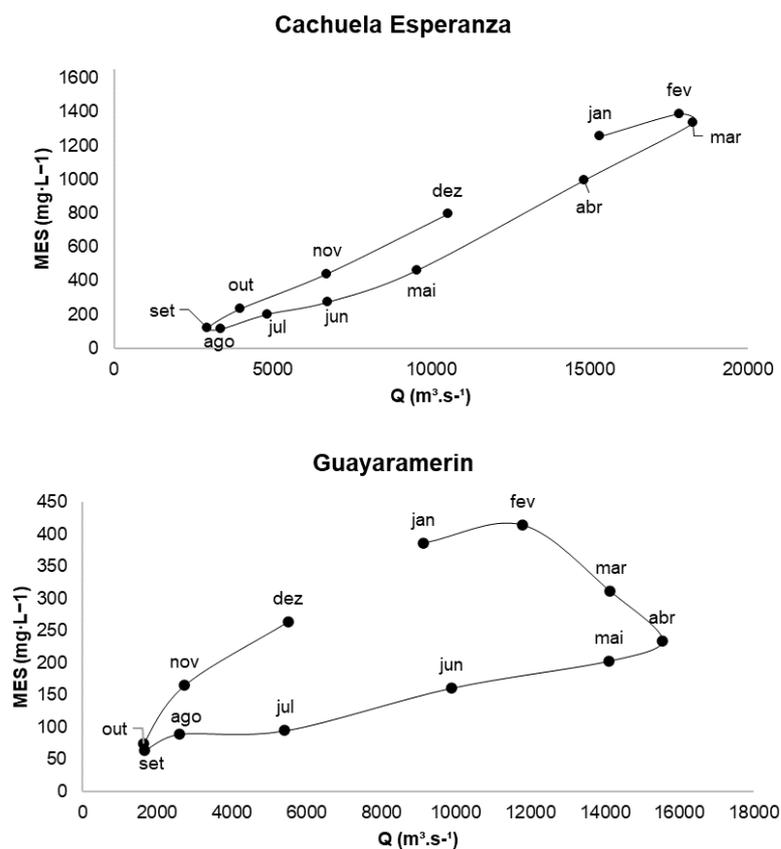
Os meses de julho, agosto e setembro tem concentrações mais baixas, com valores mínimos em setembro nas três estações. Em setembro, Cachuela Esperanza registra uma concentração média de  $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , Guayaramerin com cerca de  $64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  e Porto Velho com o menor valor de  $55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Esses valores são representativos de um período de escassez de chuvas, com diminuição na capacidade de transporte de sedimento suspenso.

No último trimestre do ano, ocorre um aumento gradual nas concentrações de sedimento suspenso. Com base nos dados analisados para o período de 1984 a 2018 para Cachuela Esperanza e de 1995 a 2023 para Guayaramerin e Porto Velho, observa-se que, em média, Cachuela Esperanza atinge seu ponto mais alto em dezembro, com  $796 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , enquanto Guayaramerin e Porto Velho também experimentam aumentos, com concentrações médias de  $264 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  e  $366 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectivamente. Essas variações podem ser atribuídas ao aumento das chuvas nos meses de outubro, novembro e dezembro, durante o período chuvoso.

Em geral, a estação de Porto Velho apresenta concentrações menores de sedimentos em suspensão em comparação com as estações de montante, apesar do maior volume de água do rio Madeira naquela região. Esse fenômeno ocorre porque, à medida que a vazão aumenta devido à contribuição de afluentes, há uma diluição natural dos sedimentos presentes na água. Em outras palavras, embora a carga total de sedimentos transportada pelo rio possa aumentar, a concentração, que é a quantidade de sedimentos por unidade de volume de água, tende a diminuir. Esse comportamento é semelhante ao identificado por Espinoza Villar et al. (2013) no médio e baixo curso do rio Madeira, onde as maiores concentrações de sedimentos são registradas durante a subida das águas e as menores durante a descida do nível do canal

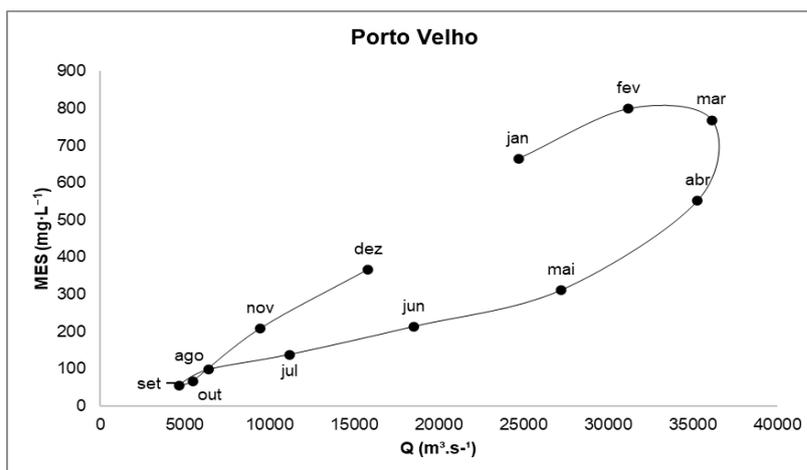
Essa relação é melhor observada na figura 18 ao analisar a concentração de MES x Precipitação nas estações nos rios Beni e Mamoré. As estações de Guayaramerin e Cachuela Esperanza apresentam um laço de histerese do tipo anti-horário. Isso significa que a concentração de MES não segue uma relação linear com a precipitação. Em vez disso, a concentração de MES diminui mais lentamente do que a precipitação durante a fase de diminuição das chuvas, e aumenta mais lentamente do que a precipitação durante a fase de aumento das chuvas.





**Figura 19:** Dados de material em suspensão versus descarga de água nos rios Beni (Cachuela Esperanza) e Mamoré (Guayaramerin).

Em Cachuela Esperanza, a relação entre a concentração de MES e Q é predominantemente positiva, com os valores de MES aumentando e diminuindo de forma correlacionada com Q ao longo do ano. No entanto, essa relação não é perfeitamente linear, especialmente entre os meses de maio e novembro, onde há uma variação significativa de mais de 2.000 m³.s⁻¹ em Q, o que não pode ser desprezado. Em Guayaramerin, observa-se um laço do tipo horário na relação entre MES e Q, que é mais aberto e positivo, mas com uma particularidade entre os meses de abril a agosto, quando os valores de Q são altos, enquanto a concentração de MES permanece baixa. Nesse período, o canal contribui com elevado volume de água, mas com pouco material em suspensão ao rio Madeira.



**Figura 20:** Material em suspensão versus descarga de água no rio Madeira em Porto Velho.

A estação de Porto Velho apresenta um laço do tipo horário, seguindo o padrão das estações a montante (Cachuela Esperanza e Guayaramerin). Seu comportamento é semelhante ao de Guayaramerin no rio Mamoré, com os meses de abril a julho caracterizados por um elevado volume de água e uma menor concentração de material suspenso. Esse comportamento pode ser atribuído à entrada de afluentes que contribuem com grandes volumes de água relativamente mais limpos, resultando em uma diluição do material em suspensão.

Entretanto, nos meses de setembro a fevereiro, a correlação entre MES e Q se torna praticamente linear. Essa linearidade pode estar relacionada à redução da diluição durante o período chuvoso, quando a quantidade de sedimentos transportada aumenta proporcionalmente ao volume de água. Esse comportamento "dúbio" reflete a complexidade das interações hidrológicas e sedimentológicas no rio Madeira, influenciadas por variáveis como a sazonalidade das chuvas e as características das bacias hidrográficas.

A tabela 10 apresenta a descarga sólida (Qs) média diária e anual para Cachuela Esperanza, com uma Qs diária de  $5,53 \times 10^5$  ton.dia<sup>-1</sup> e uma carga anual estimada de  $2,02 \times 10^8$  ton.ano<sup>-1</sup>. Guayaramerin apresenta uma carga diária média de  $1,36 \times 10^5$  ton.dia<sup>-1</sup> e uma carga anual estimada de  $0,50 \times 10^8$  ton.ano<sup>-1</sup>. Porto Velho apresenta uma carga diária média de  $6,10 \times 10^5$  ton.dia<sup>-1</sup> e uma carga anual estimada de  $2,23 \times 10^8$  ton.ano<sup>-1</sup>. Destaca-se um balanço negativo significativo de -11,29% em Porto Velho em relação à soma das estações de montante, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 22 milhões ( $2,84 \times 10^7$ ) ton.ano<sup>-1</sup>.

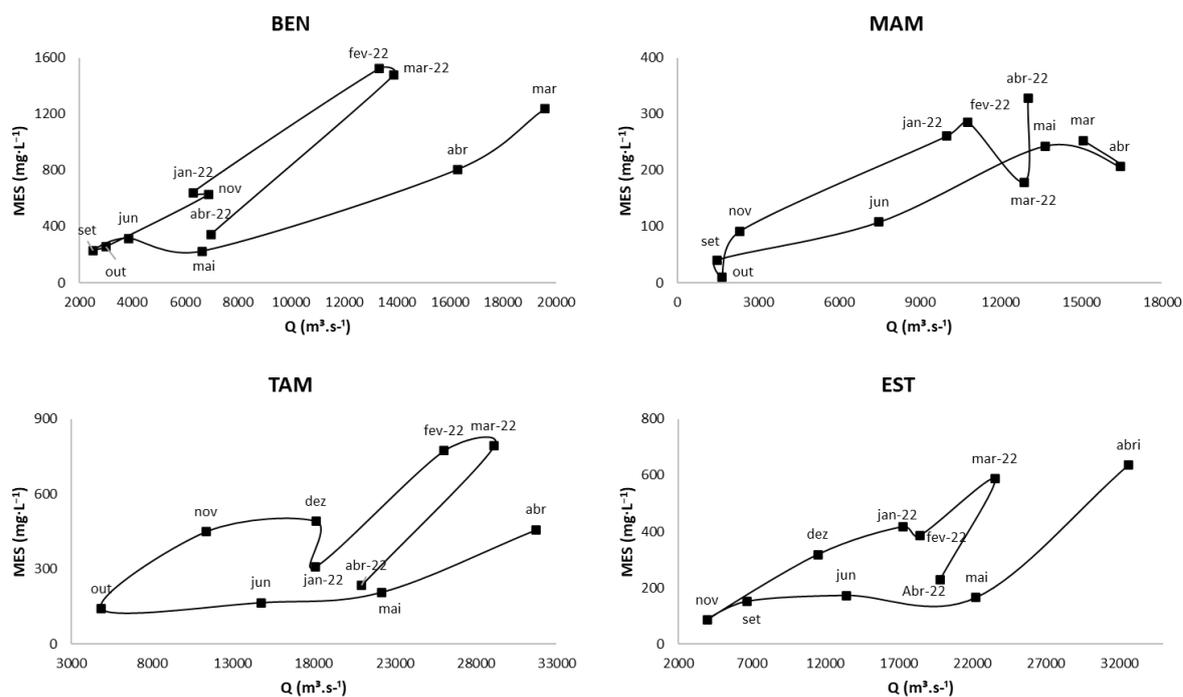
**Tabela 10:** Média da descarga total de sedimento em suspensão (QS), e variação observada da soma dos rios Beni e Mamoré para jusante em Porto Velho ( $\Delta$ ).

Estação	Rio	Qs diária (ton.dia <sup>-1</sup> )	Qs anual (ton.ano <sup>-1</sup> )	$\Delta$ (%)
Cachuela Esperanza	Beni	5.53x10 <sup>5</sup>	2.02x10 <sup>8</sup>	
Guayaramerin	Mamoré	1.36x10 <sup>5</sup>	0.50x10 <sup>8</sup>	
Porto Velho	Madeira	6.10x10 <sup>5</sup>	2.23x10 <sup>8</sup>	-11,29

Essa redução diariamente é de cerca de 77 mil (7,77 x 10<sup>4</sup>) ton.dia<sup>-1</sup>. No entanto, é crucial considerar que essa média diária é uma simplificação, já que os regimes de vazão e transporte de sedimentos podem variar significativamente ao longo do ano para cada rio. Esse balanço reflete a complexidade dos processos de transporte de sedimentos, visto que, de acordo com Guyot, Jouanneau e Wasson (1999), apenas as partículas finas são transportadas pelo rio Madeira em direção ao rio Amazonas, com as planícies de inundação desempenhando um papel regulador na transferência do material.

### 5.2.1 O regime de fluxo de água e de sedimentos observado em 2021/22

Esta seção apresenta os resultados observados no ano hidrológico 2021/2022, com 13 campanhas mensais realizadas. As coletas foram efetuadas em posições específicas ao longo da largura total da seção do canal, nos pontos de 25% (margem esquerda), 50% (centro do canal) e 75% (margem direita), diferentemente da metodologia utilizada pelo HYBAM. A figura 21 mostra os laços de histerese da concentração do material em suspensão (MES) e da descarga líquida (Q) em quatro seções amostrais: foz dos rios Beni (BEN), Mamoré (MAM) e no rio Madeira (TAM e EST) a montante da usina hidrelétrica de Jirau, entre março de 2021 a abril de 2022. Os gráficos mostram a variação da concentração de MES em função da variabilidade da descarga líquida.



**Figura 21:** Material em suspensão versus descarga líquida nos rios Beni (BEN), Mamoré (MAM) e Madeira (TAM e EST) no período de março de 2021 a abril de 2022. **Elaboração:** Ednaldo Severo, 2023.

Observa-se uma polaridade mais evidente nos laços de histerese (Figura 21) dos rios Beni (BEN) e Mamoré (MAM), com maior concentração de meses no polo inferior em BEN comparado ao MAM, e uma inversão quantitativa no polo superior, embora os meses em si permaneçam constantes. Em contraste, essa polaridade não é tão forte nos pontos de amostragem TAM e EST, sugerindo que a polaridade pode ser mais pronunciada nas seções a montante.

Nas estações BEN e MAM, observa-se a presença de um laço de histerese do tipo horário. Contudo, o laço apresenta maior irregularidade em relação ao observado para as estações de Cachuela Esperanza e Guayaramerin, o que pode ser atribuído a vários fatores. Além de o conjunto de dados para Cachuela Esperanza ser maior (30 anos), esses dados são registrados diariamente no centro do canal, e as estações estão localizadas a uma distância a montante de 28 km e 53 km, respectivamente, de BEN e MAM. Outro ponto a considerar é a diferença no método de amostragem. enquanto o projeto SPECTROSED realizou coletas mensais em posições específicas ao longo da largura da seção do canal, o HYBAM utiliza um método de amostragem com coletas diárias no centro do canal. Essas diferenças metodológicas e contextuais podem influenciar a maior irregularidade observada nos laços de histerese em BEN e MAM.

Na seção BEN, essa irregularidade é especialmente notável durante o período de águas baixas, onde ocorrem reduções bruscas nos valores da concentração de MES. Durante os meses de junho a outubro, a concentração de MES diminui de forma mais rápida, e seu aumento está associado a um ritmo mais lento, seguindo o aumento de Q. A análise da correlação linear entre MES e Q nas seções BEN e MAM revela coeficientes de determinação  $R^2 = 0,6679$  e  $R^2 = 0,677$ , respectivamente, indicando uma correlação relativamente forte entre essas variáveis.

Na seção MAM (Figura 21), o laço de histerese apresenta um comportamento mais estável e regular, com a concentração de MES acompanhando de forma mais próxima as variações de Q. Os valores extremos nessa seção são relativamente próximos, e a concentração de MES segue o padrão de subida e descida de Q, sem grandes flutuações, exceto em março de 2022, quando houve uma queda acentuada seguida de um rápido aumento no mês seguinte. O coeficiente de determinação  $R^2 = 0,677$  para MAM confirma essa correlação forte, alinhando-se ao que foi observado na seção BEN.

Nas seções de amostragem TAM e EST no rio Madeira, também foi observada a presença de um laço de histerese do tipo horário. Na seção TAM, os valores da concentração de MES diminuem de forma mais lenta em comparação com os valores de Q, e na fase de subida, nos meses de novembro a fevereiro, aumentam seguindo o ritmo de Q, tornando-se quase lineares nesse período. No entanto, a correlação linear entre MES e Q é relativamente fraca na seção TAM, com um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,3765$ .

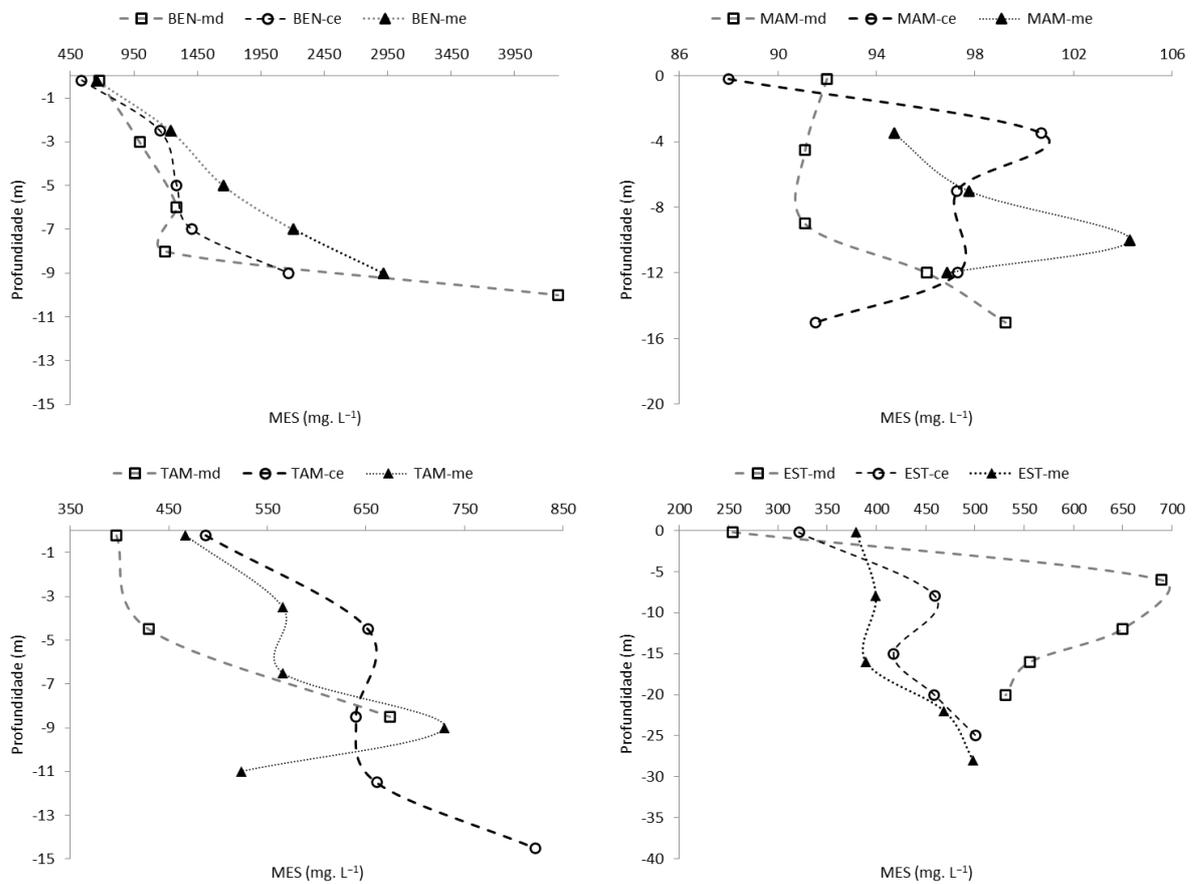
A seção EST apresenta um comportamento semelhante ao da seção TAM, com uma diminuição mais suave nos valores médios da concentração de MES em relação a Q durante a descida nos meses de maio a setembro, e um aumento quase linear na fase de aumento de Q, nos meses de novembro a fevereiro, à medida que o volume de água aumenta. Aqui, o coeficiente de determinação  $R^2 = 0,5903$  sugere uma correlação moderada entre MES e Q. Ressalta-se o mês de janeiro de 2022, que não apresenta a redução brusca observada em TAM.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é uma medida que indica o quanto da variabilidade dos dados de uma variável dependente (neste caso, a concentração de MES) pode ser explicada pela variável independente (descarga líquida, Q) em um modelo de regressão linear. Um valor de  $R^2$  próximo de 1 indica uma forte correlação, significando que a maior parte da variabilidade na concentração de MES pode ser explicada por Q. Valores de  $R^2$  acima de 0,6 geralmente indicam uma boa correlação, enquanto valores abaixo de 0,4 sugerem uma correlação mais fraca.

Assim, os coeficientes de correlação linear ( $R^2$ ) indicam que a relação entre a

concentração de MES e a descarga líquida é mais forte nas seções BEN e MAM, enquanto nas seções TAM e EST essa relação é menos pronunciada. Isso demonstra que, embora os laços de histerese qualitativamente pareçam semelhantes, quantitativamente há variações significativas na força da correlação entre MES e Q nas diferentes seções amostrais.

A Figura 22 ilustra a variação da concentração de MES em relação à profundidade em três pontos distintos na seção de medição: próximos à margem esquerda, ao centro e à margem direita do canal fluvial, durante o período de águas baixas. A análise da concentração de MES em profundidade é essencial para compreender a distribuição vertical do material em suspensão e seu comportamento ao longo do canal.



**Figura 22:** Variabilidade da concentração do material em suspensão (MES) em função da profundidade dos rios Beni (BEN), Mamoré (MAM) e Madeira (TAM e EST) no mês de novembro de 2021. **Elaboração:** Ednaldo Severo, 2023.

Na seção BEN, observa-se que a concentração de MES aumenta conforme a profundidade se aprofunda, atingindo aproximadamente 3500 mg.L<sup>-1</sup> em menos de 10 metros. A maior quantidade de material em suspensão é transportada pela margem direita do canal, enquanto o centro e a margem esquerda apresentam valores ligeiramente superiores a 2000

mg.L<sup>-1</sup>. Esses dados evidenciam que as concentrações de MES na superfície podem diferir significativamente das concentrações em profundidade, destacando a complexidade da distribuição dos sedimentos ao longo do perfil vertical do canal.

Na seção MAM, a variação da concentração de MES é pouco expressiva. Em 16 metros de profundidade no canal, observa-se uma variação de apenas 20 mg.L<sup>-1</sup>, com uma leve redução na margem esquerda e um aumento discreto tanto no centro quanto na margem direita. Já na seção TAM, a variação é maior, com aproximadamente 400 mg.L<sup>-1</sup> ao longo de 15 metros de profundidade. A concentração mais elevada é encontrada no centro do canal, onde a profundidade é maior.

Na seção EST, que apresenta maiores profundidades em comparação com as seções a montante, observa-se que, na margem esquerda e no centro do canal, a concentração de MES aumenta proporcionalmente à profundidade, com uma variação ligeiramente superior a 100 mg.L<sup>-1</sup>. Em contraste, na margem direita, o comportamento é inverso, com uma diminuição na concentração de MES conforme a profundidade aumenta. Inicialmente, há um pico de concentração de MES de 700 mg.L<sup>-1</sup> próximo à superfície, que diminui para 500 mg.L<sup>-1</sup> à medida que a profundidade aumenta.

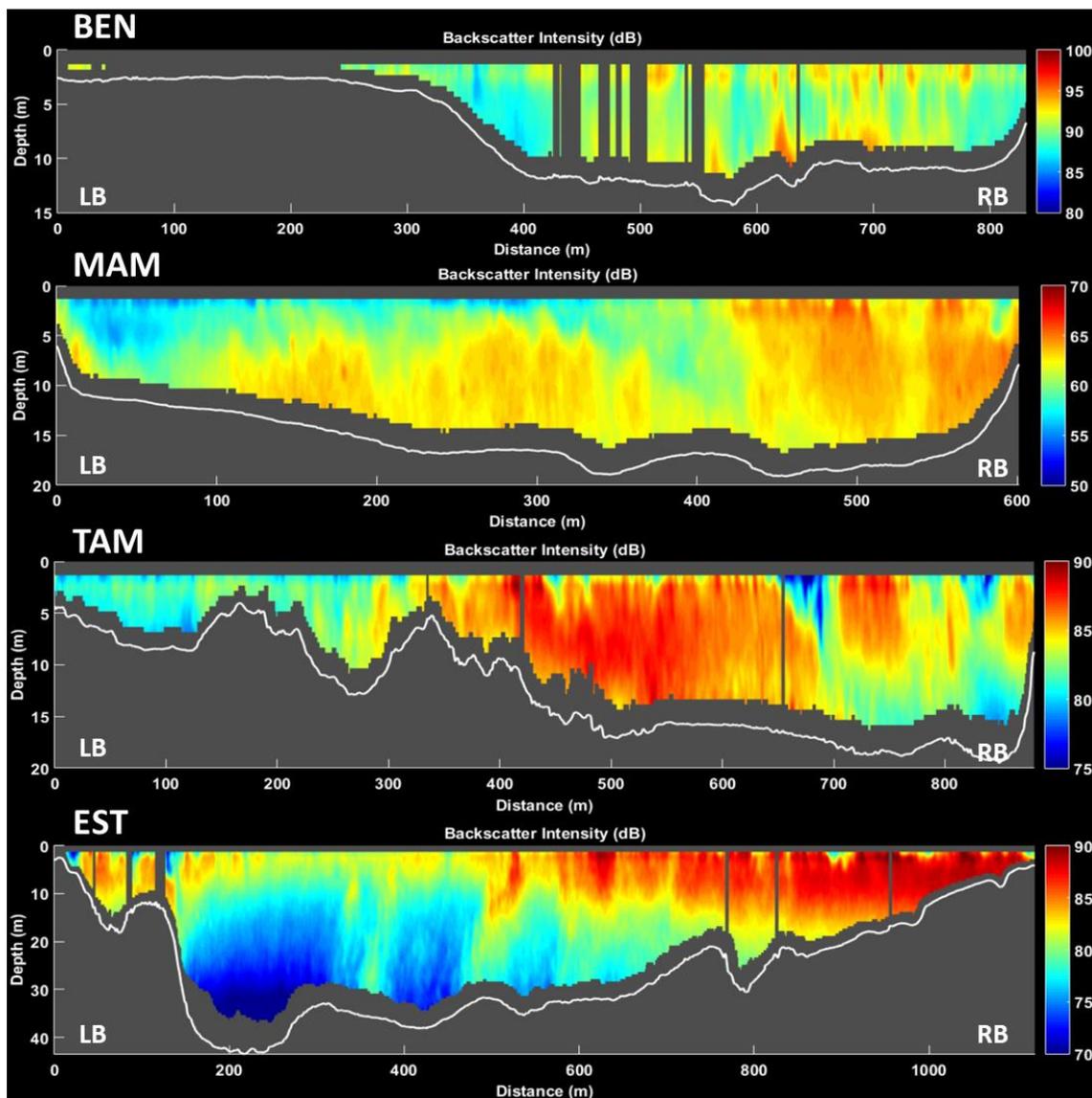
De modo geral, a variação dos valores médios na concentração de MES em superfície em relação à profundidade é próxima dos valores apresentados por Filizola (2003) para a estação de Fazenda Vista Alegre, próxima à foz do rio Madeira. No estudo citado, o autor menciona que, no período de águas baixas, os valores médios da concentração de MES em superfície variam cerca de 1,2 em relação à profundidade, enquanto a média anual foi cerca de 1,7.

Neste estudo, a variação registrada nas quatro seções amostrais foi maior do que os valores de Filizola (2003). Isso pode ser explicado pelas diferenças nos trechos estudados. Enquanto Filizola (2003) analisou apenas a estação Fazenda Vista Alegre, situada a aproximadamente 1000 km a jusante de Jirau, no rio Madeira, este estudo abrange quatro seções amostrais localizadas a montante da UHE de Jirau, incluindo a foz dos rios Beni e Mamoré, além de duas seções no rio Madeira. Essas diferenças na localização das áreas de estudo podem contribuir para variações na dinâmica hidrossedimento do canal e, conseqüentemente, nas concentrações de MES entre os respectivos trechos analisados.

Na seção BEN, a variação é de cerca de 2,9, quase três vezes maior do que em MAM, que apresentou uma variação de 1,1. Na seção TAM, no rio Madeira, o valor da concentração de MES na superfície foi da ordem de 1,4 em relação à concentração média de MES observada em profundidade, enquanto na estação EST foi em torno de 1,6, valores superiores aos

registrados em águas baixas (1,2) e próximos da média anual (1,7) estimada por Filizola (2003) para o rio Madeira. É importante ressaltar que a pequena variação em MAM pode estar associada à capacidade relativa do rio Mamoré de transportar sedimentos, considerando que este canal registrou uma baixa velocidade de fluxo durante o período estudado, com apenas  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

A Figura 23 a seguir apresenta o retroespalhamento do sinal do ADCP nas seções mencionadas anteriormente. Nesta figura, as cores mais quentes representam um maior retorno do sinal, que se intensifica conforme a coluna d'água contém maior concentração de sedimentos (FILIZOLA; GUYOT, 2004). No perfil transversal da seção BEN, embora sejam observadas algumas falhas devido a dificuldades durante a medição, o perfil indica um retorno de sinal forte na margem direita (RB), que reflete a amostragem em profundidade nessa seção.



**Figura 23:** Perfis transversais dos rios Beni, Mamoré e Madeira com a variação do retroespalhamento em

profundidade em novembro de 2021. LB: margem esquerda. RB: margem direita. Valores em decibéis (dB).

Na seção MAM, o sinal é mais intenso em profundidade no centro do canal e ao longo de quase toda a margem direita da coluna d'água, comportamento que se alinha com as concentrações de MES observadas, onde a margem direita apresenta moderadas concentrações de MES, mesmo em maiores profundidades. Na seção TAM, o padrão também segue o esperado, com o sinal de retroespalhamento mais concentrado no centro do canal, uma região de maior velocidade e onde as concentrações de MES variaram de 450 mg.L<sup>-1</sup> na superfície a 850 mg.L<sup>-1</sup> em profundidades maiores.

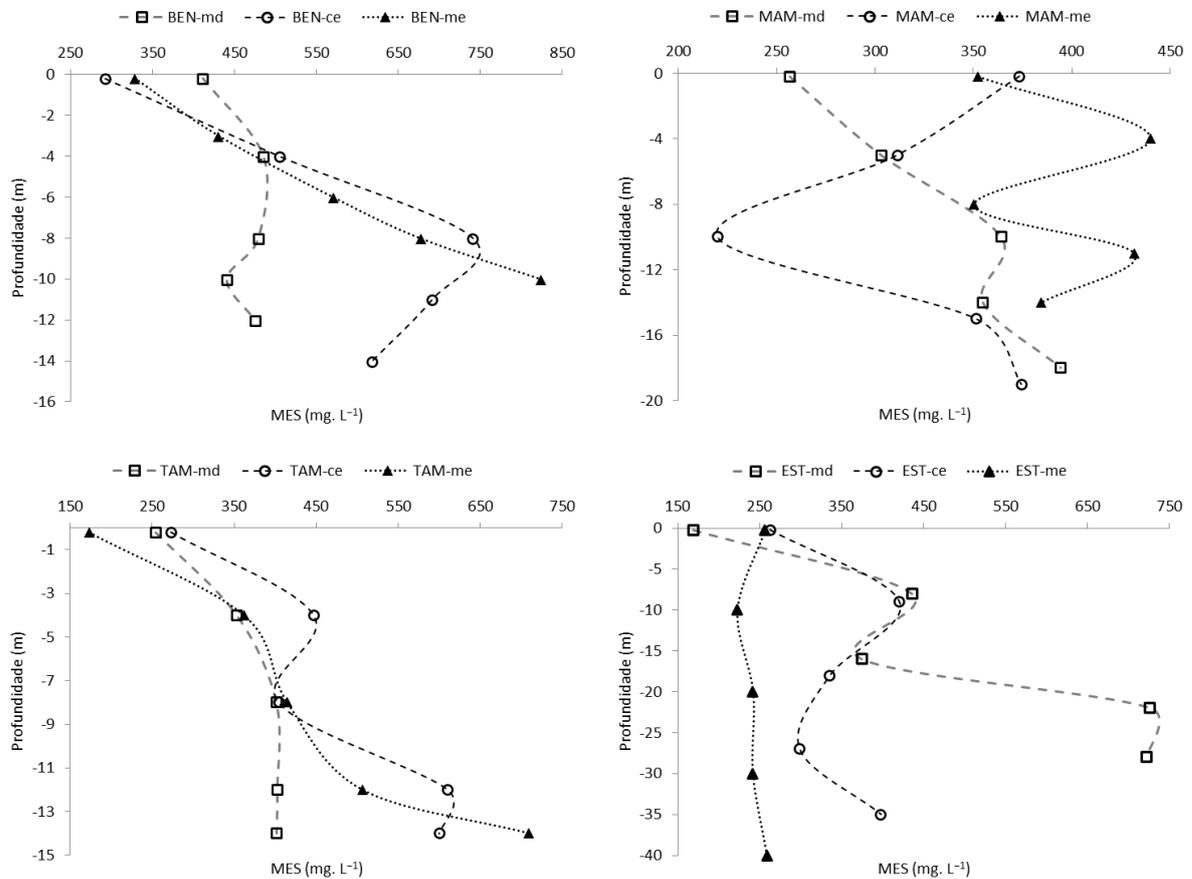
Por outro lado, a seção EST apresenta características distintas, com maior intensidade de MES concentrada na margem direita, onde ocorrem velocidades mais elevadas e concentrações de material em suspensão atingem cerca de 700 mg.L<sup>-1</sup> em profundidades entre 5 m e 10 m, enquanto valores mais baixos, em torno de 500 mg.L<sup>-1</sup>, são observados em profundidades maiores. Essa variação é visível no perfil, onde cores menos intensas (amarelas) indicam uma menor concentração de MES. O centro e a margem esquerda apresentam menor intensidade de MES, o que pode estar relacionado à proximidade da barragem do canal, que reduz a velocidade do fluxo e favorece a deposição de parte do material em suspensão.

Enquanto Filizola e Guyot (2004) buscaram estimar a concentração de MES a partir do sinal de retroespalhamento, neste estudo, a análise focou na identificação das regiões de maior intensidade do sinal e na verificação de sua correspondência com as concentrações de MES coletadas em campo em diferentes profundidades. A comparação entre os estudos sugere que, embora o sinal de retroespalhamento forneça uma indicação útil da distribuição de MES, a validação com amostras de campo é essencial para garantir a precisão das interpretações.

A Figura 24 exibe a variabilidade da concentração de MES durante o período de águas altas nessas estações. Em BEN, a concentração é mais baixa que no período de águas baixas, com uma variação um pouco superior a 400 mg.L<sup>-1</sup>. Nesta seção, a concentração de MES atinge níveis mais elevados na margem esquerda e no centro do canal, enquanto a margem direita apresenta baixa variação em relação à profundidade, mantendo valores em torno de 500 mg.L<sup>-1</sup>.

Esse comportamento é distinto do observado durante o período de águas baixas, quando a concentração de MES era maior nessa margem específica do canal. É importante destacar que, embora os valores registrados em BEN durante o período de águas altas sejam próximos aos apresentados por Filizola, (2003) na estação de Fazenda Vista Alegre (FVA), no baixo curso do rio Madeira, com variações entre 500 mg.L<sup>-1</sup> e 1000 mg.L<sup>-1</sup>, há uma distância superior a 1000 km entre as duas estações, medida ao longo do curso do rio. Essa distância,

juntamente com os diferentes fenômenos hidrodinâmicos que ocorrem ao longo do percurso, ressalta a importância de diferenciar as condições locais e reconhecer que essa semelhança nos valores não implica necessariamente em uma correspondência direta



**Figura 24:** Variabilidade da concentração do material em suspensão (MES) em função da profundidade dos rios Beni (BEN), Mamoré (MAM) e Madeira (TAM e EST) no mês de abril de 2022.

Na seção MAM, observa-se um aumento na variação da concentração de MES com valores oscilando entre 200 e 450 mg.L<sup>-1</sup>. A margem esquerda apresenta a concentração mais elevada, enquanto o centro e a margem direita do canal possuem valores próximos, variando entre 300 e 400 mg.L<sup>-1</sup>. Em TAM, o padrão é semelhante, com a concentração mais elevada próxima à margem esquerda e ao centro do canal. A variação nessa seção é de 300 mg.L<sup>-1</sup> da superfície até o ponto mais profundo, a 15 metros, onde a concentração da MES atinge 700 mg.L<sup>-1</sup>. Por outro lado, a margem direita do canal apresenta pouca variação, mantendo valores próximos a 400 mg.L<sup>-1</sup> mesmo em profundidades maiores.

Na seção EST, a variação total da concentração da MES é de 500 mg.L<sup>-1</sup>. Apesar de ser mais rasa, a margem direita do canal registra os valores mais elevados, com um aumento de 300 mg.L<sup>-1</sup> entre as profundidades de 15 a 30 metros. Já o centro e a margem esquerda exibem

pouca variação em relação à profundidade nesses pontos específicos. Os valores da concentração da MES próximos à superfície são semelhantes aos valores em profundidade entre 30 e 40 metros, variando entre 200 e 400 mg·L<sup>-1</sup> respectivamente.

Neste estudo, a variação registrada na relação entre as concentrações médias de MES em superfície em relação às de fundo nas quatro seções amostrais foi menor do que a apresentada por Filizola (2003) para o período de águas altas, em que a concentração da MES observada em profundidade foi da ordem de 2.5 em relação a superfície, e em geral com média de 1.7. Os resultados deste estudo mostram que para a seção BEN a relação foi de 1.7, enquanto MAM ficou mais próxima, com 1.1 em a concentração de superfície e profundidade.

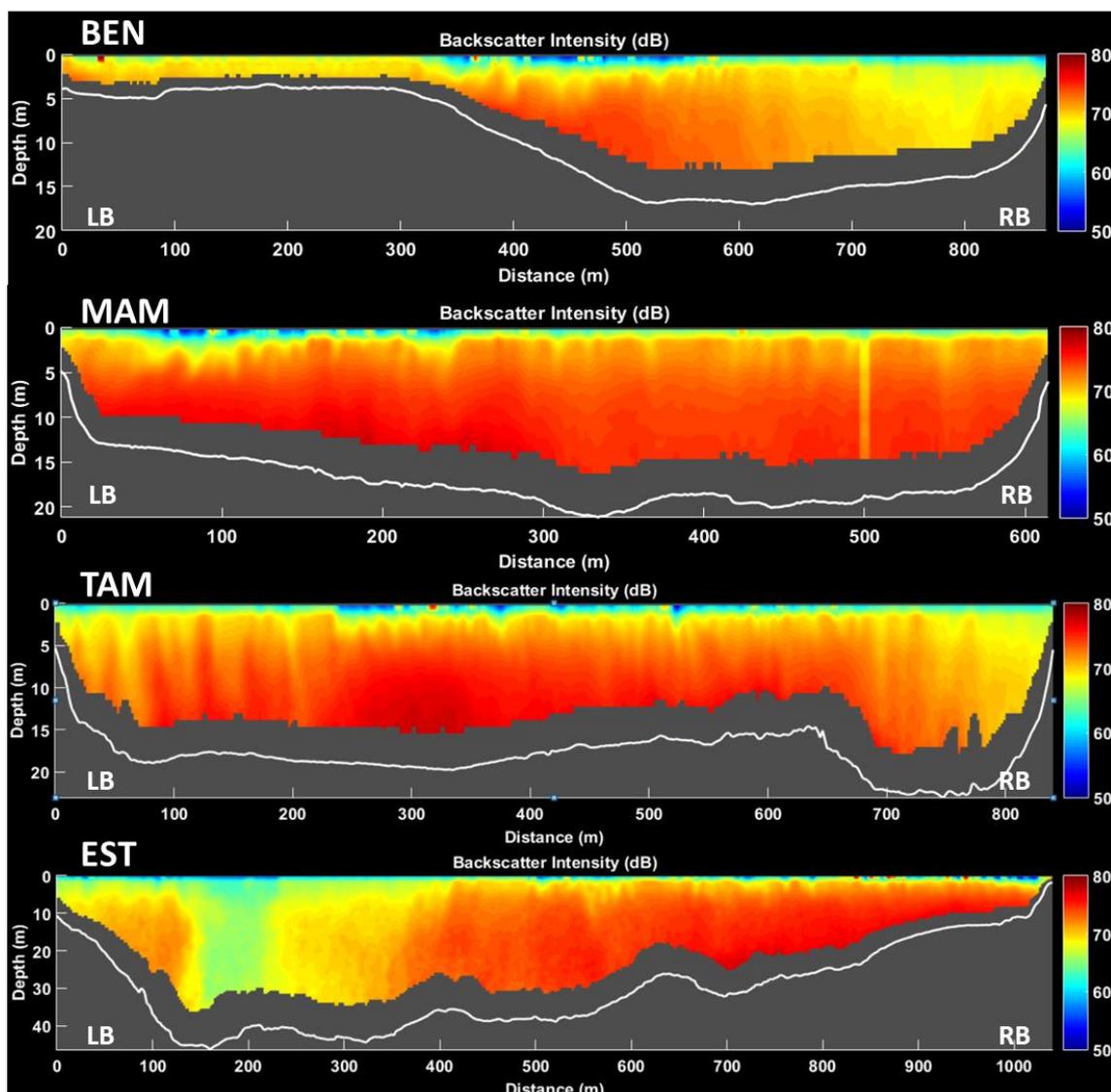
Na seção TAM, no rio Madeira, o valor chega a 2.0, enquanto na seção EST a variação ficou em torno de 1.7, valor dentro da média anual de Filizola (2003) para o rio Madeira. É importante ressaltar que a pequena variação em MAM pode estar associada à baixa capacidade do rio Mamoré em transportar sedimentos, visto que este canal contribui com bastante volume de água neste período, mas pouca carga sedimentar comparada ao rio Beni.

A Figura 25 mostra os perfis transversais do retroespalhamento do sinal ADCP durante o período de águas altas, em abril de 2022. Na seção BEN, observa-se uma maior intensidade do sinal no centro do canal, o que está em concordância com as medições de material em suspensão para esse período, com valores variando entre 600 mg·L<sup>-1</sup> e 750 mg·L<sup>-1</sup> neste trecho do rio Beni. Já em MAM, a intensidade do retroespalhamento está mais uniformemente distribuída ao longo de todo o perfil, com a margem esquerda do canal apresentando as maiores concentrações de MES, conforme também pode ser observado no retorno do sinal entre 4m e 10m de profundidade nessa seção.

Na seção TAM, no rio Madeira, o retroespalhamento foi concentrado no centro do canal, em profundidades entre 10 m e 14 m, com valores de MES variando entre 400 mg·L<sup>-1</sup> e 750 mg·L<sup>-1</sup>. Apesar de mais profunda, a margem direita apresenta uma intensidade menor e valores mais baixos da concentração da MES, com variação de 250 mg·L<sup>-1</sup> na superfície a cerca de 400 mg·L<sup>-1</sup> em profundidades próximas a 15 m, com uma amplitude de 150 mg·L<sup>-1</sup>.

No perfil transversal da seção EST, a margem direita exhibe as maiores concentrações de MES, alcançando 700 mg·L<sup>-1</sup> em profundidades entre 20 m e 30 m, que é a faixa do perfil com maior intensidade e retorno do sinal. À medida que se aproxima do centro e da margem esquerda, o retroespalhamento diminui, mesmo nas maiores profundidades da seção, o que também é observado nas amostras da concentração da MES nesse trecho do canal no rio Madeira. Ressalta-se a faixa de menor intensidade na margem direita, onde foram coletadas as

amostras, as quais apresentaram concentrações mais baixas que na superfície, mesmo em profundidades superiores a 30 m.



**Figura 25:** Perfis transversais dos rios Beni (BEN), Mamoré (MAM) e Madeira (TAM e EST) com a variação do retrospalhamento em profundidade em abril de 2022. A localização dos perfis pode ser encontrada na Fig. 3. LB = margem esquerda. RB: Margem Direita.

A tabela 11 apresenta os resultados das medições, coleta de amostras e do balanço hidrossedimentar em superfície dos rios Beni, Mamoré e Madeira durante o ano hidrológico 2021/22. Os valores nela apresentados para a concentração da MES, descarga líquida (Q) e descarga sólida (Qs) confirmam os registrados de Guyot et al. (1995) para os rios Beni, Mamoré e Madeira, nas estações de Cachuela Esperanza, Guayaramerin e Porto Velho, respectivamente. Os valores médios da concentração da MES no estudo de Guyot et al. (1995) são próximos aos aqui apresentados na tabela 11, no qual registraram concentração média de  $690 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  para o

rio Beni,  $280 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  para o Mamoré e  $483 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  para o Madeira, enquanto os valores de Q foram  $8.810 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $7.550 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  e  $20.100 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivamente.

Esses valores são similares ao aqui apresentado, com exceção para o rio Mamoré, que possui uma concentração média de MES maior em MAM, e as seções TAM e EST no rio Madeira, com valores mais baixos cada. Essa redução nas estações, foi observado por Espinoza Villar et al. (2013), ao analisar as estações a jusante da UHE de Jirau, indicando que em todos os períodos do ano, o material em suspensão tende a diminuir de montante para jusante.

**Tabela 11:** Características das quatro seções analisadas no estudo. Valores que Qs observados em superfície

Seção	Rio	Larg. média (m)	Vel. ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	MES ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Q ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	Qs anual ( $\text{ton}\cdot\text{ano}^{-1}$ )	Balanco (%)	Prod. Especifica ( $\text{ton}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$ )
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

As seções BEN e MAM exibem velocidades média anual semelhantes, no entanto, BEN transporta quase três vezes mais matéria em suspensão, possui Q menor e apresenta uma produção específica maior, atingindo cerca de  $2.04 \text{ ton}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$ . Já a seção TAM apresenta a maior velocidade média anual entre as seções, localizada em um trecho mais retilíneo, tem Q de  $20.716 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , e transporta, em média, aproximadamente 250 milhões de toneladas de sedimento, isso representa uma diferença de cerca de 12% quando comparada a soma das seções BEN e MAM a montante.

Entre a confluência e a seção de TAM, não há nenhum canal com contribuição significativa em termos de volume d'água e sedimentos. Por exemplo, no caso do rio Abunã, a diferença média de vazão entre a confluência e TAM é de cerca de 8%. Segundo Espinoza Villar et al. (2013), a maior parte da carga de sedimentos em suspensão na Bacia do rio Madeira é atribuída aos canais que têm origem nos Andes (rios Beni e Mamoré), enquanto os afluentes locais têm origem em áreas de planícies florestais com pouca produção de sedimentos.

Na seção EST, onde a largura do canal é maior, com 1,1 km, a velocidade é reduzida devido ao barramento do rio Madeira pela UHE de Jirau. A concentração de MES e volume de Q apresentam valores semelhantes aos da seção TAM. No entanto, a seção EST registra uma redução de 3% no material transportado em comparação a estação de montante. Sua taxa de produção específica é de  $0,24 \text{ ton}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$ , enquanto em TAM é de  $0,38 \text{ ton}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{ano}^{-1}$ .

A Tabela 12 apresenta as taxas de denudação estimadas para a planície de inundação em diferentes locais. Essas taxas foram calculadas a partir do volume anual de sedimentos removidos ( $m^3/ano$ ), dividido pela área de drenagem da planície de inundação ( $m^2$ ). O volume em  $m^3/ano$  foi determinado dividindo-se a descarga sólida total ( $kg/ano$ ) pela densidade dos sedimentos, assumida como  $2700 kg/m^3$ , conforme utilizado por Wittmann et al. (2011). A descarga sólida, expressa em  $kg/ano$ , foi obtida multiplicando-se a descarga sólida em  $ton/ano$  por 1000. A comparação entre os resultados deste estudo e os apresentados por Wittmann et al. (2011) e Vauchel et al. (2017) mostra variações significativas nas taxas de denudação entre os locais investigados

**Tabela 12:** Taxas de denudação na planície de inundação dos rios Beni, Mamoré e Madeira.

Trabalho	Local	Rio	Denudação planície de inundação (mm/ano)
Wittmann et al. (2011)	Guayaramerin	Mamoré	0.25
	Cachuela Esperanza	Beni	1.15
	Porto Velho	Madeira	0.33
Vauchel et al. (2017)	Rurrenabaque	Beni	1.10
Este estudo	Area de estudo deste trabalho	Madeira	0.11

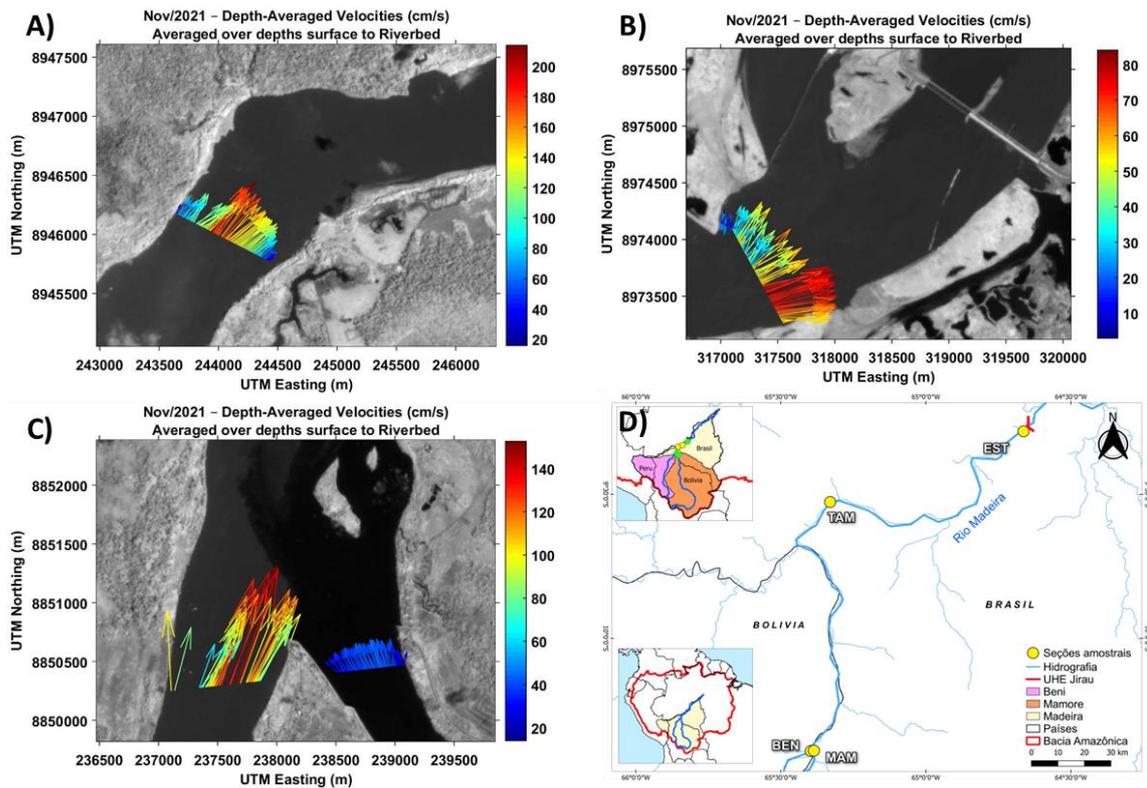
Neste estudo, foi calculada uma taxa de denudação de 0,11 mm/ano, o que sugere uma atividade erosiva mais suave ou uma maior estabilidade na planície de inundação nesse local específico. Em comparação, Guayaramerin apresentou uma taxa de denudação de 0,25 mm/ano, enquanto Cachuela Esperanza, no rio Beni, apresentou uma taxa substancialmente mais alta, atingindo 1,15 mm/ano, conforme determinado por Wittmann et al. (2011).

Este valor elevado em Cachuela Esperanza pode ser atribuído ao método utilizado, onde a taxa de denudação foi determinada pela análise de isótopos cosmogênicos, como o berílio-10 ( $^{10}Be$ ) e o alumínio-26 ( $^{26}Al$ ), que refletem processos erosivos mais intensos ao longo do tempo geológico. Além disso, tanto no estudo de Wittmann quanto no presente trabalho, foi utilizada uma densidade de sedimento de  $2700 kg/m^3$  para o cálculo da taxa de denudação.

Por outro lado, Vauchel et al. (2017) estimaram uma taxa de 1,10 mm/ano na estação de Rurrenabaque, que está localizada a montante de Cachuela Esperanza, ambas no rio Beni. Essa proximidade geográfica, mas com condições hidrológicas ligeiramente diferentes, reforça a evidência de maior atividade erosiva na parte alta e média do rio Beni. Em Porto Velho, a taxa de denudação foi de 0,33 mm/ano, ligeiramente menor do que em Cachuela Esperanza, mas ainda assim três vezes maior do que a taxa calculada neste estudo. Isso sugere um nível moderado de erosão na planície de inundação nessa área, provavelmente influenciado por diferentes condições hidrológicas e sedimentológicas locais.

Essas variações nas taxas de denudação entre os diferentes locais podem ser atribuídas a uma variedade de fatores, incluindo o regime hidrológico local, o uso da terra, o tipo de rocha e o tamanho da área de drenagem. Além disso, é importante considerar que o recorte temporal e a área de drenagem analisados neste estudo são menores em comparação aos utilizados por Wittmann et al. (2011) e Vauchel et al. (2017), o que pode influenciar os resultados observados.

A Figura 26 mostra os vetores de velocidade distribuídos na direção transversal ao fluxo, representando a média vertical das velocidades em profundidade durante o período de águas baixas. A análise das velocidades é importante para compreender a dinâmica de confluência entre os rios Beni e Mamoré. A diferença na intensidade dos vetores de velocidade entre os dois rios interfere diretamente a mistura dos fluxos, a distribuição dos sedimentos e a formação de padrões de erosão e deposição ao longo do canal (BEST, 2019). Essa dinâmica afeta como os sedimentos são transportados e depositados na região de confluência, impactando a geomorfologia local, como pode ser observado na distribuição dos vetores de velocidade nas seções representadas na Figura 26.



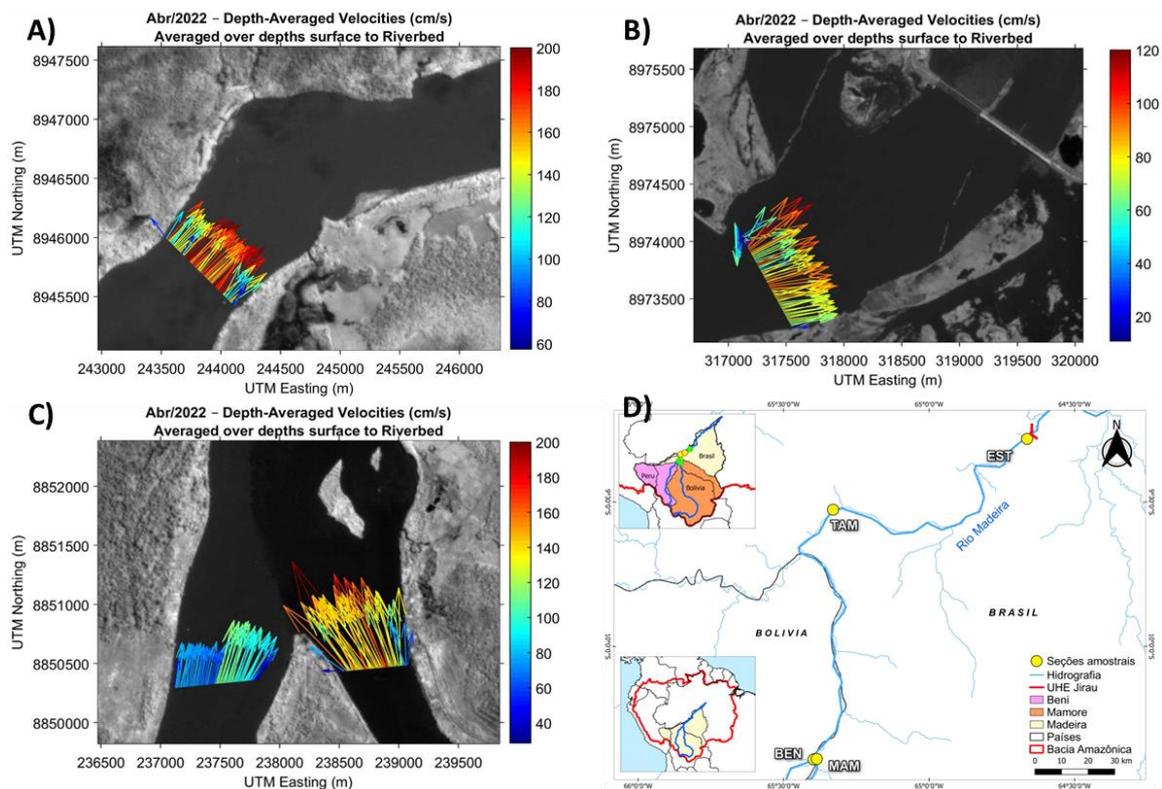
**Figura 26:** Vetores médios de velocidade em profundidade e direção do fluxo ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) para as seções transversais nos rios Beni e Mamoré (C) e Madeira (A e B) na área de estudo em novembro de 2021.

Na Figura 26C, destaca-se a confluência entre os canais Beni e Mamoré. A junção entre o rio Beni e o Mamoré possui uma forma simétrica, com um ângulo de aproximadamente

160°. Nessa área, o rio Beni apresenta vetores de velocidade de maior intensidade, especialmente próximo à margem direita, atuando como uma barreira hidráulica para o rio Mamoré, que possui vetores de velocidade menores e flui principalmente ao longo da margem direita. Em novembro de 2021, durante o período de enchente (subida das águas), as velocidades estavam em ritmo de subida, o que reflete a intensificação do fluxo à medida que o nível do rio aumentava. As velocidades médias registradas foram de  $1,108 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em BEN,  $0,253 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em MAM,  $1,017 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em TAM e  $0,414 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em EST.

A seção de TAM (Figura 26a) exhibe uma maior velocidade de fluxo no centro do canal, com vetores de velocidade em um ângulo aproximado de 40°. Este trecho apresenta uma geometria mais retilínea em comparação com outras seções, favorecendo maiores velocidades no rio Madeira, atingindo  $1,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Por outro lado, a seção EST (Figura 26b) é a mais próxima da UHE de Jirau, com seu fluxo concentrado principalmente próximo à margem direita e vetores de velocidade em um ângulo aproximado de 105°. É notável a presença de vetores de menor intensidade na margem esquerda desta seção, com uma média de 115°, sugerindo uma possível divisão de fluxo.

A Figura 27 mostra os vetores de velocidade durante o período de águas altas, em abril de 2022.



**Figura 27:** Vetores médios de velocidade em profundidade e direção do fluxo ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) para as seções transversais nos rios Beni e Mamoré (A) e Madeira (B e C) na área de estudo em abril de 2022.

Neste período, que corresponde à vazante (descida das águas), as velocidades estavam em ritmo de descida, refletindo a diminuição do fluxo à medida que os níveis do rio baixavam. As velocidades médias registradas foram de  $1,491 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em BEN,  $1,389 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em MAM,  $1,830 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em TAM e  $1,339 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em EST. Observa-se uma mudança no comportamento da confluência entre os rios Beni e Mamoré (Figura 27c) em comparação com as águas baixas. Neste cenário, o rio Mamoré exibe vetores de velocidade mais pronunciados e uma velocidade maior em relação ao rio Beni. Enquanto o Beni apresenta uma velocidade média de  $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , o Mamoré registra  $1,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  durante esse período.

Durante o período de águas altas, a seção TAM (Figura 27a) exibe vetores de velocidade bem distribuídos, com o fluxo ligeiramente mais concentrado no centro do canal. A velocidade registrada nesse mês foi da ordem de  $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Já a seção EST, nesta mesma campanha, também apresentou vetores de velocidade bem distribuídos ao longo da seção de medição, com uma intensidade maior no centro e na margem esquerda do canal, embora ainda menor em comparação com a seção de montante. A velocidade média nesse período foi de  $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , quase três vezes menor do que em TAM. Nesta seção, observam-se vetores em sentido contrário ao fluxo na margem esquerda, indicando a presença de remanso nesse trecho.

### 5.3 Avaliação do uso de imagens PlanetScope para monitoramento de material em suspensão nos rios Beni e Mamoré

Neste capítulo, serão brevemente discutidos os resultados do uso das imagens PlanetScope para estimar a concentração de material em suspensão na superfície por satélite (MES<sub>s</sub>), utilizando um modelo adaptado por Santos (2022) para imagens Sentinel-2 no rio Madeira a montante da Usina Hidrelétrica de Jirau. As imagens PlanetScope utilizadas foram harmonizadas para garantir a consistência radiométrica com o satélite Sentinel-2. A Tabela 13 apresenta os valores das concentrações médias de MES na superfície, obtidos a partir das amostragens realizadas em campo e das estimativas feitas por meio das imagens de satélite PlanetScope.

Nos meses de março e maio, as estimativas da concentração de MES na superfície para o rio Beni subestimaram os valores observados em campo, registrando 557 mg·L<sup>-1</sup> e 64 mg·L<sup>-1</sup>, respectivamente. Em contrapartida, no rio Mamoré, ocorreu o oposto, as estimativas superestimaram os valores em quase cinco vezes em abril, com 858 mg·L<sup>-1</sup>, e subestimaram em 55 mg·L<sup>-1</sup> em maio. Já no rio Madeira, as estimativas excederam em 182 mg·L<sup>-1</sup> em março e se aproximaram dos valores coletados em campo, com uma diferença mínima de 13 mg·L<sup>-1</sup> em maio.

**Tabela 13:** Valores da concentração média do material em suspensão (MES) estimada por sensoriamento remoto e observada em campo. Os valores estão expressos em mg·L<sup>-1</sup>.

Data	Beni		Mamoré		Madeira	
	MES Estimado	MES Observado	MES Estimado	MES Observado	MES Estimado	MES Observado
17/03/2021	679	1236	1111	253	809	991
27/05/2021	159	223	188	243	194	207
16/08/2021	432	230	355	41	301	96
31/10/2021	482	255	100	10	240	141

Durante o período de águas baixas, observa-se uma grande diferença entre os valores estimados por sensoriamento remoto e os observados em campo. No rio Beni, os valores superestimados variaram em 202 mg·L<sup>-1</sup> em agosto e 227 mg·L<sup>-1</sup> em outubro. No rio Mamoré, essa discrepância é ainda mais acentuada durante as águas baixas: em agosto, a diferença chega a 314 mg·L<sup>-1</sup>, quase nove vezes o valor medido em campo, enquanto em outubro, a diferença é de dez vezes, totalizando 90 mg·L<sup>-1</sup>. Por sua vez, no rio Madeira, os valores superestimados

são evidentes em agosto, com uma diferença de 205 mg·L<sup>-1</sup>, três vezes maior do que o observado em campo, enquanto em outubro, a discrepância é menor, com apenas 99 mg·L<sup>-1</sup>.

A Tabela 14 apresenta a diferença percentual entre os valores da concentração de MES estimados por sensoriamento remoto e os valores observados em campo. No rio Beni, essa diferença varia consideravelmente ao longo do período. Em março e maio de 2021, as estimativas subestimaram as concentrações de MES em -45% e -29%, respectivamente. Durante as águas altas, em agosto e outubro, houve uma superestimação dos valores em 88% e 89%, respectivamente.

**Tabela 14:** Diferença percentual entre o estimado por sensoriamento remoto e observado em campo para os rios Beni, Mamoré e Madeira.

<b>Data</b>	<b>Beni</b>	<b>Mamoré</b>	<b>Madeira</b>
17/03/2021	-45%	339%	-18%
27/05/2021	-29%	-23%	-6%
16/08/2021	88%	766%	214%
31/10/2021	89%	900%	70%

No rio Mamoré, a variação percentual também foi expressiva ao longo do tempo. Em março e abril, o valor foi de -23%. No entanto, em agosto e outubro, os valores foram extremamente altos, atingindo cerca de 339% e 766%, respectivamente. No estudo de Maciel et al. (2020) os autores indicam que o rio Tapajós, um rio de águas claras e com baixas concentração de MES, possui condições que favorecem o monitoramento por meio de imagens do Planet. No entanto, neste estudo, foram observadas as maiores discrepâncias entre os valores estimados e observados no rio Mamoré, um rio classificado como do tipo águas claras.

No caso do rio Madeira, a diferença percentual também variou ao longo dos períodos analisados. Nos meses de março e maio, os valores foram negativos, diferenciando-se dos demais canais, com variações de -18% e -6%, respectivamente. Por outro lado, durante os períodos de águas altas, nos meses de agosto e outubro, as diferenças são positivas, atingindo 214% e 70%, respectivamente.

Os resultados indicam que estas estimativas com imagens PlanetScope tendem a divergir consideravelmente dos dados observados de campo, com algumas datas apresentando diferenças percentuais extremamente altas. Isso ressalta a importância de validar e ajustar os modelos de sensoriamento remoto para garantir uma precisão adequada nas estimativas de sedimento suspenso, visando um monitoramento mais eficaz, bem como processar imagens

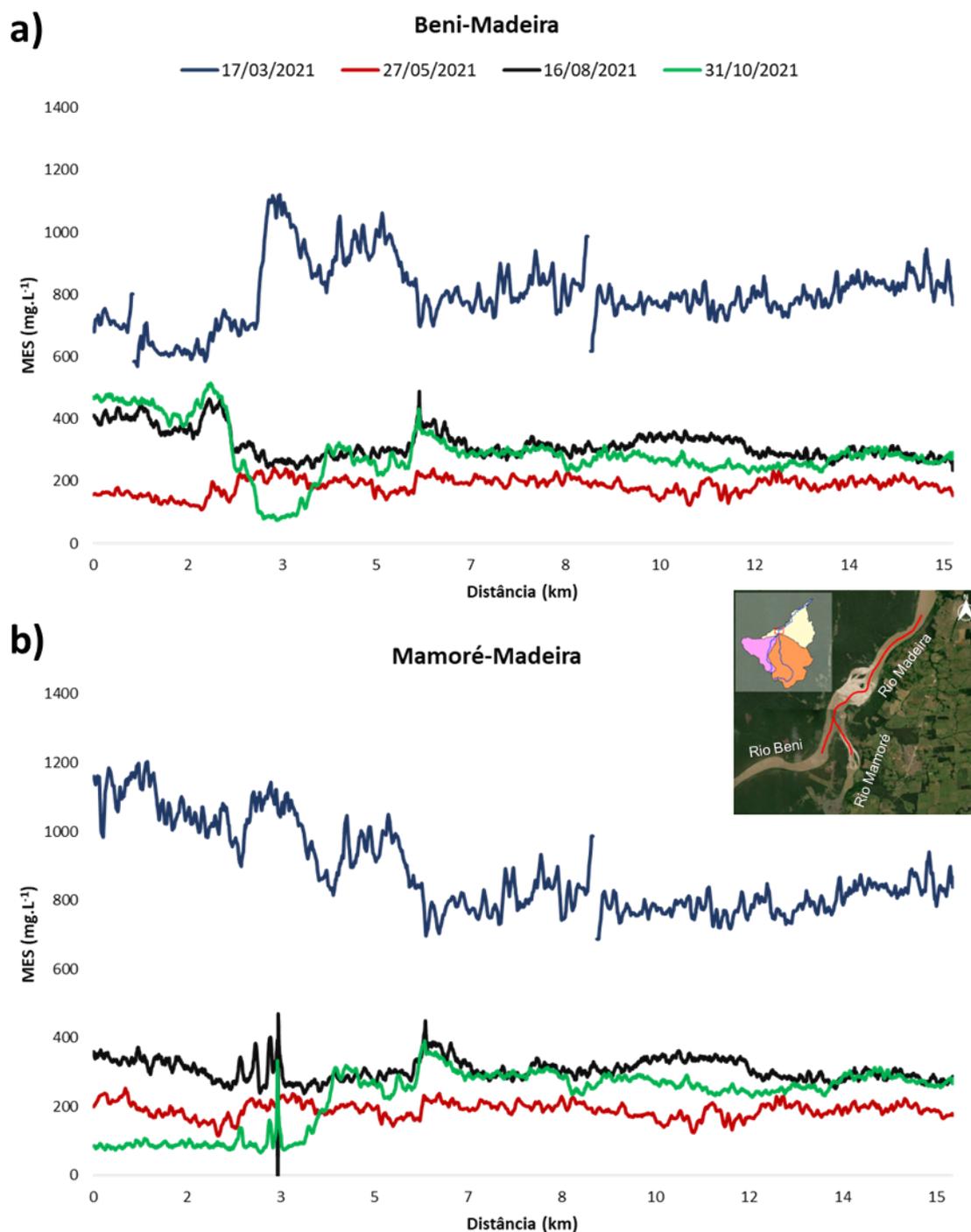
com correção atmosférica robusta.

A Figura 28 exibe os perfis da concentração da MES estimada nas imagens PlanetScope ao longo dos rios Beni-Madeira e Mamoré-Madeira em 15km. No perfil longitudinal Beni-Madeira (Figura 29a), a MES média registrou 802 mg·L<sup>-1</sup> e 185 mg·L<sup>-1</sup> para os meses de março e maio de 2021, respectivamente, apresentando uma amplitude significativa de 635 mg·L<sup>-1</sup> em março e 157 mg·L<sup>-1</sup> em maio entre os valores máximos e mínimos estimados para o período. Durante os períodos de águas baixas, a variação espacial no perfil da concentração da MES foi menor, com médias de 318 mg·L<sup>-1</sup> em agosto e 290 mg·L<sup>-1</sup> em outubro de 2021, e uma diferença de 403 mg·L<sup>-1</sup> e 512 mg·L<sup>-1</sup> entre os valores máximos e mínimos, respectivamente.

No perfil longitudinal entre os rios Mamoré-Madeira (Figura 28b), observou-se que os valores médios da MES foram de 885 mg·L<sup>-1</sup> em março, alcançando um pico de 1289 mg·L no rio Mamoré, que contribui com uma quantidade relativamente menor de material em comparação ao rio Beni. Nos meses de maio, agosto e outubro, a variação concentra-se principalmente entre 150 mg·L<sup>-1</sup> e 450 mg·L<sup>-1</sup> ao longo de todo o perfil, com os valores mínimos registrados no trecho correspondente ao rio Mamoré em agosto, atingindo cerca de 35 mg·L<sup>-1</sup>.

De forma geral, tanto no perfil Beni-Mamoré quanto no perfil Mamoré-Madeira, não foi observada uma tendência de redução nos valores médios da concentração de MES ao longo de um trecho de 16 km, seja de montante para jusante, como indicado pela concentração média nas seções mais próximas ao reservatório por Santos et al. (2024), ou a jusante da usina no rio Madeira, conforme destacado por Espinoza Villar et al. (2013).

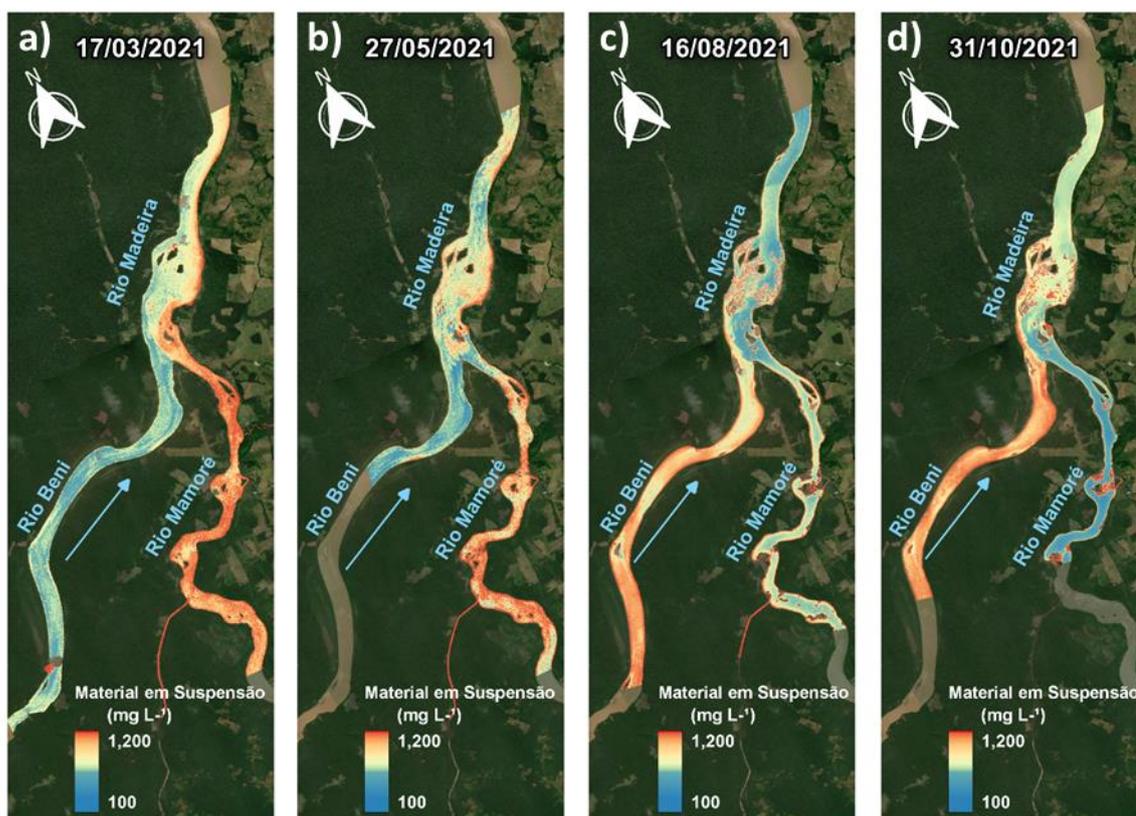
As variações nos valores máximos, médios e mínimos de MES ressaltam as limitações do modelo utilizado nas imagens PlanetScope para rios com uma amplitude significativa na quantidade de sedimento transportado. Isso se torna evidente quando comparado com outros modelos utilizados em estudos realizados por Espinoza Villar et al. (2013) e Santos et al. (2024) em diferentes trechos da bacia do Madeira. Neste trabalho, os valores mais homogêneos foram identificados no trecho correspondente ao rio Madeira, onde a variação entre o estimado e o observado em campo foi menor do que nos rios Beni e Mamoré.



**Figura 28:** (a) Perfil longitudinal (montante-jusante) da contração de MES sobre os rios Beni e Madeira. (b) Perfil longitudinal da MES entre os rios Mamoré e Madeira.

A Figura 29 ilustra a distribuição espacial da concentração de MES mapeada ao longo dos rios Beni, Mamoré e Madeira nos períodos de águas altas (março) a águas baixas (outubro) de 2021. Na imagem de março de 2021 (Figura 30a), fica evidente a grande variação espacial da concentração de MES no rio Mamoré, enquanto os valores no rio Beni são relativamente

menores. Após a confluência, na margem direita do rio Madeira, observa-se uma maior quantidade de sedimentos transportados. No entanto, é importante ressaltar que essa relação entre os dois canais tende a superestimar os valores, já que, nesse período, o rio Beni apresenta uma concentração de MES cerca de  $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  maior em comparação com o Mamoré na prática.



**Figura 29:** Variabilidade espacial e temporal da concentração de MES nos meses de março, abril, agosto e outubro de 2021 nos rios Beni, Mamoré e Madeira.

Na imagem de maio de 2021 (Figura 29b), os maiores valores da concentração de MES continuam a se destacar no rio Mamoré, embora ambos os canais apresentem concentrações estimadas menores do que as observadas em campo. Após a confluência, no rio Madeira, a distribuição da concentração de MES é mais homogênea, mas ainda é evidente uma maior predominância de sedimentos transportados na margem direita. Em agosto (Figura 29c), o rio Beni registra as maiores estimativas de concentração de MES. Nesse período, o rio Madeira demonstrou uma maior predominância de sedimentos próximo à margem esquerda, material este proveniente do rio Beni.

Apesar de estar no período de águas baixas, o rio Mamoré ainda apresenta valores elevados de concentração de MES. Em contraste com as observações de Maciel et al. (2020)

para um rio de água clara como o Tapajós, que transporta pouca quantidade de material em suspensão, o rio Mamoré apresentou maiores valores de concentração de MES do que o rio Beni, apesar deste último ser um rio de água branca com elevada carga de sedimento.

Na Figura 29d, a forte predominância da concentração de MES no rio Beni permanece evidente, enquanto o rio Mamoré, neste mês, apresenta uma superestimação de quase 900% em relação aos valores coletados em campo, apesar de exibir uma distribuição espacial mais homogênea. Na região de confluência, o rio Mamoré parece ter uma predominância espacial mais marcante, embora, na prática, esse canal apresente um volume de água e uma concentração de MES menores. Os valores da concentração de MES no rio Madeira se concentram principalmente próximo à margem esquerda, fluindo por quilômetros até apresentarem uma maior homogeneidade no material transportado. Nesse período, os valores registrados no rio Madeira foram cerca de 70% mais elevados do que os medidos in loco.

A jusante da confluência desses canais, o rio Madeira apresentou menor variação entre os valores estimados por sensoriamento remoto e os valores observados em campo, comparado com o trecho de montante. A Tabela 15 apresenta os valores de concentração de MES e a diferença percentual entre os valores estimados por satélites e os observados na seção Estação, localizada próxima da UHE. No mês de março de 2021, o dado de sensoriamento remoto subestimou a concentração de MES em aproximadamente 27% em relação aos valores observados em campo. A concentração estimada foi de  $675 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , enquanto a observada foi de  $926 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , resultando em uma diferença de  $251 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

**Tabela 15:** Concentração média de Material em Suspensão (MES) e diferença percentual entre os valores observados e estimados por sensoriamento remoto na seção Estação do Rio Madeira. Os valores estão expressos em  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  e em porcentagem.

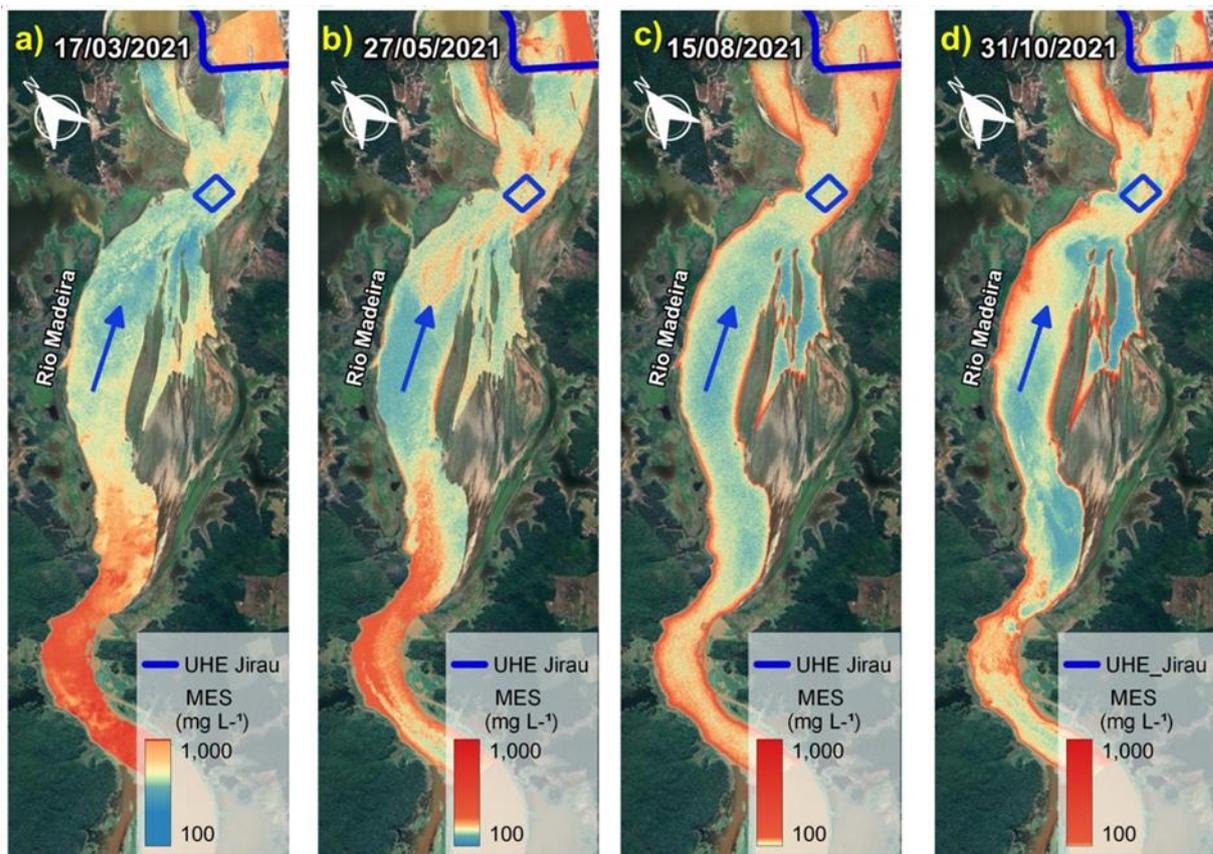
Data	Estação		Diferença
	MES Estimado	MES Observado	
17/03/2021	675	926	-27%
27/05/2021	256	165	55%
16/08/2021	121	86	41%
31/10/2021	86	71	21%

Em maio de 2021, o valor estimado para a concentração de MES, resultou em uma diferença percentual de 55%. Em agosto de 2021, a diferença percentual foi de 41%, refletindo também uma superestimação considerável. No mês de outubro de 2021, a estimativa de concentração de MES foi de  $86 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , enquanto a concentração observada foi de  $71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , resultando em uma diferença percentual de 21%, mostrando uma superestimação menor em

comparação com os outros períodos.

Esses resultados evidenciam a elevada variação nas estimativas de MES derivadas de imagens Planet em relação aos valores observados em campo ao longo dos diferentes meses. As diferenças percentuais variaram de -27% a 55%, sugerindo a necessidade de ajustes e calibrações na equação para obter estimativas mais precisas das concentrações de MES no rio Madeira, adaptando-se às características dos instrumentos PS2 e PSB.SD da constelação PlanetScope utilizados. Os valores obtidos divergem dos encontrados por Maciel et al. (2020) para o rio Tapajós, que possui características físico-químicas distintas deste canal fluvial.

Na Figura 30 é apresentada a variabilidade espacial da MES estimada com imagens PlanetScope próximo da UHE, comparada com as medições observadas na seção de EST. A diferença espacial da concentração de MES entre o estimado e o observado nesse trecho do rio Madeira foi menor em relação à região de confluência (Figura 29), e apresentou maior coerência com os valores observados em campo nos quatro meses amostrados em 2021.



**Figura 30:** Variabilidade espacial e temporal da concentração de Material em Suspensão (MES) nos meses de março, abril, agosto e outubro de 2021 no Rio Madeira, na Seção Estação localizada a 2 km a montante da barragem.

A seção Estação (Figura 30) está localizada em uma região de menor velocidade de fluxo do rio, com largura de 1 km e profundidades superiores a 40 m. Embora seja uma seção

ampla, este trecho do rio Madeira apresenta maior estabilidade e condições mais favoráveis à deposição do material transportado. No mês de março, os valores de MES foram mais homogêneos, variando entre 500 e 800 mg·L<sup>-1</sup>. Em maio, observou-se uma menor amplitude, com valores entre 200 e 300 mg·L<sup>-1</sup>, enquanto nos meses de agosto e outubro, os valores variaram de 50 a 200 mg·L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Na Figura 30, nota-se que as concentrações mais elevadas de MES se encontram mais a montante (cerca de 12 km), um comportamento que pode estar associado a características como o estreitamento do canal, o que favorece o aumento da velocidade do fluxo e, conseqüentemente, uma maior capacidade de transporte dos sedimentos em suspensão. Além disso, as limitações do modelo aplicado nas imagens da constelação PlanetScope apresentaram resultados distintos para os diferentes trechos analisados, como a região de confluência dos rios Beni e Mamoré, o rio Madeira após a confluência e a área próxima à barragem.

A alta resolução temporal e espacial da constelação de satélites Planet, com os sensores Dove e SuperDove, pode contribuir para um monitoramento complementar da concentração de MES em grandes rios, proporcionando uma frequência amostral quase diária na ausência de nuvens. Contudo, ainda são necessários ajustes adicionais para que esse tipo de monitoramento seja realizado com precisão utilizando as imagens dessa constelação (MACIEL et al., 2020).

As estimativas de MES apresentaram discrepâncias significativas em relação aos valores observados em campo para os três rios analisados (Beni, Mamoré e Madeira). Os resultados deste estudo não demonstraram uma boa capacidade dos sensores PlanetScope para o monitoramento de grandes rios com elevada carga de sedimentos. Isso contrasta com os resultados apresentados por Maciel et al. (2020), em que os autores ressaltaram o potencial dos CubeSats da constelação PlanetScope para o monitoramento de águas interiores, particularmente em corpos d'água com elevada turbidez, devido à sua alta resolução espacial-temporal. No entanto, os dados coletados nos rios Beni e Mamoré, caracterizados por sua alta turbidez, não demonstraram um bom desempenho com o modelo empírico avaliado neste trabalho, evidenciando uma grande discrepância entre as estimativas derivadas das imagens PlanetScope e os dados observados em campo.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação buscou compreender as mudanças ocorridas no uso e cobertura do solo nas bacias dos rios Beni e Mamoré, na Bolívia, e entender a dinâmica hidrossedimentar na confluência dos rios Beni e Mamoré, bem como no rio Madeira a montante da UHE de Jirau. Para isso, foram utilizados dados observados em campo e por sensoriamento remoto, com ênfase na avaliação do uso das imagens PlanetScope para o monitoramento do transporte de sedimentos em suspensão.

A análise da precipitação nas bacias dos rios Mamoré e Beni não revelou uma tendência clara de aumento ou redução ao longo das décadas analisadas. Essa ausência de uma tendência pode estar relacionada à variabilidade natural do clima e às possíveis influências do uso e cobertura do solo, que podem mascarar padrões mais evidentes. Além disso, a qualidade e a quantidade de dados disponíveis também podem limitar a detecção de tendências mais sutis. Portanto, são necessários estudos mais detalhados para aprofundar a compreensão das relações entre essas variáveis e identificar impactos climáticos ou antrópicos sobre a dinâmica hidrossedimentar nas bacias analisadas.

A relação entre a concentração de material em suspensão (MES) e a precipitação nas estações dos rios Beni e Mamoré revelou que a MES não varia de maneira linear com as chuvas, apresentando um comportamento de histerese. Observou-se que, durante a redução da precipitação, a MES diminui mais lentamente, e, na fase de aumento da precipitação, os valores de MES aumentam.

Os dados e resultados apresentados nesta pesquisa fornecem uma compreensão da dinâmica hidrossedimentar na confluência dos rios Beni e Mamoré, bem como no trecho do rio Madeira montante da UHE Jirau. As observações estabelecem uma base importante para estudos futuros sobre as implicações ambientais dessas dinâmicas, incluindo uma avaliação dos efeitos do represamento do rio Madeira na redução do transporte de sedimentos suspensos próximo à barragem.

No entanto, é importante reconhecer as limitações deste estudo. Em relação ao material em suspensão, tanto a descarga líquida quanto a sólida apresentaram pouca variação em comparação com estudos anteriores. A análise se limitou à avaliação geral desses parâmetros e não abordou aspectos mais específicos, como a granulometria dos sedimentos. Além disso, a investigação se baseou em um número restrito de seções ao longo dos rios estudados, o que pode não captar toda a complexidade do sistema. Portanto, uma abordagem mais abrangente, que envolva um conjunto maior de seções de amostragem, será fundamental para compreender

melhor a influência do reservatório e sua extensão até a confluência.

Outra limitação identificada foi no uso das imagens PlanetScope para estimativas de MES na superfície. Os dados revelaram-se inadequados devido às significativas superestimativas e subestimativas em relação aos valores observados em campo. As discrepâncias entre as estimativas e as medições reais indicam a necessidade de uma correção atmosférica rigorosa das imagens e ajustes modelos empíricos para este sensor, a fim de garantir maior precisão nas estimativas. Essas inconsistências destacam a importância de uma abordagem criteriosa ao utilizar dados de sensoriamento remoto para estudos hidrológicos e ambientais, especialmente na avaliação da concentração de material em suspensão em rios e corpos d'água com grande amplitude de MES.

Os resultados apresentados neste estudo são fundamentais para a compreensão dos processos de produção do espaço e das transformações da paisagem nessa região, além de fornecer subsídios para elaborar estratégias de conservação e manejo sustentável dos recursos naturais no alto curso da bacia do rio Madeira.

Nesse contexto, as principais recomendações desta pesquisa são:

- Continuar o monitoramento da descarga líquida e coleta de amostras para a concentração de material em suspensão.
- Incluir o monitoramento do material suspenso em profundidade, ampliando a análise para diferentes níveis da coluna d'água.
- Realizar uma análise abrangente dos impactos diretos e indiretos do represamento do rio Madeira no regime hidrológico e sedimentar, tanto a montante quanto a jusante da UHE.
- Aumentar o número de seções amostrais no rio Mamoré para a construção de um modelo mais robusto para o monitoramento do transporte de sedimentos por sensoriamento remoto.

## 7. CRONOGRAMA

ETAPAS/MESES	2022											2023											2024		
	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
Levantamento bibliográfico	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R				
Cumprimentos dos créditos	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R															
Levantamento dados secundários						R	R	R	R	R	R	R	R	R	R										
Estágio de Docência			R	R	R	R	R	R																	
Seminário de Projetos													R												
Elaboração de projeto de qualificação								R	R	R	R	R	R	R	R	R									
Exame de Qualificação																	R								
Análise dos dados													R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R		
Redação Final da Dissertação																		R	R	R	R	R	R		
Defesa da Dissertação de Mestrado																								R	
Entrega da versão final da dissertação																								R	

X = Planejado

R = Realizado

## 8. REFERÊNCIAS

ALCÁRCEL-GUTIÉRREZ, F. A. et al. Geological Map of South America in Google Earth. **Journal of Maps**, v. 19, n. 1, p. 2185167, 31 dez. 2023.

ANA. **HIDROWEB**. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 29 jan. 2024.

BARBOSA, C. C. F. PRINCÍPIOS FÍSICOS DO SENSORIAMENTO REMOTO AQUÁTICO. Em: BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. (Eds.). **Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos**. São José dos Campos: INPE, 2019. p. 23–54.

BARBOSA, C. C. F.; DE MORAES NOVO, E. M. L.; MARTINS, V. S. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. v. 1

BERNINI, H. et al. **Descarga Sólida em Suspensão e dinâmica fluvial na bacia do rio Madeira: um perfil no período de cheia hidrológica**. seminário latino-americano e v seminário ibero-americano de Geografia física. **Anais...** Em: IX SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO E V SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA. Guimarães, Portugal: CEGOT; Universidade do Minho, 2016.

BEST, J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 1, p. 7–21, 2019.

BEST, J. L. FLOW DYNAMICS AT RIVER CHANNEL CONFLUENCES: IMPLICATIONS FOR SEDIMENT TRANSPORT AND BED MORPHOLOGY. Em: ETHRIDGE, F. G.; FLORES, R. M.; HARVEY, M. D. (Eds.). **Recent Developments in Fluvial Sedimentology**. [s.l: s.n.]. p. 27–35.

BOLÍVIA. Lei nº 1.333, de 15 de junho de 1992. LEY DEL MEDIO AMBIENTE. . 11 abr. 2000.

BRANDT, S. A. Classification of geomorphological effects downstream of dams. **CATENA**, v. 40, n. 4, p. 375–401, ago. 2000.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Presidente da Republica. Brasília, DF. 8 jan. 1997.

CARVALHO, A. P. V.; BRUMATTI, D. V.; DIAS, H. C. T. Importância do manejo da bacia hidrográfica e da determinação de processos hidrológicos. **Revista brasileira de agropecuária sustentável**, v. 2, n. 2, p. 148–156, 2012.

CHARLTON, R. **Fundamentals of fluvial geomorphology**. London ; New York: Routledge, 2008.

CHEREM, L. F. S. et al. Análise morfométrica em bacias hidrográficas. Em: MAGALHÃES JUNIOR, A. P.; BARROS, L. F. DE P. (Eds.). **Hidrogeomorfologia: Formas, Processos e Registros Sedimentares Fluviais**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020.

- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.
- COELHO, A. L. N. GEOMORFOLOGIA FLUVIAL DE RIOS IMPACTADOS POR BARRAGENS. **Caminhos de Geografia**, v. 9, n. 26, p. 16–32, 2008.
- CONSTANTINE, J. A. et al. 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.
- CUNHA, S. B. Geomorfologia Fluvial. Em: CUNHA, S. B. DA; GUERRA, A. J. T. (Eds.). **Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002. p. 157–186.
- ESPINOZA VILLAR, R. et al. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 44, p. 45–54, 2013.
- ESPINOZA-VILLAR, R. et al. Spatio-temporal monitoring of suspended sediments in the Solimões River (2000–2014). **Comptes Rendus. Géoscience**, v. 350, n. 1–2, p. 4–12, 20 jun. 2017.
- FASSONI-ANDRADE, A. C. et al. Amazon Hydrology From Space: Scientific Advances and Future Challenges. **Reviews of Geophysics**, v. 59, n. 4, p. e2020RG000728, dez. 2021.
- FASSONI-ANDRADE, A. C. et al. (EDS.). **Hidrologia da Amazônia vista do espaço: Avanços científicos e desafios futuros**. Porto Alegre, RS: ABRHidro, 2023.
- FEARNSIDE, P. M. **Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras**. Manaus: INPA, 2015.
- FILIZOLA, N. **Transfert sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens**. Tese (Doutorado em Hidrologia e Geologia)—[s.l.] Université Toulouse III Paul Sabatier, 2003.
- 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.
- FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. Suspended sediment yields in the Amazon basin: an assessment using the Brazilian national data set. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 23, n. 22, p. 3207–3215, 2009.
- FILIZOLA, N. P.; GUYOT, J. L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 4, p. 566–576, 1 dez. 2011.
- FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de textos, 2007.
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. [s.l.] Oficina de textos, 2007.

FUNK, C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 1, 8 dez. 2015.

GAMARO, P. E. **Medidores acústicos doppler de vazão**. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2012.

GOMES, F. A. L. **CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO FARINHAS-PB ATRAVÉS DE DADOS SRTM**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia)—[s.l.] Universidade Federal da Paraíba, 2016.

GUYOT, J. L. et al. 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.

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, jul. 1999.

GUYOT, J.-L. et al. Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon. Em: **IAHS-AISH Publication**. [s.l.: s.n.]. v. 236p. 55–63.

HAMILTON, S. K.; SIPPEL, S. J.; MELACK, J. M. Seasonal inundation patterns in two large savanna floodplains of South America: the Llanos de Moxos (Bolivia) and the Llanos del Orinoco (Venezuela and Colombia). **Hydrological Processes**, v. 18, n. 11, p. 2103–2116, 2004.

HINDERER, M. From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales. **Sedimentary Geology**, v. 280, p. 21–59, dez. 2012.

HUNZIKER, S. et al. Identifying, attributing, and overcoming common data quality issues of manned station observations. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 11, p. 4131–4145, set. 2017.

HYBAM. **Observation Service SO HYBAM**. , [s.d.]. Disponível em: <SO-HyBam – Service d'observation des ressources en eaux du bassin de l'Amazone (obs-mip.fr)>. Acesso em: 10 jan. 2023

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução: José Carlos Neves Epiphânio. São José dos Campos: Parênteses, 2009.

**JIRAU ENERGIA**. Disponível em: <<https://www.jirauenergia.com.br/>>. Acesso em: 17 jan. 2024.

KAIMOWITZ, D.; THIELE, G.; PACHECO, P. The Effects of Structural Adjustment on Deforestation and Forest Degradation in Lowland Bolivia. **World Development**, v. 27, n. 3, p. 505–520, mar. 1999.

KILLEEN, T. J. et al. Thirty Years of Land-cover Change in Bolivia. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, v. 36, n. 7, p. 600–606, nov. 2007.

KILLEEN, T. J. et al. Total Historical Land-Use Change in Eastern Bolivia: Who, Where, When, and How Much? **Ecology and Society**, v. 13, n. 1, p. 27, 2008.

LATRUBESSE, E. M. et al. Damming the rivers of the Amazon basin. **Nature**, v. 546, n. 7658, p. 363–369, jun. 2017.

LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C.; SINHA, R. Grandes sistemas fluviais tropicais: uma visão geral. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, n. 1, 17 nov. 2005.

LOPES, E. R. DO N. et al. MODELAGEM AMBIENTAL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS: CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA E PEDOLÓGICA DA BACIA DO RIO UNA-IBIÚNA, BRASIL. **Geosul**, v. 33, n. 66, p. 105–127, 2018.

LOPES, I. D. 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, 17 dez. 2018.

MACIEL, D. A. et al. Evaluating the potential of CubeSats for remote sensing reflectance retrieval over inland waters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 7, p. 2807–2817, 2 abr. 2020.

**MapBiomias**. Disponível em: <[https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama\\_set\\_language=pt-BR](https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas-1?cama_set_language=pt-BR)>. Acesso em: 19 jul. 2023.

MARINHO, R. R. **Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo do fluxo de água e matéria no arquipélago de Anavilhanas, rio Negro-Amazonas, Brasil**. Tese (Doutorado em Clima e Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente—Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas na Amazônia e Universidade Estadual Amazonas, 2019.

MARINHO, R. R. et al. Suspended sediment transport estimation in Negro River (Amazon Basin) using MSI/Sentinel-2 data. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 1, 13 jan. 2022a.

MARINHO, R. R. et al. Riverbed morphology and hydrodynamics in the confluence of complex mega rivers - A study in the Branco and Negro rivers, Amazon basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 118, p. 103969, out. 2022b.

MARINHO, R. R.; RIVERA, I. A. **VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO NAS SUB-BACIAS DO RIO NEGRO (AM) E RIO BRANCO (RR)**. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...**Campinas: GALOÁ, 2019.

MARINHO, R. R.; SEVERO, E. B. **COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO RIO UATUMÃ E REPRESA DE BALBINA, AMAZONAS, BRASIL**. Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...**Florianópolis: GALOÁ, 2023.

MARINHO, T. et al. Suspended Sediment Variability at the Solimões and Negro Confluence between May 2013 and February 2014. **Geosciences**, v. 8, n. 7, p. 265, 19 jul. 2018.

MARTINEZ, J. M. et al. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. **CATENA**, v. 79, n. 3, p. 257–264, dez. 2009.

MARTINEZ, J.-M. et al. The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter: AMAZON RIVER WATER OPTICAL PROPERTIES. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 120, n. 7, p. 1274–1287, jul. 2015.

MELO, E. C. DE; FILIZOLA JUNIOR, N. P.; GUYOT, J. L. Estudo comparativo de índices morfométricos nas bacias dos rios Juruá e Purus região Amazônica. v. 44, n. Ciência&Ambiente, p. 71–86, 2012.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

NOGUEIRA, R. J. B.; OLIVEIRA NETO, T. Os Rios na Fronteira do Brasil. **Conhecer: debate entre o público e o privado**, v. 12, n. 29, p. 55–73, 2022.

NOVO, E. M. L. DE M. SISTEMAS AQUÁTICOS CONTINENTAIS: DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS. Em: BARBOSA, C. C. F.; MARTINS, V. S.; NOVO, E. M. L. DE M. (Eds.). **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações**. São José dos Campos: INPE, 2019. p. 09–22.

OTCA. **ORGANIZAÇÃO DO TRATADO DE COOPERAÇÃO AMAZÔNICA**. , nov. 2010. Disponível em: <<http://otca.org/pt/wp-content/uploads/2021/04/Agenda-Estrate%CC%81gica-de-Cooperac%CC%A7a%CC%83o-Amazo%CC%82nica.pdf>>. Acesso em: 15 maio. 2023

PARSONS, D. R. et al. 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, 15 set. 2013.

PINTO, N. L. DE S. et al. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.

PLANET. **PLANET IMAGERY PRODUCT SPECIFICATIONS**. , 2023. Disponível em: <<https://assets.planet.com/docs/combined-imagery-product-spec-april-2019.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2023

PLANET. **Planet Imagery Products**. , [s.d.]. Disponível em: <<https://www.planet.com/products/planet-imagery/>>. Acesso em: 19 maio. 2023

REDO, D. J.; AIDE, T. M.; CLARK, M. L. The Relative Importance of Socioeconomic and Environmental Variables in Explaining Land Change in Bolivia, 2001–2010. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 102, n. 4, p. 778–807, jul. 2012.

RIBEIRO, W. C. **Geografia política da água**. São Paulo: Annablume, 2008.

RIVERA, I. A. et al. Decline of Fine Suspended Sediments in the Madeira River Basin (2003–2017). **Water**, v. 11, n. 3, p. 514, 12 mar. 2019.

RIVERA, I. A. et al. 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. 738527, 20 set. 2021.

SANTOS, A. L. M. R. D. et al. Purus River suspended sediment variability and contributions to the Amazon River from satellite data (2000–2015). **Comptes Rendus Geoscience**, v. 350, n. 1–2, p. 13–19, jan. 2018.

SANTOS, D. R. A. E. et al. 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. 103786, abr. 2024.

SANTOS, A. L. M. R. DOS. **Variabilidade no aporte de sedimentos do rio Purus: avaliação por sensores remotos e aspectos observacionais**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia—Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2015.

SANTOS, D. R. A. E. **Caracterização dos padrões de transporte sedimentar no reservatório da usina hidrelétrica de Jirau através de sensoriamento remoto utilizando imagens sentinel-2**. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica—Brasília: Universidade de Brasília, 2022.

SANTOS, V. C. D.; STEVAUX, J. C. PROCESSOS FLUVIAIS E MORFOLOGIA EM CONFLUÊNCIAS DE CANAIS: UMA REVISÃO. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 1, 31 mar. 2017.

SEVERO, E. B.; MARINHO, R. R. ANÁLISE DAS MUDANÇAS NA COBERTURA DO SOLO E NA PRECIPITAÇÃO NA BACIA DOS RIOS BENI E MAMORÉ. Em: ALEIXO, N. C. R.; DINIZ, R. F.; VIEIRA, A. F. S. G. (Eds.). **A GEOGRAFIA AMAZÔNICA EM MÚLTIPLAS ESCALAS**. São Paulo; Manaus: Alexa Cultural; Edua, 2024. v. 3p. 17–34.

SIOLI, H. The Amazon and its main affluents: Hydrography, morphology of the river courses, and river types. Em: SIOLI, H. (Ed.). **The Amazon**. Monographiae Biologicae. Dordrecht: Springer Netherlands, 1984. v. 56p. 127–165.

SOUZA FILHO, P. W. M. E. et al. Compartimentação morfoestrutural e neotectônica do sistema fluvial Guaporé-Mamoré-alto Madeira, Rondônia-Brasil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 29, n. 4, p. 469–476, 1999.

SOUZA, V. A. S. et al. **ANÁLISE MORFOMÉTRICA COM SUPORTE DE GEOTECNOLOGIA APLICADA NA BACIA DO RIO MADEIRA**. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Em: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Santos: GALOÁ, 2019.

SOUZA, V. A. S. D. et al. Dinâmica da conversão de floresta e tendências climáticas na bacia do rio Madeira. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 4, p. 2007–2034, 23 nov. 2022.

STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913–920, 1957.

SUMMERFIELD, M. A. **Global geomorphology: an introduction to the study of landforms**. Nachdr. ed. Harlow Munich: Pearson, Prentice Hall, 2008.

TEODORO, V. L. I. et al. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 11, n. 1, p. 137–156, 2007.

**The CHIRPS dataset website**. Disponível em: <<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>>. Acesso em: 19 jul. 2023.

TIMPE, K.; KAPLAN, D. The changing hydrology of a dammed Amazon. **Science Advances**, v. 3, n. 11, p. e1700611, 3 nov. 2017.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: UFRGS e EDUSP, 1993.

VAUCHEL, P. et al. A reassessment of the suspended sediment load in the Madeira River basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, based on 10 years of data from the HYBAM monitoring programme. **Journal of Hydrology**, v. 553, p. 35–48, out. 2017.

VENTICINQUE, E. et al. An explicit GIS-based river basin framework for aquatic ecosystem conservation in the Amazon. **Earth System Science Data**, v. 8, n. 2, p. 651–661, 23 nov. 2016.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

WITTMANN, H. et al. Sediment production and delivery in the Amazon River basin quantified by in situ-produced cosmogenic nuclides and recent river loads. **Geological Society of America Bulletin**, v. 123, n. 5–6, p. 934–950, 1 maio 2011.

ZANANDREA, F. et al. NOTA TÉCNICA: CONECTIVIDADE DOS SEDIMENTOS: CONCEITOS, PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 2, 1 abr. 2020.

ZANOTTA, D. C.; FERREIRA, M. P.; ZORTEA, M. **Processamento de imagens de satélite**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

## 9. ANEXO I

Publicações resultantes desta Dissertação:

SEVERO, Ednaldo Bras; MARINHO, Rogério Ribeiro. 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 (Orgs.). **A GEOGRAFIA AMAZÔNICA EM MÚLTIPLAS ESCALAS**. São Paulo; Manaus: Alexa Cultural; Edua, 2024, v. 3, p. 17–34.

SANTOS, D. A.; MARTINEZ, J. M.; OLIVETTI, D.; ZUMAK, A.; GUIMARÃES, D.; ANICETO, K.; SEVERO, E.; FERREIRA, O.; TRISTAN, H.; 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. 103786, 2024.

SEVERO, E. B.; MARINHO, R. R.; FILIZOLA, N. P.; MARTINEZ, J. M.; QUEIROZ, M. S. Balanço hidrossedimentológico na região de confluência entre os rios Beni e Mamoré. *In*: **Anais do 14º SINAGEO – Simpósio Nacional de Geomorfologia**. Corumbá - MS, 2022.

MARTINEZ, J. M.; ROIG, H.; OLIVETTI, D.; ALVES, R. S.; SERAFIM, T.; FERREIRA, O.; SANTOS, D. A.; ANICETO, K.; BORGES, H.; GUIMARÃES, D.; SEVERO, E.; FILIZOLA, N.; FERNANDES, D.; SOUTO, C. Estação radiométrica hiperespectral autônoma para monitorar os fluxos de sedimentos em alta frequência no Rio Madeira na UHE Jirau. *In*: **ANAIS do II FLUHIDROS - Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica e XVI ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**. Curitiba - PR, 2024.

OLIVETTI, D.; MARTINEZ, J. M.; FRANÇA, D.; ZUMAK, A.; SEVERO, E.; SANTOS, D.; MARINHO, R.; FERNANDES, D.; SAOUTO, C.; ROIG, H. Desenvolvendo um modelo de sensoriamento remoto para estimativa de sólidos em suspensão em águas turvas complexas: o caso do Rio Madeira. *In*: **ANAIS do II FLUHIDROS - Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica e XVI ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**. Curitiba - PR, 2024.

SANTOS, D. A.; MARTINEZ, J. M.; OLIVETTI, D.; NASCIMENTO, A. Z. A.; FRANÇA, D. G.; SEVERO, E. B.; FERREIRA, O. S.; FILIZOLA, N.; ROIG, H. Análise da variabilidade hidrossedimentar no reservatório da usina hidrelétrica de Jirau através de imagens dos satélites da constelação Sentinel-2. *In*: **ANAIS do II FLUHIDROS - Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica e XVI ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**. Curitiba - PR, 2024.