

O regime fluvial do Rio Madeira, Bacia Amazônica

The fluvial regime of the Madeira River, Amazon Basin

El régimen fluvial del Río Madeira, Cuenca del Amazonas

Matheus Silveira de Queiroz

Universidade Federal do Amazonas

matheussilveiradequeiroz@gmail.com**Rogério Ribeiro Marinho**

Universidade Federal do Amazonas

rogeo@ufam.edu.br**Resumo**

Este estudo analisou o regime fluvial do Rio Madeira, principal afluente da margem direita do Rio Amazonas, com ênfase em sua sazonalidade e variabilidade temporal. Através de análise de dados fluviométricos de estações distribuídas ao longo do curso do rio, foram identificados três segmentos hidrologicamente distintos, caracterizados por diferentes padrões de variação sazonal. As estações próximas à confluência com o Amazonas apresentam regime similar ao rio principal, com picos de cheia concentrados em junho, enquanto as estações localizadas no alto e médio curso exibem máximos entre março e abril, refletindo a influência direta do regime fluvial regional. A descarga líquida média anual estimada próximo à foz foi de $27.612 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, consolidando a posição do Madeira como o principal tributário da margem direita na bacia amazônica. A análise da variabilidade hidrológica revelou uma razão entre descargas máxima e mínima ($Q_{\max}/Q_{\min}$) de 7,34 e um coeficiente de regime de cheia ($Q_{\max}/Q_{\text{média}}$) de 1,85, indicando elevada sensibilidade aos ciclos sazonais de precipitação. O estudo evidenciou que o efeito de barramento hidráulico exercido pelo Rio Amazonas sobre o Madeira se manifesta com maior intensidade nos primeiros 160 km a montante da confluência, modificando significativamente a dinâmica fluvial local. Em perspectiva comparativa, o Rio Madeira apresenta variabilidade de descarga intermediária em relação a outros grandes rios, superando sistemas como Congo e Amazonas, mas inferior aos rios Brahmaputra e Orinoco. Os resultados obtidos ressaltam a importância do monitoramento hidrológico contínuo da bacia do Rio Madeira, especialmente considerando os impactos potenciais das mudanças climáticas e das crescentes intervenções antrópicas, particularmente a implantação de aproveitamentos hidrelétricos na bacia.

Palavras-chave: Rios Tropicais. Grandes Rios. Impactos Antrópicos. Sazonalidade de Rios Amazônicos.

Abstract

This study analyzed the fluvial regime of the Madeira River, the main right-bank tributary of the Amazon River, with emphasis on its seasonality and temporal variability. Through analysis of fluviometric data from stations distributed along the river course, three hydrologically distinct segments were identified, characterized by different seasonal variation patterns. Stations near the confluence with the Amazon exhibit a regime like the main river, with flood peaks concentrated in June, while stations located in the upper and middle reaches show maximum between March and April, reflecting the direct influence of the regional fluvial regime. The estimated mean annual water

discharge near the mouth was $27,612 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, consolidating the Madeira's position as the principal right-bank tributary in the Amazon basin. Hydrological variability analysis revealed a ratio between maximum and minimum discharges ($Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$) of 7.34 and a flood regime coefficient ($Q_{\text{max}}/Q_{\text{mean}}$) of 1.85, indicating high sensitivity to seasonal precipitation cycles. The study demonstrated that the hydraulic backwater effect exerted by the Amazon River on the Madeira manifests with greater intensity in the first 160 km upstream of the confluence, significantly modifying local fluvial dynamics. From a comparative perspective, the Madeira River exhibits intermediate discharge variability relative to other major rivers, surpassing systems such as the Congo and Amazon, but lower than the Brahmaputra and Orinoco rivers. The results underscore the importance of continuous hydrological monitoring of the Madeira River basin, especially considering the potential impacts of climate change and increasing anthropogenic interventions, particularly the implementation of hydroelectric developments in the basin.

Keywords: Tropical Rivers. Large Rivers. Anthropogenic Impacts. Amazonian River Seasonality.

Resumen

Este estudio analizó el régimen fluvial del Río Madeira, principal afluente de la margen derecha del Río Amazonas, con énfasis en su estacionalidad y variabilidad temporal. A través del análisis de datos fluviométricos de estaciones distribuidas a lo largo del curso del río, se identificaron tres segmentos hidrológicamente distintos, caracterizados por diferentes patrones de variación estacional. Las estaciones próximas a la confluencia con el Amazonas presentan un régimen similar al río principal, con picos de crecida concentrados en junio, mientras que las estaciones ubicadas en el curso alto y medio exhiben máximos entre marzo y abril, reflejando la influencia directa del régimen fluvial regional. La descarga líquida media anual estimada cerca de la desembocadura fue de $27.612 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, consolidando la posición del Madeira como el principal tributario de la margen derecha en la cuenca amazónica. El análisis de la variabilidad hidrológica reveló una relación entre descargas máxima y mínima ($Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$) de 7,34 y un coeficiente de régimen de crecida ($Q_{\text{max}}/Q_{\text{media}}$) de 1,85, indicando alta sensibilidad a los ciclos estacionales de precipitación. El estudio evidenció que el efecto de represamiento hidráulico ejercido por el Río Amazonas sobre el Madeira se manifiesta con mayor intensidad en los primeros 160 km aguas arriba de la confluencia, modificando significativamente la dinámica fluvial local. Desde una perspectiva comparativa, el Río Madeira presenta variabilidad de descarga intermedia en lo que se refiere a otros grandes ríos, superando sistemas como el Congo y Amazonas, pero inferior a los ríos Brahmaputra y Orinoco. Los resultados obtenidos resaltan la importancia del monitoreo hidrológico continuo de la cuenca del Río Madeira, especialmente considerando los impactos potenciales del cambio climático y las crecientes intervenciones antrópicas, particularmente la implementación de aprovechamientos hidroeléctricos en la cuenca.

Palabras clave: Ríos Tropicales. Grandes Ríos. Impactos Antrópicos. Estacionalidad de Ríos Amazónicos.

Introdução

A Bacia Amazônica, maior bacia hidrográfica do mundo, abrange uma área superior à 6 milhões de km^2 , distribuídos entre nove países (Brasil, Peru, Bolívia, Colômbia, Equador, Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa), com cerca de 60% localizados no Brasil. Seu principal rio, o Amazonas, possui uma descarga líquida média anual de $209.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, correspondendo entre 16% e 20% do total das águas doces continentais (MOLLINIER et al., 1996), que também o classifica como

o maior rio do mundo em descarga líquida. Além disso, também transporta cerca de 1000 Mt.ano⁻¹ de sedimentos para o oceano Atlântico (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017).

A Bacia Amazônica, além do Rio Amazonas, também possui alguns dos maiores rios do mundo, como os Rios Negro, Madeira, Japurá e Tapajós, com descarga líquida de, respectivamente, ~35.000 m³.s⁻¹ (MARINHO et al., 2021), ~27.000 m³.s⁻¹ (VAUCHEL et al., 2017), 18.600 m³.s⁻¹ e 13.500 m³.s⁻¹ (LATRUBESSE et al., 2005), que se distinguem por suas características multicanais complexas. Esses rios apresentam regimes fluviais distintos que, influenciados por fatores geológicos, climáticos e biogeoquímicos, são classificados em rios água branca (por exemplo, Amazonas, Madeira), preta (por exemplo, Negro) e clara (por exemplo, Tapajós) (SIOLI, 1984; RÍOS-VILLAMIZAR et al., 2020; ZANIN et al., 2025).

A dinâmica fluvial dos grandes rios da bacia Amazônica é essencial para as dinâmicas ecológicas, geomorfológicas e socioeconômicas da região, com destaque para as variações sazonais do nível da água, que influenciam diretamente os ecossistemas aquáticos, as populações ribeirinhas e os processos geomorfológicos (JUNK, et al., 2011; ALVES, 2013; JUNK et al., 2015; BANDEIRA et al., 2018; MARINHO et al., 2021; LATRUBESSE et al., 2021; ZANIN et al., 2025; RIBAS et al., 2025). Rios como o Amazonas, Negro e Madeira apresentam regimes fluviais marcados por uma forte sazonalidade, com oscilações anuais que podem ultrapassar 10 metros (ALVES, 2013), resultando em extensas áreas de inundação durante os períodos de cheia e emersão de barras de areia com mais de 300 metros de extensão na vazante (STRASSER et al., 2005).

A compreensão desses padrões é importante para entender os riscos associados a eventos hidrológicos extremos, como enchentes severas ou secas prolongadas, que têm se intensificado devido às mudanças climáticas e a alterações no uso do solo (LI et al., 2024). Recentemente, mudanças nos padrões de precipitação (PACA et al., 2020), aumento do desmatamento (DAVIDSON et al., 2012) e a construção de hidrelétricas (LATRUBESSE et al., 2017; RIVERA et al., 2019) têm alterado o comportamento natural dos rios na bacia. Conhecer a dinâmica atual desses sistemas possibilita analisar padrões fluviais e mitigar possíveis impactos. Portanto, esse trabalho tem como objetivo analisar a dinâmica fluvial do Rio Madeira, Bacia Amazônica.

Materiais e Métodos

Área de Estudo

A bacia do Rio Madeira abrange uma área de aproximadamente 1,4 milhão de km² e apresenta características geológicas e geomorfológicas distintas ao longo de seu percurso. No alto curso, a bacia drena áreas da Cordilheira dos Andes, uma bacia de foreland e os Llanos de Mojos, reconhecidos como uma das maiores planícies de inundação do mundo (HAMILTON et al., 2002). O médio curso

da bacia atravessa o escudo cristalino brasileiro, enquanto o baixo curso se estende pela planície Amazônica. Estes dois últimos segmentos constituem a área de estudo (Figura 1) delimitada para este trabalho, caracterizando-se por diferentes regimes e dinâmicas fluviais que refletem as particularidades geomorfológicas de cada região.

A bacia do Rio Madeira apresenta uma variação significativa na altitude, com as maiores elevações concentradas na região dos Andes, onde se registram altitudes superiores a 6.400 metros. Em sua porção central, predominam terrenos do escudo cristalino brasileiro, caracterizados por relevos mais antigos e intensamente intemperizados, com altitudes médias acima de 500 metros. No baixo curso, próximo à planície amazônica, o relevo se torna bastante plano, com níveis inferiores a 10 metros em relação ao nível local.

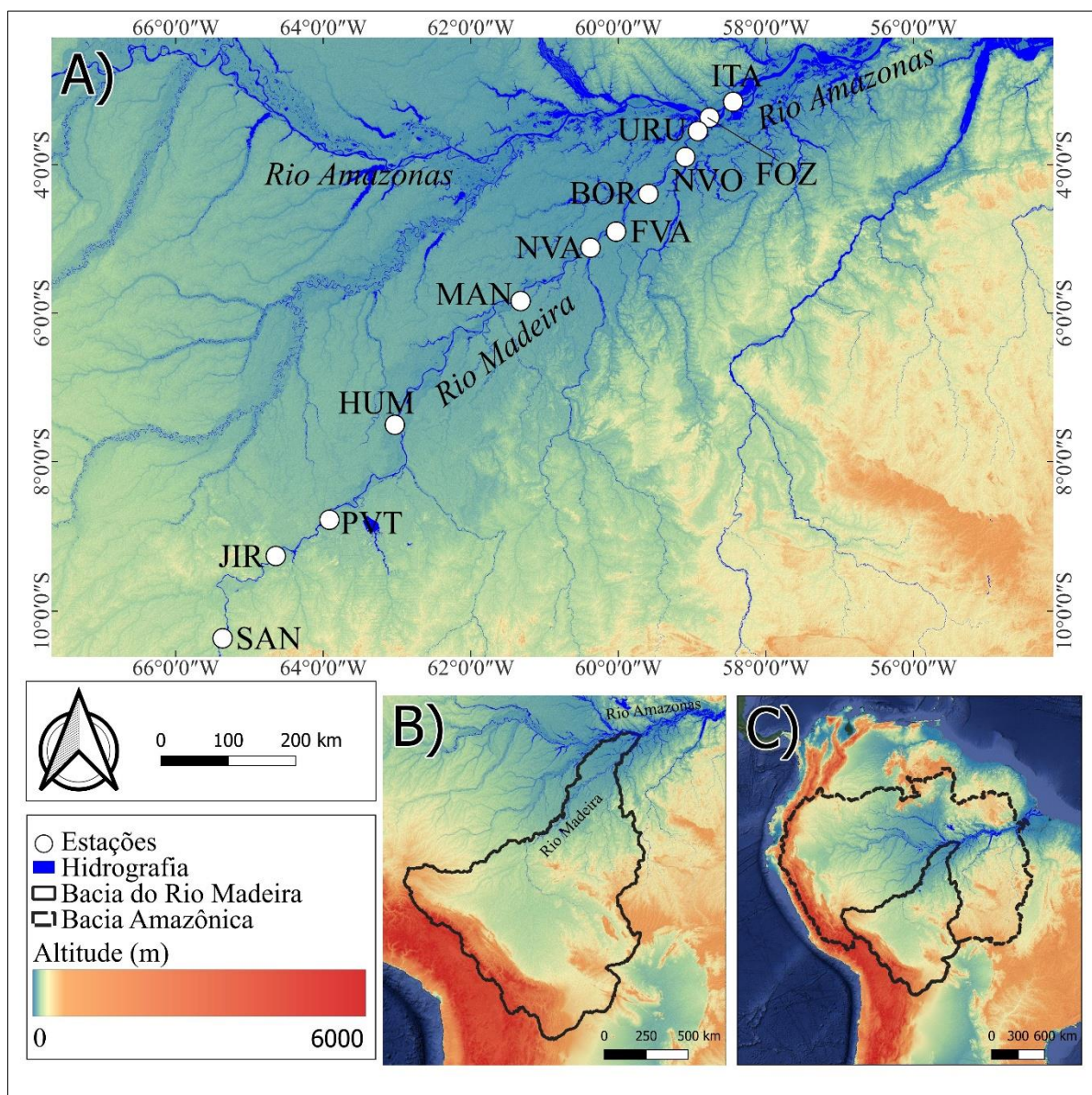


Figura 1 – Localização da Área de Estudo.
Fonte: Este Trabalho (2024).

A bacia do Rio Madeira é classificada por climas de floresta tropical, monções tropicais e climas tropicais úmidos e secos (tipos Af, Am e Aw) (PEEL et al., 2007) e climas do tipo Cbw, Cfb e Cfc na região Andina (LAUREANTI et al., 2024). Em média, na bacia mais da metade da precipitação anual ocorre entre dezembro e março, com janeiro e fevereiro sendo os meses mais chuvosos (ESPINOZA et al., 2019). Além disso na região das bacias do Madre de Dios e Mamoré existem dois hotspot que podem chover um acumulado anual de até 6.600 mm.ano⁻¹ (Madre de Dios) e 5000 mm.ano⁻¹ (Mamoré) (ESPINOZA et al., 2015).

O Rio Madeira apresenta um regime fluvial marcado por elevada sazonalidade e significativa carga sedimentar, com 406x10⁶ ton.ano⁻¹ de contribuição para o Rio Amazonas, cerca de 50% da carga total de sedimentos transportados pelo principal sistema fluvial do mundo, desse total, grande parte é produzido devido à erosão nos Andes (FILIZOLA e GUYOT, 2011).

Porém, com a construção do Complexo Hidrelétrico do Madeira composto pelas hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau observa-se uma diminuição da concentração de sedimentos suspensos para o baixo curso que varia de 20% a 30% (LATRUBESSE et al., 2015; RIVERA et al., 2019), o Llanos de Mojos também é uma área importante de retenção de sedimentos dos Andes no alto curso no Rio Madeira (GUYOT et al., 1996). Além disso, o baixo curso, nos últimos anos, apresenta tendência de deposição de sedimentos (WITTMANN et al., 2011; VILLA et al., 2013), o que tende a diminuir ainda mais o aporte de sedimentos do Rio Madeira para o Amazonas.

Análise dos dados fluviais

Analizou-se nove estações fluviométricas do Rio Amazonas, a jusante da confluência com o Rio Madeira (estação de Itacoatiara), e do baixo e médio curso Rio Madeira (Quadro 1 e Figura 1). Os dados foram disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>) e pelo Projeto SO-HYBAM. Foram avaliados dados de nível da água (H) (todas as estações com exceção de FOZ), descarga líquida (Q) e velocidade de fluxo (ITA, FOZ, BOR, FVA e PVT), dessas apenas Fazenda Vista Alegre não apresenta dados de velocidade de Fluxo. Os dados utilizados são referentes às séries históricas disponíveis em cada estação.

Quadro 1 – Características das estações fluviométricas utilizadas.

Estações	Código	Intervalo de Dados	Tipo de Dado	Fonte
Itacoatiara (ITA)	16030000	1927-2023	Nível da Água	ANA
		2008-2023	Descarga Líquida Velocidade de Fluxo	
Foz do Madeira (FOZ)	15901000	2014-2023	Descarga Líquida Velocidade de Fluxo	ANA
Urucurituba (URU)	15960000	2014-2023	Nível da Água	ANA
Nova Olinda (NVO)	15940000	1994-2023	Nível da Água	ANA
Borba (BOR)	15900000	1967-2023	Nível da Água	ANA
		2012-2024	Descarga Líquida Velocidade de Fluxo	
Fazenda Vista Alegre (FVA)	15860000	1967-2019	Nível da Água Descarga Líquida	HYBAM
Novo Aripuanã (NVA)	15850000	1967-2013	Nível da Água	ANA
Manicoré (MAN)	15700000	1931-2025	Nível da Água	ANA
Humaitá (HUM)	15630000	1967-2025	Nível da Água	ANA
Porto Velho (PVT)	15390000	2011-2019	Nível da Água	ANA
		2009-2019	Descarga Líquida Velocidade de Fluxo	
UHE Jirau Barramento (JIR)	15340500	2013-2023 2022-2023	Nível da Água Descarga Líquida	ANA
UHE Santo Antônio Jusante Rio Beni (SAN)	15318001	2013-2019	Nível da Água	ANA

Fonte: Este Trabalho (2024).

Caracterizou-se o regime fluvial do Rio Madeira com base no ciclo anual do nível da água nas estações através das médias mensais para os períodos disponíveis em cada estação. Para definir os períodos hidrológicos, adotou-se a proposta de Bittencourt e Amadio (2007), considerando a complexidade da região amazônica. Os valores de nível da água e descarga líquida foram normalizados de acordo com Marinho et al. (2021). Calculou-se também a variabilidade de descarga líquida ($Q_{\max}/Q_{\min}$) e o regime de cheia ($Q_{\max}/Q_{\text{médio}}$) para as estações de ITA, FOZ, BOR, FVA e PVT.

Para entender a correlação entre as variáveis (nível da água, descarga líquida e velocidade de fluxo) foram aplicados dois testes estatísticos: 1) Coeficiente de Correlação Linear de Pearson (r). 2) Coeficiente de Determinação (R^2). Enquanto o r determina a relação linear entre os conjuntos de dados, variando de -1 (relação inversamente proporcional perfeita) até 1 (relação diretamente proporcional perfeita). O R^2 , que varia de 0 até 1, é importante para avaliar a proporção da variância explicada da variável dependente pela variável independente. Como o r e o R^2 são testes estatísticos paramétricos utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk, com nível de significância de 0,05, para determinar se os conjuntos de dados são normais, em caso de conjunto de dados não normais se normalizou os dados através da transformação do conjunto para logaritmo neperiano.

Resultados e Discussão

A análise dos níveis de água em sete estações fluviométricas revelou três padrões sazonais distintos (Figura 2). O primeiro grupo, composto pelas estações ITA (Rio Amazonas), URU e NVO, apresenta picos de cheia em junho e mínimas em novembro. O segundo grupo, formado pelas estações BOR, FVA, NVA e MAN, antecipa o regime fluvial com picos máximos em abril e valores mínimos em outubro, caracterizando um deslocamento temporal de dois meses em relação ao primeiro grupo. O terceiro grupo, representado pelas estações PVT, HUM e SAN, exibe o padrão mais precoce, com picos de cheia concentrados em março e mínimas registradas em setembro, evidenciando maior proximidade com o regime fluvial regional do alto curso da bacia

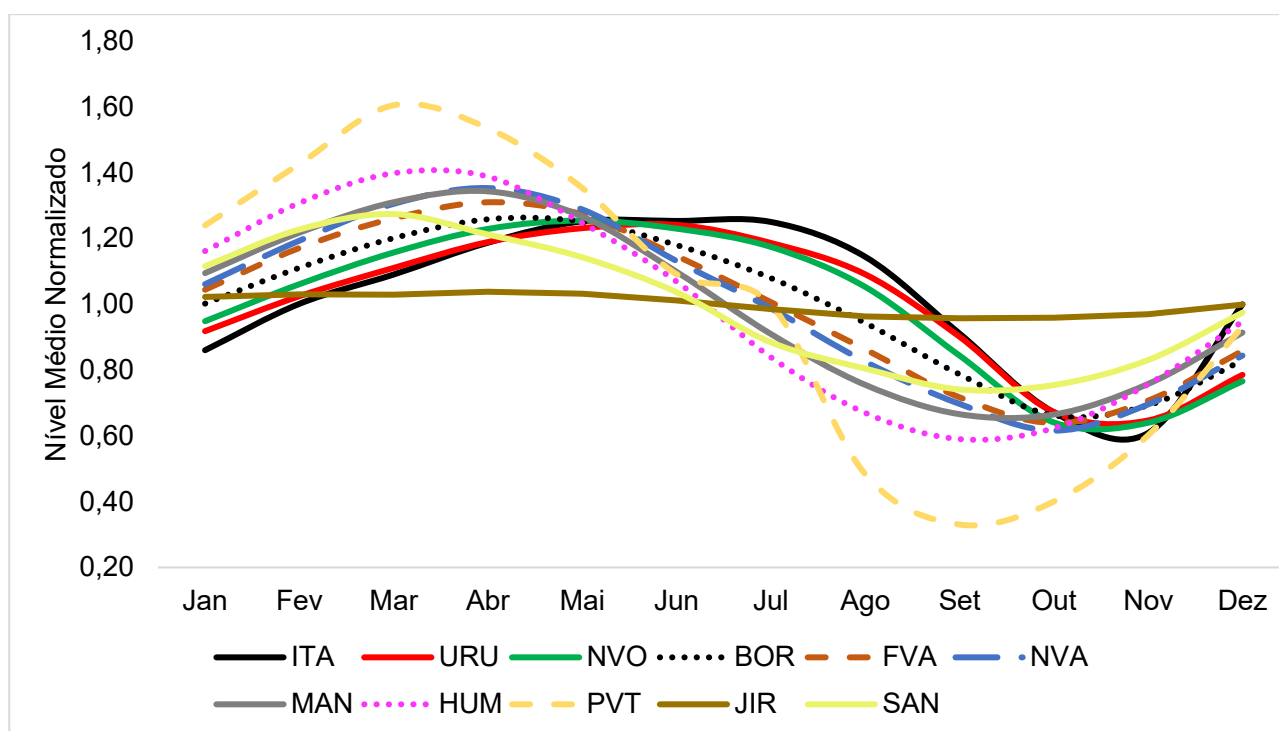


Figura 2 - Nível Médio Mensal Normalizado dos rios Madeira e Amazonas.

Fonte: Hybam (2024); ANA (2024); Este Trabalho (2024).

A estação JIR apresenta comportamento hidrológico atípico, caracterizado por baixa variabilidade nos níveis de água ao longo do ano devido à sua localização na zona de influência da UHE Jirau. Esta regularização artificial contrasta com o regime natural observado nas estações adjacentes. A análise comparativa entre JIR, PVT (jusante da UHE Santo Antônio) e SAN (montante da UHE Jirau, fora de sua área de influência) evidencia diferenças temporais. Enquanto as estações PVT e SAN registram picos de cheia em março, refletindo o regime fluvial natural da região, a estação JIR apresenta máximo em abril, indicando o efeito de amortecimento e defasagem temporal imposto pela operação da hidrelétrica.

A estação JIR apresentou regime fluvial altamente regularizado, com níveis variando entre 8.257 cm (setembro) e 8.952 cm (abril), resultando em média anual de 8.609 cm. A amplitude sazonal

de apenas 696 cm reflete o controle artificial imposto pela UHE Jirau, evidenciado pelos baixos coeficientes de variabilidade: $H_{\max}/H_{\min} = 1,08$ e $H_{\max}/H_{\text{médio}} = 1,04$. Estes valores contrastam significativamente com o regime natural esperado para a região, confirmando o efeito de amortecimento das oscilações sazonais pela operação da hidrelétrica, o que resulta em baixa sensibilidade às variações climáticas sazonais típicas da bacia.

Com base na análise temporal dos níveis de água, o Rio Madeira pode ser classificado em três segmentos distintos do ponto de vista fluvial. O primeiro segmento (URU e NVO) caracteriza-se pela maior influência do sistema da planície amazônica, com enchente de dezembro a maio, cheia de maio a julho, e vazante de agosto a novembro, refletindo a imposição do regime do Rio Amazonas sobre o baixo curso do Madeira. O segundo segmento (BOR, FVA, NVA e MAN) apresenta comportamento intermediário, com enchente de novembro a fevereiro, cheia de março a maio, e vazante de junho a outubro, representando a transição entre o regime regional e a influência da calha do Rio Amazonas. O terceiro segmento (PVT, HUM e SAN) exibe regime mais próximo ao regime fluvial regional, com enchente de outubro a janeiro, cheia de fevereiro a abril, e vazante de maio a setembro, expressando a resposta direta aos padrões de precipitação da bacia do alto Madeira, bem como os controles das UHE.

No contexto das mudanças climáticas, os eventos hidrológicos extremos têm intensificado seus impactos no regime fluvial do Rio Madeira. As grandes cheias de 2009, 2012 e 2014 registraram volumes que ultrapassaram níveis máximos históricos, especialmente na estação PVT (ANA, 2025), resultando em severos impactos socioambientais: deslocamento de populações ribeirinhas, perdas na infraestrutura urbana e rural, degradação viária e destruição de cultivos. Estes eventos evidenciam a vulnerabilidade crescente da região aos extremos hidrológicos, com potencial intensificação relacionada às mudanças climáticas globais (LIBERATO, 2014).

As secas extremas de 2023 e 2024 impactaram criticamente o Rio Madeira, segunda principal hidrovia amazônica para transporte de commodities do centro-oeste brasileiro, onde soja e milho representam mais de 80% da carga total (CREECH et al., 2018). Durante esses períodos, emergiram extensas barras de areia com até 7 km de extensão, tornando canais secundários intrafegáveis e comprometendo a navegação (Figura 3). A situação se agrava pela dragagem ilegal para mineração aurífera, que altera a morfologia de fundo e modifica o leito fluvial (VALVERDE et al., 2022), influenciando a formação de bancos de areia e dificultando ainda mais a navegação durante águas baixas. Esta combinação de fatores naturais e antrópicos configura um cenário de crescente instabilidade hidroviária, demandando estratégias adaptativas urgentes frente ao aumento da frequência de eventos extremos.

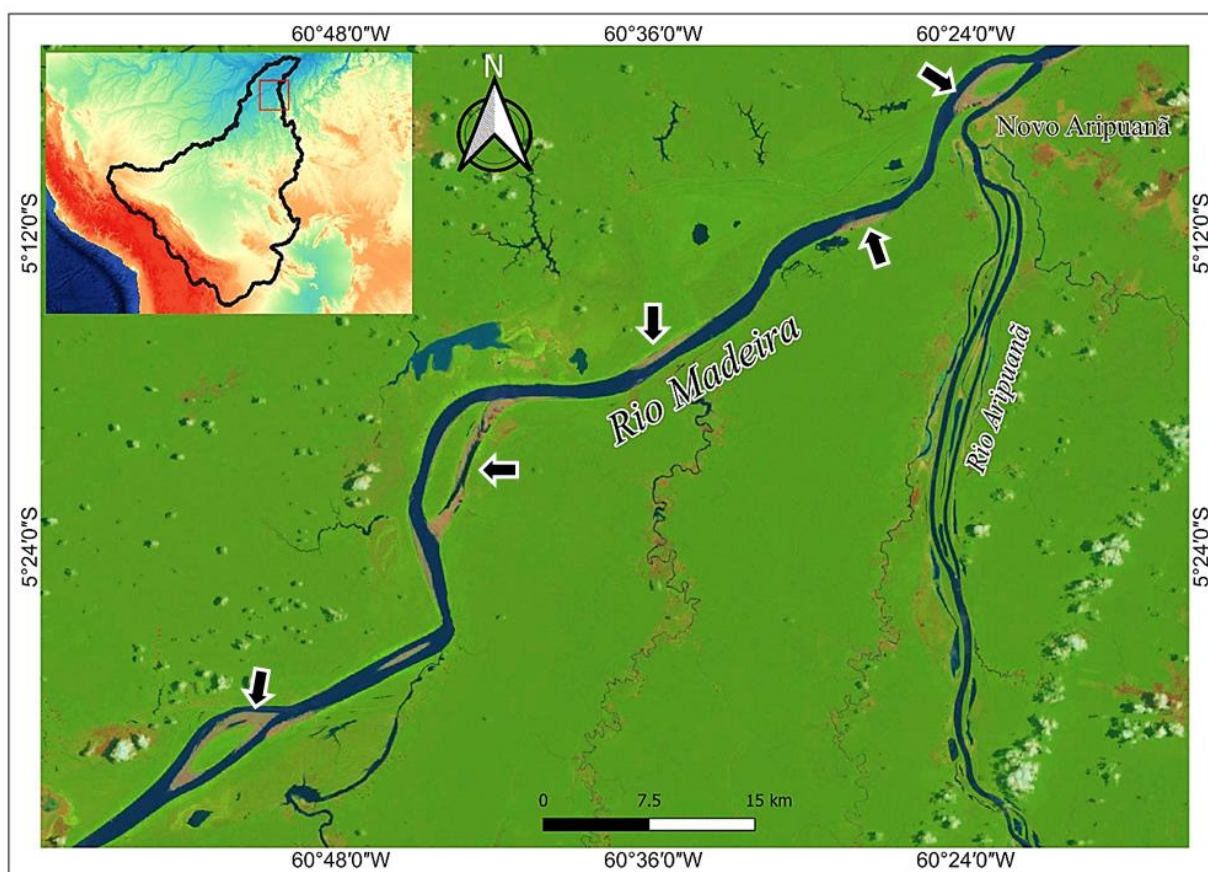


Figura 3 – Imagem do satélite Landsat-8 sensor OLI do Rio Madeira na grande seca de 2024 (dia 24 de outubro) no município de Novo Aripuanã, destacando as barras de areia (setas) que emergem durante o período, dificultando a navegação, principalmente em canais secundários.
Fonte: Este Trabalho (2024).

Os impactos econômicos da seca extrema evidenciam-se na redução de 16,6% da produção do polo industrial de Manaus em 2024. Em resposta, o governo federal anunciou investimentos de 505 milhões de reais para dragagem dos rios Solimões, Madeira e Amazonas - valor quatro vezes superior ao de 2023. Exemplifica essa magnitude de custos a dragagem de apenas 12 km na Costa do Tabocal, no Rio Amazonas a jusante da foz do Madeira, que demandou 100 milhões de reais (SEDECTI, 2023).

A descarga líquida média anual do Rio Madeira na foz é de $27.612 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 4), valor inferior aos $32.000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ reportados por Latrubesse et al. (2005) e Latrubesse (2008), mas próximo aos $26.500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ de Vauchel et al. (2017). Comparado à descarga de $35.399 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ do Rio Negro (MARINHO et al., 2021), o Madeira constitui o segundo maior afluente amazônico. Destaca-se que estas diferenças são relacionadas às diferenças nas escalas temporais analisadas. Na estação ITA, o Rio Amazonas apresenta descarga média de $160.096 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, valor que já incorpora os aportes dos rios Madeira e Negro, contrastando com os $103.855 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ registrados em Manacapuru, a montante da confluência com o Negro (QUEIROZ e ALVES, 2021).

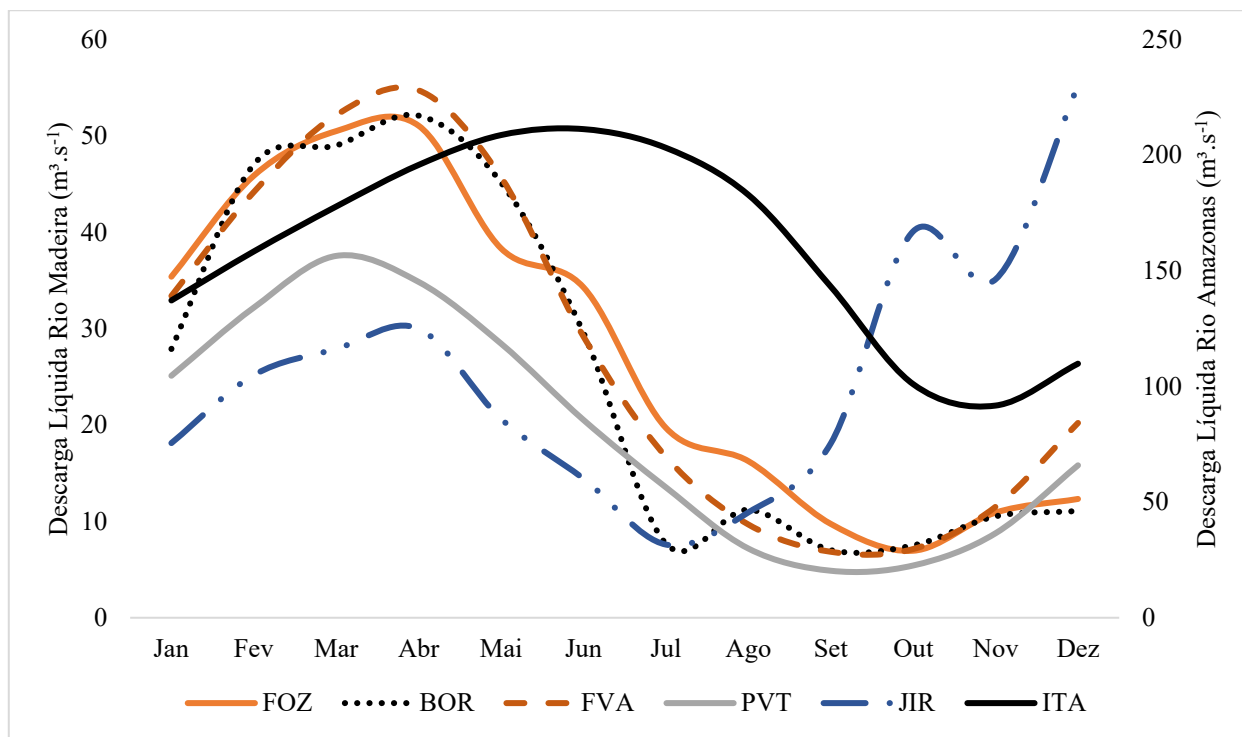


Figura 4 - Descarga líquida dos Rios Amazonas (ITA) e Madeira (FOZ, BOR, FVA, PVT e JIR).
Fonte: HYBAM (2024); ANA (2024); Este Trabalho (2025).

A descarga líquida apresenta variação espacial significativa ao longo do Rio Madeira. A estação FVA registra descarga similar à FOZ ($27.622 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), enquanto BOR apresenta redução para $25.486 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (diminuição de 7,73%). Entre BOR e PVT ($19.524 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), observa-se redução mais acentuada de 23,39% e entre PVT e JIR ($25.280 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), com influência direta da barragem, observa-se um aumento de 29,48%. A defasagem dos picos de descarga varia espacialmente: FOZ, FVA e BOR apresentam máximos em abril, PVT em março e JIR em dezembro, enquanto o Rio Amazonas em ITA atinge pico em junho. Os valores mínimos ocorrem em setembro (FVA, BOR, PVT), outubro (FOZ), julho (JIR) e novembro (ITA).

O Rio Amazonas em ITA exibe baixa variabilidade de descarga ($Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}} = 2,03$) e regime de cheia moderado ($Q_{\text{max}}/Q_{\text{médio}} = 1,32$). Em contraste, o Rio Madeira apresenta variabilidade consideravelmente maior em todas as estações ($Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$ entre 7,34 e 7,99) e regimes de cheia mais intensos, embora ainda relativamente baixos ($Q_{\text{max}}/Q_{\text{médio}}$ variando de 1,85 a 2,04). Estas características refletem o comportamento típico de bacias complexas que drenam múltiplas zonas climáticas (LATRUBESSE et al., 2005).

A análise comparativa com outros grandes rios mundiais revela que as maiores razões $Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$ pertencem aos rios Orinoco (11,75) e Brahmaputra (11,03), caracterizando regimes fortemente sazonais. O Brahmaputra exemplifica dependência extrema de ciclos monçônicos, com picos elevados durante monções e descargas muito baixas nos demais períodos (LATRUBESSE et al., 2005). O Rio Madeira apresenta sazonalidade elevada (valores entre 7,27 e 7,99), contrastando

com rios como Congo (1,79) e Paraná (1,45), que exibem baixa variação sazonal e regimes mais regulares.

A precipitação constitui o principal controlador dos regimes fluviais, mas fatores fisiográficos como cobertura e tipo de solo, geologia e geomorfologia também exercem papel fundamental no fluxo de base e picos de descarga (ZANIN et al., 2025). O Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) representa o principal responsável pela sazonalidade pluviométrica da porção meridional da Bacia Amazônica (VILLAR et al., 2009; ZANIN e SATYAMURTY, 2020), influenciando diretamente o regime fluvial e a sazonalidade do Rio Madeira.

A razão $Q_{max}/Q_{médio}$ evidencia a variação sazonal relativa entre os sistemas fluviais. O Brahmaputra apresenta o maior valor (2,35), seguido pelo Orinoco (2,10) e pelo trecho BOR do Madeira (2,04), confirmando regimes com picos sazonais intensos. Os valores mais baixos observados no Paraná (1,17) e Congo (1,38) confirmam comportamento fluvial mais estável. O Rio Amazonas apresenta baixa variação ($Q_{max}/Q_{médio}$ entre 1,32 e 1,36), caracterizando-se como sistema de grande escala com baixa sazonalidade relativa, provavelmente devido aos aportes de grandes afluentes que mantêm volumes elevados durante todo o regime fluvial (Figura 5).

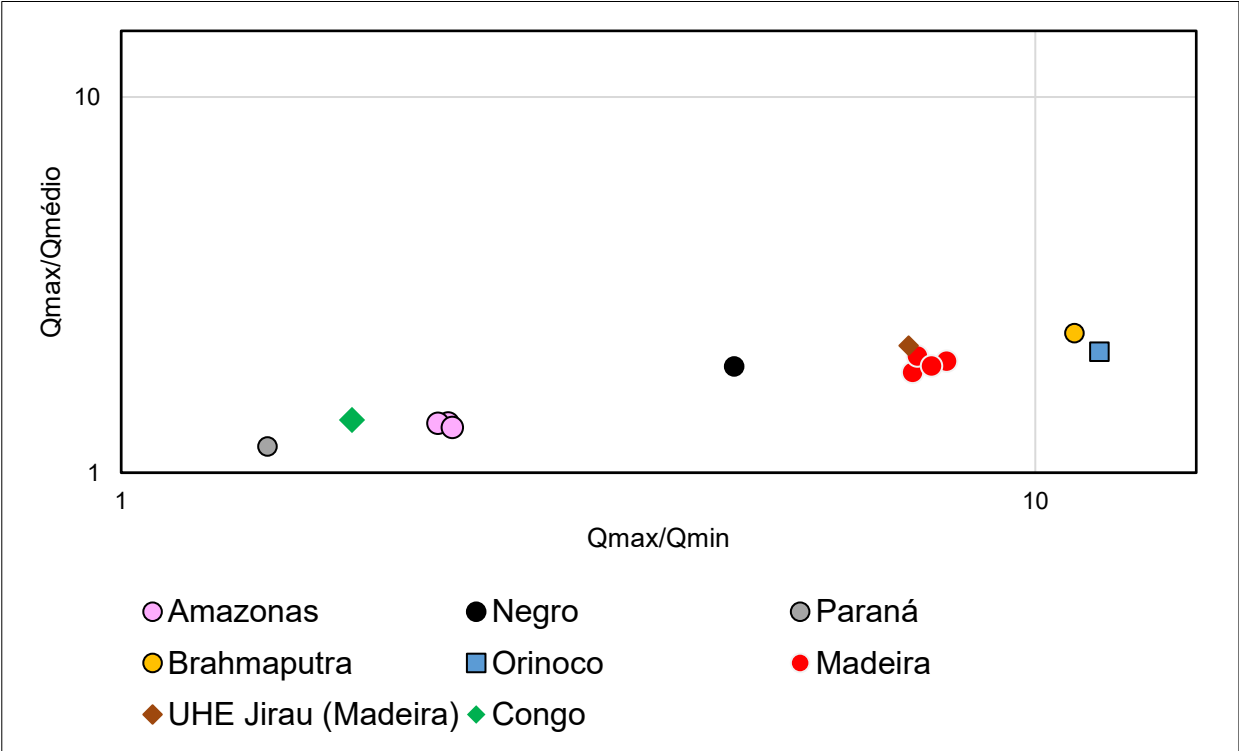


Figura 5 – Relação da variabilidade de Descarga Líquida e Regime de Cheia em grandes rios do mundo. Fonte: Queiroz e Marinho (2024); Queiroz e Alves (2021); Rao et al. (2020); Antico et al. (2017); Este Trabalho (2024).

No Rio Amazonas em ITA a velocidade média anual do fluxo foi de 1,31 m.s⁻¹, maior que em todas as estações analisadas do Rio Madeira (FOZ = 1 m.s⁻¹; BOR = 0,93 m.s⁻¹; PVT = 1,29 m.s⁻¹).

O pico de velocidade no Rio Madeira ocorre no mês de março (FOZ = 1,87 m.s⁻¹; BOR = 1,65 m.s⁻¹; PVT = 2,16 m.s⁻¹) e no Rio Amazonas em junho (ITA = 1,63 m.s⁻¹). Observa-se uma correlação positiva muito forte entre a velocidade de fluxo e a descarga líquida para todas as estações ($R^2 = 0,91$; $r = 0,95$ (ITA); $R^2 = 0,94$; $r = 0,97$ (FOZ); $R^2 = 0,94$; $r = 0,97$ (BOR); $R^2 = 0,99$; $r = 1$ (PVT)). Isso significa que, quando aumenta a descarga líquida, aumenta a velocidade de fluxo (Figura 6).

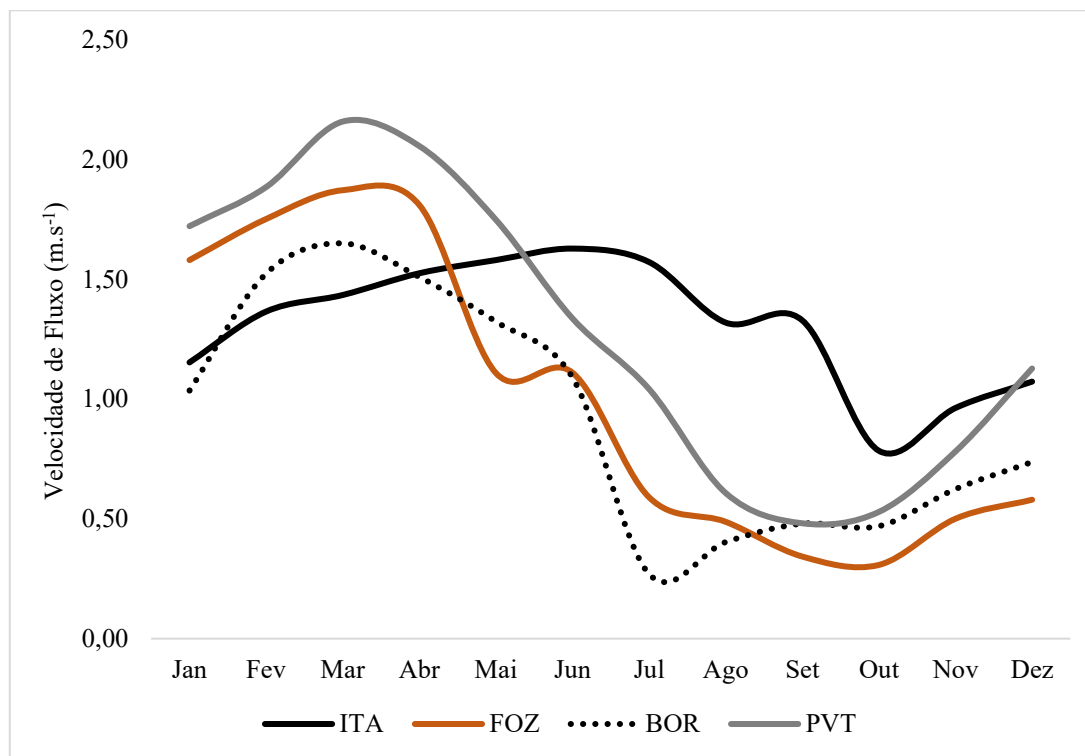
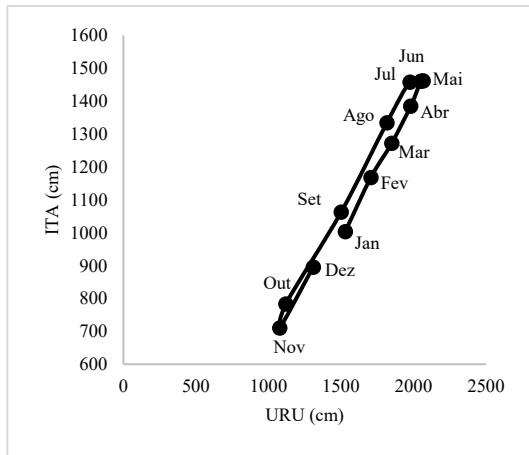


Figura 6 - Velocidade média mensal de Fluxo nas estações ITA, FOZ, PVT e BOR.
Fonte: ANA (2024); Este Trabalho (2025).

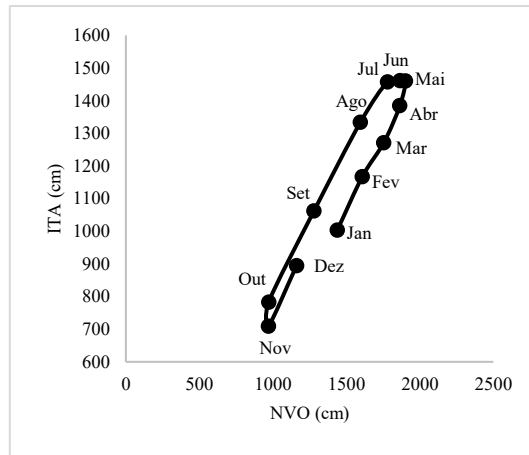
Entre BOR e FOZ há um aumento da velocidade de fluxo de 8,33%, porém o volume de dados em BOR (27 medições entre 1987 e 2024) e FOZ (53 medições entre 2014 e 2023) não é suficiente para entender com segurança a dinâmica da velocidade de fluxo na região. Entre PVT e BOR há uma diminuição de 28,18% e entre PVT e FOZ a diminuição foi de 22,19%. Marinho et al. (2020) observaram no Rio Negro uma redução de 32% da velocidade entre montante e jusante do arquipélago de Anavilhanas, no baixo curso do canal. Essa redução pode ser atribuída ao barramento hidráulico do Rio Amazonas no Rio Negro. Como observado por Meade et al. (1991), o Rio Madeira também é submetido ao barramento do Rio Amazonas, o que pode alterar as condições de fluxo, principalmente no baixo curso do canal. Porém, no Rio Madeira, a relação redução da velocidade x barramento hidráulico não é tão clara, provavelmente devido ausência de dados em longo prazo.

Observa-se na Figura 7 que quando mais afastada da região da confluência for a estação, maior é o laço de histerese. Correlacionando o nível médio mensal da estação de ITA com as estações do Rio Madeira nota-se que nas estações URU e NVO o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,98$ e $0,93$,

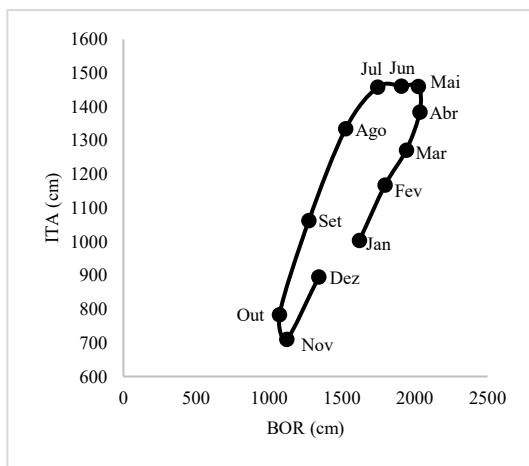
respectivamente) e o coeficiente de correlação de Pearson ($r = 0,99$ e $0,97$) foram altos, indicando uma forte influência do regime fluvial do Rio Amazonas no baixo Madeira. A estação BOR apresentou coeficientes de moderados a altos ($R^2 = 0,75$ e $r = 0,87$), porém se observa um laço de histerese mais acentuado na região, indicando que a influência do Rio Amazonas já começa a diminuir nessa estação. A partir da estação FVA ($R^2 = 0,55$ e $r = 0,74$), NVA ($R^2 = 0,50$ e $r = 0,71$), MAN ($R^2 = 0,32$ e $r = 0,57$), HUM ($R^2 = 0,19$ e $r = 0,44$) e PVT ($R^2 = 0,26$ e $r = 0,51$) a relação com ITA é bem menor. Portanto, a influência do barramento hidráulico do Rio Amazonas no Rio Madeira ocorre com maior intensidade até NVO e começa a diminuir a partir de BOR, cerca de 160 km da foz.



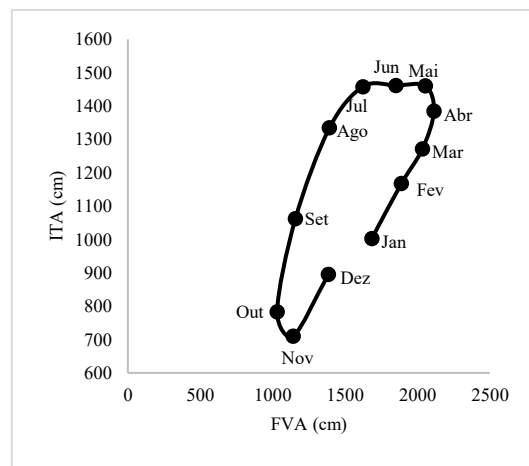
a)



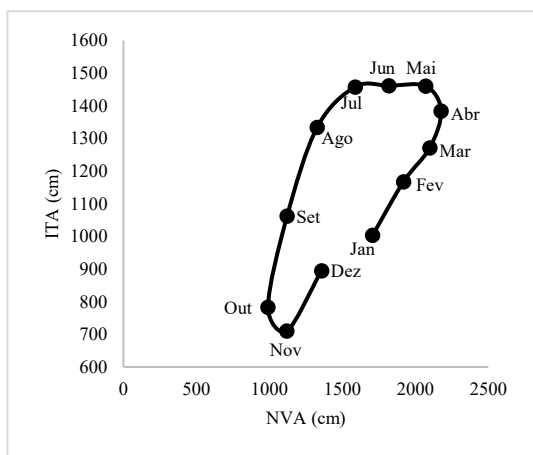
b)



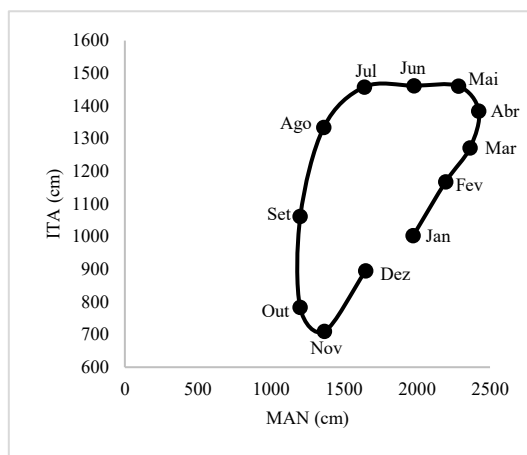
c)



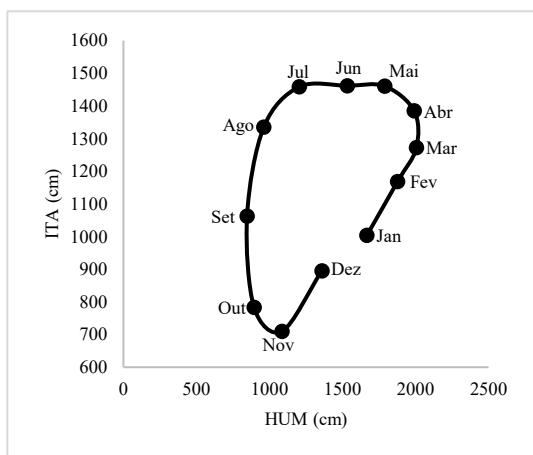
d)



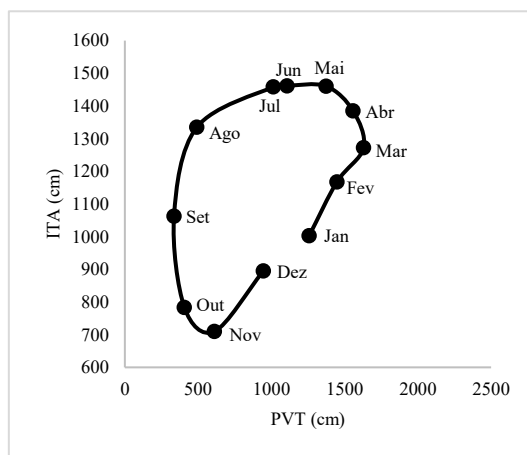
e)



f)



g)



h)

Figura 7 - Dispersão entre ITA e as estações do Rio Madeira.

Fonte: Este Trabalho (2024).

Considerações finais

Este estudo caracterizou a dinâmica fluvial do Rio Madeira, evidenciando particularidades do principal afluente da margem direita do Rio Amazonas. A análise revelou um regime fluvial marcado por elevada sazonalidade, que pode ser segmentado, do ponto de vista fluvial, em três trechos distintos entre Porto Velho no estado de Rondônia e sua foz no estado do Amazonas. Cada trecho reflete diferentes graus de influência do barramento hidráulico natural ou artificial. A influência do Rio Amazonas manifesta-se intensamente nos primeiros 160 km a montante da confluência, diminuindo progressivamente até tornar-se negligível a partir da estação Fazenda Vista Alegre.

A descarga líquida média anual de $27.612 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ confirma a posição do Madeira como segundo maior contribuinte hídrico amazônico, superado apenas pelo Rio Negro. Contudo, sua elevada variabilidade de descarga ($Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}} = 7,34$) contrasta significativamente com o regime mais estável do Rio Amazonas ($Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}} = 2,03$). Em perspectiva global, o Rio Madeira posiciona-se

intermediariamente entre grandes sistemas fluviais, superando rios como Congo e Amazonas em variabilidade fluvial, porém inferior aos regimes extremamente sazonais do Brahmaputra e Orinoco.

Os resultados obtidos ressaltam a necessidade de monitoramento fluvial contínuo da bacia do Rio Madeira, especialmente frente aos crescentes impactos antrópicos e climáticos. A compreensão dos padrões fluviais identificados fornece subsídios fundamentais para gestão de recursos hídricos, planejamento de infraestrutura hidroviária e avaliação de impactos ambientais na região, contribuindo para o conhecimento científico dos grandes sistemas fluviais tropicais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001 pela bolsa de doutorado do primeiro autor e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (Edital Universal FAPEAM 20 anos).

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) – HIDROWEB**. 2025, disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>.

ALVES, N.S. **Mapeamento Hidromorfodinâmico do Complexo Fluvial de Anavilhanas**: Contribuição aos Estudos de Geomorfologia Fluvial de Rios Amazônicos. Tese de Doutorado (Universidade de São Paulo - USP) São Paulo, Brasil, 2013.

ANTICO, A.; AGUIAR, R.I.; O; AMSLER, M.L. Paraná River monthly hydrometric data from Rosa Rio City, Argentina: 1875 to 2017 [dataset]. **PANGAEA**, 2017. Supplement to: Antico, A et al. (2018): Hydrometric data rescue in the Paraná River Basin. **Water Resources Research**, 54, 1368-1381, <https://doi.org/10.1002/2017WR020897>

BANDEIRA, I.C.N.; ADAMY, A.; ANDRETTA, E.R.; CONCEIÇÃO, R.A.C.; ANDRADE, M.M.N. Terras Caídas: Fluvial erosion or distinct phenomenon in the Amazon?. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 222, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7405-7>

BITTENCOURT, M.M.; AMADIO, S.A. Proposta para identificação rápida dos períodos hidrológicos em áreas de várzea do Rio Solimões-Amazonas nas proximidades de Manaus. **Acta Amazônica**, v. 37, n. 2, pp. 303-308, 2007.

CREECH, C.T.; AMORIM, R.S.; CASTAÑON, A.N.A.O.; GIBSON, S.A.; VEATCH, W.C.; LAUTH, T.J. A Planning Framework For Improving Reliability Of Inland Navigation On The Madeira River In Brazil. **PIANC-World Congress** Panama City, Panama, 2018.

DAVIDSON, E.A.; ARAUJO, A.C.; ARTAXO, P.; BALCH, J.; BROWN, F.; MERCEDES, M. BUSTAMANTE, C.; COE, M.T.; DEFRIES, R.S.; KELLER, M.; LONGO, M.; MUNGER, J.W.; SCHROEDER, W.; SOARES-FILHO, B.S.; SOUZA, C.M.; WOFSY, S.C. The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, 2012, pp. 321–328.

ESPINOZA, J. C.; SÖRENSSON, A.; RONCHAIL, J.; MOLINA-CARPIO, J.; SEGURA, H.; GUTIERREZ-CORI, O., et al. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin

- (Upper Madeira Basin) during the 1982-2017 period. **J. Hydrol. Reg. Stud.** 26:100637, 2019. doi: 10.1016/j.ejrh.2019.100637
- ESPINOZA, J.C.; CHAVEZ, S.; RONCHAIL, J.; JUNQUAS, C.; TAKAHASHI, K.; LAVADO, W. Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation. **Water Resources Research**, v. 51, n. 5, 2015.
- FILIZOLA N.; GUYOT J.L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Rev. Bras. Geociênc.**, 41, pp. 566-576, 2011.
- GUYOT, J.L. Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon. In: D.E. Walling, et al., eds. **Erosion and sediment yield: global and regional perspectives**. Wallingford: International Association of Hydrological Sciences, IAHS Publication 236, 55–63, 1996.
- HAMILTON, S.; SIPPEL, S.; MELACK, J. Comparison of inundation patterns among major South American floodplains. **Journal of Geophysical Research**, 107 (D20), 8038, 2002.
- JUNK, W. J.; WITTMANN, F.; SCHÖNGART, J.; PIEDADE, M. T. F. A classification of the major habitats of Amazonian black-water river floodplains and a comparison with their white-water counterparts. **Wetlands Ecology and Management**, 23(4), 677–693, 2015.
- JUNK, W.J.; PIEDADE, M.T.F.; SCHÖNGART, J. *et al.* A Classification of Major Naturally-Occurring Amazonian Lowland Wetlands. **Wetlands**, v. 31, 623–640, 2011.
<https://doi.org/10.1007/s13157-011-0190-7>
- LATRUBESSE, E. M.; D'HORTA, F. M.; RIBAS, C. C.; WITTMANN, F.; ZUANON, J.; PARK, E.; DUNNE, T.; ARIMA, E. Y.; BAKER, P. A. Vulnerability of the biota in riverine and seasonally flooded habitats to damming of Amazonian rivers. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 31, pp. 1136–1149, 2021.
- LATRUBESSE, E.M. Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers. **Geomorphology**, v. 101, pp. 130–145, 2008.
- LATRUBESSE, E.M.; ARIMA, E.Y.; DUNNE, T.; PARK, E.; BAKER, V.R.; D'HORTA, F.; WIGHT, C.; WITTMANN, F.; ZUANON, J.; BAKER, P.A.; et al. Damming the rivers of the Amazon basin. **Nature**, v. 546, 2017, pp. 363–369.
- LATRUBESSE, E.M.; STEVAUX, J.C.; SINHA, R. **Tropical Rivers**. *Geomorphology*, 70, pp.187–206, 2005.
- LAUREANTI, N.C.; TAVARES, P.D.S.; TAVARES, M.; RODRIGUES, D.C.; GOMES, J.L.; CHOU, S.C.; CORREIA, F.W.S. Extreme Seasonal Droughts and Floods in the Madeira River Basin, Brazil: Diagnosis, Causes, and Trends. **Climate**, v. 12, n. 111, 2024.
- LI, J.; WANG, G.; SONG, C.; SUN, S.; MA, J.; WANG, Y.; GUO, L.; LI, D. Recent intensified erosion and massive sediment deposition in Tibetan Plateau rivers. **Nature Communications**, v. 15:722, 2024.
- LIBERATO, A.M. **Estudo De Eventos Climáticos Extremos Na Amazônia Ocidental E Seus Impactos Na Hidrovia Rio Madeira**. Tese (Programa de Pós Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande), 2014.
- MARINHO, R.R., FILIZOLA JUNIOR, N.P., CREMON, É.H. Analysis of Suspended Sediment in the Anavilhanas Archipelago, Rio Negro, Amazon Basin. **Water**, 12, 1073, 2020.
- MARINHO, R.R.; ZANIN, P.R.; FILIZOLA, N.P. The Negro river in the Anavilhanas Archipelago: streamflow and geomorphology of a complex anabranching system in the Amazon. **EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS**, 47, 2021, p. 1-16.

- MEADE, R.H., RAYOL, J.M., CONCEIÇÃO, S.C., NATIVIDADE, J.R.G. Backwater effects in the Amazon River basin of Brazil. **Environmental Geology and Water Sciences**, v. 18, p. 105–114, 1991.
- MOLINIER, M.; GUYOT, J.L.; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, V. Les Régimes Hydrologiques de L'amazone et de ses Affluents. In: CHEVALLIER, P.; POUYAUD, B. (Orgs.) **L'hydrologie Tropicale: Géoscience et Outil Pour le Développement**. Paris, IAHS, pp. 209-222, 1996.
- PACA, V.H.M.; ESPINOZA-DAVALOS, G.E.; MOREIRA, D.M.; COMAIR, G. Variability of Trends in Precipitation across the Amazon River Basin Determined from the CHIRPS Precipitation Product and from Station Records. **Water**, v. 12, n. 5, 2020.
- PEEL, M.C.; FINLAYSON, B.L.; MCMAHON, T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 11, pp. 1633–1644, 2007.
- QUEIROZ, M.S.; ALVES, N.S. Conditioning Factors of “Terras Caídas” in Lower Solimões River – Brazil. **Caminhos de Geografia**, v. 22, pp. 220-233, 2021.
- QUEIROZ, M.S.; MARINHO, R.R. Congo River: Analysis of Suspended Sediment Flux in a Multichannel Megasystem in Central Africa. **RAEGA - O Espaço Geográfico Em Análise**, v. 61, pp. 153–172, 2024.
- RAO, M.P., COOK, E.R., COOK, B.I.; D'ARRIGO, R.D.; PALMER, J.G.; LALL, U.; WOODHOUSE, C.A.; BUCKLEY, B.M.; URIARTE, M.; BISHOP, D.A.; JIAN, J.; WEBSTER, P.J. Seven centuries of reconstructed Brahmaputra River discharge demonstrate underestimated high discharge and flood hazard frequency. **Nature Communications**, v. 11, 6017, 2020.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-19795-6>
- RIBAS, C.C.; SAWAKUCHI, A.O.; ALMEIDA, R.P. et al. The role of rivers in the origin and future of Amazonian biodiversity. **Nat. Rev. Biodivers.** v. 1, pp. 14–31, 2025.
<https://doi.org/10.1038/s44358-024-00001-0>
- RÍOS-VILLAMIZAR, E.A.; ADENEY, J.M.; PIEDADE, M.T.F.; JUNK, W.J.; Hydrochemical Classification of Amazonian Rivers: A Systematic Review and Meta-Analysis. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia-MG, v. 21, n. 78, p. 211-226, 2020.
- RIVERA, A.I.; CARDENAS, E.A.; ESPINOZA-VILLAR, R.; ESPINOZA, J.; MOLINA, J.; AYALA, J.; GUTIERREZ-CORI, O.; MARTINEZ, J.-M.; FILIZOLA, N. Decline of Fine Suspended Sediments in the Madeira River Basin (2003–2017). **Water**, v.11, 514, 2019.
- SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – SEDECTI. **A dragagem emergencial do RioMadeira deve facilitar o escoamento de cargas e produtos no Amazonas**. 2023. Acesso em: 2024. Disponível em: <https://www.seducti.am.gov.br/>
- SIOLI, H. The Amazon and its main affluents: Hydrography, morphology of the river courses, and river types. In: SIOLI, H. (Org.). **Amazon Limnology and Landscape Ecology of Mighty Tropical River and Its Basins**. Springer Netherlands, Dordrecht, p.127–165, 1984.
- STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, M. E. **Geomorfologia Fluvial**. Oficina de Textos: São Paulo: 2017.
- STRASSER, M., NETTO, A., SILVA, R.V., MASCARENAS, F. Estudo da variação do coeficiente de Manning e rios da bacia Amazônica por meio de modelagem hidrodinâmica. **Annals of the XVI Brazilian Simposio of Water Resources**, SBRH, Joao Pessoa, vol.117, 2005.
- VALVERDE, H.; GUERRERO, L.; FRIAS, C.; ABAD, J.D. Evaluation of the impact of the Peruvian Waterway dredged channel in the bed morphodynamics of the Huallaga River. In: SILVA,

- A.M.F.; RENNIE, C.; GASKIN, S.; LACEY, J.; MACVICAR, B. (Orgs.). **River Flow**. CRC Press, 2022.
- VAUCHEL, P.; SANTINI, W.; GUYOT, J.L.; MOQUET, J.S.; MARTINEZ, J.M.; ESPINOZA, J.C.; BABY, P.; FUERTES, O.; NORIEGA, L.; PUITA, O.; SONDAG, F.; FRAIZY, P.; ARMIJOS, E.; COCHONNEAU, G.; TIMOUK, F.; OLIVEIRA, E.; FILIZOLA, N.P.; MOLINA, J.; RONCHAIL, J. A Reassessment of the Suspended Sediment Load in the Madeira River Basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, Based on 10 Years of Data from the HYBAM Monitoring Programme. **J. Hydrol.**, v. 553, pp. 35–48, 2017.
- VILLAR, J.C.E.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J.L.; COCHONNEAU, G.; FILIZOLA, N.; LAVADO, W.; DE OLIVEIRA, E.; POMBOSA, R.; VAUCHEL, P. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). **International Journal of Climatology**, v. 29, pp. 1574–1594, 2009.
- VILLAR, R.E., MARTINEZ, J.-M., LE TEXIER, M., GUYOT, J.-L., FRAIZY, P., MENESES, P.R., OLIVEIRA, E. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. **J South Am. Earth Sci.**, v. 44, pp. 45–54, 2013.
- WITTMANN, H.; VON BLANCKENBURG, F.; MAURICE, L.; GUYOT, J.-L.; FILIZOLA, N.; KUBIK, P.W. 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** 123: 934–950, 2011.
- ZANIN, P.R.; CAVALCANTI, R.B.L.; MARINHO, R.R.; PONTES, P.R. Streamflow dynamics of Amazonian rivers according to their hydrogeochemical heterogeneity. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 59, 102316, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102316>
- ZANIN, P.R.; SATYAMURTY, P. Hydrological processes interconnecting the two largest watersheds of South America from multi-decadal to inter-annual time scales: A critical review. **Int. J. Climatol.** v. 40, pp. 4006–4038, 2020. <https://doi.org/10.1002/joc.6442>.