

Variação espaço-temporal da superfície de água do Rio Uatumã e Reservatório de Balbina (Amazonas)

Spatiotemporal variation of the water surface in the Uatumã River and Balbina reservoir (Amazonas)

Variación espaciotemporal de la superficie del agua del Río Uatumã y embalse de Balbina, (Amazonas)

Dayana Esther Nascimento
Universidade Federal do Amazonas
dayanaesthern2002@gmail.com

Rogério Ribeiro Marinho
Universidade Federal do Amazonas
rogeo@ufam.edu.br

Ednaldo Bras Severo
Universidade Federal do Amazonas
edsevero.geo@gmail.com

Resumo

A construção de grandes barragens nos rios amazônicos promove alterações significativas no regime fluvial e na configuração dos ambientes aquáticos regionais. Este estudo investigou a variabilidade espaço-temporal da superfície de água no médio e alto curso do rio Uatumã, com ênfase nos impactos geomorfológicos e ecológicos decorrentes da formação do reservatório de Balbina. A metodologia integrou dados de sensoriamento remoto orbital, utilizando séries históricas de altimetria por radar e imagens Landsat para mapear a expansão das áreas alagadas no período de 1985 a 2022. Os resultados demonstram um incremento de aproximadamente 1.858 vezes na superfície aquática após o represamento, com inundação permanente concentrada principalmente em setores de baixa altitude topográfica. A transformação do sistema fluvial original em ambiente fluvial-lacustre resultou na formação de centenas de ilhas e canais afogados, intensificando a fragmentação da paisagem e alterando substancialmente a estrutura e funcionamento dos ecossistemas aquáticos. A regularização do fluxo hídrico atenuou significativamente o pulso natural de inundação, reduzindo a amplitude sazonal entre períodos de cheia e seca, com consequentes impactos na conectividade de habitats, nos ciclos reprodutivos de espécies aquáticas e no transporte de sedimentos. O emprego de técnicas de sensoriamento remoto possibilitou o mapeamento detalhado do canal principal do rio Uatumã anterior à criação do lago de Balbina, bem como a quantificação das áreas ocupadas por água sazonal, constituindo ferramenta fundamental para o monitoramento de mudanças ambientais em larga escala temporal e espacial. Os resultados evidenciam a necessidade de implementar sistemas de monitoramento contínuo e adotar estratégias de gestão adaptativa para mitigar os impactos de grandes reservatórios sobre a dinâmica de sistemas fluviais amazônicos.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Regime Fluvial; Rio Uatumã; Hidrelétrica; Amazônia.

Abstract

The construction of large dams across Amazonian rivers significantly alters fluvial regimes and regional aquatic environmental configurations. This study investigated the spatiotemporal variability of water surface area in the middle and upper reaches of the Uatumã River, with emphasis on geomorphological and ecological impacts resulting from the formation of Balbina Reservoir. The methodology integrated orbital remote sensing data, utilizing historical time series of radar altimetry and Landsat imagery to map the expansion of flooded areas from 1985 to 2022. Results demonstrate an approximately 1,858-fold increase in aquatic surface area following dam construction, with permanent inundation concentrated primarily in low-elevation topographic sectors. The transformation from the original fluvial system to a fluvial-lacustrine environment resulted in the formation of hundreds of islands and drowned channels, intensifying landscape fragmentation and substantially altering aquatic ecosystem structure and functioning. Flow regulation significantly attenuated natural flood pulses, reducing seasonal amplitude between high and low water periods, with consequent impacts on habitat connectivity, aquatic species reproductive cycles, and sediment transport. The application of remote sensing techniques enabled detailed mapping of the main Uatumã River channel prior to Balbina Lake creation, as well as quantification of seasonally water-occupied areas, constituting a fundamental tool for monitoring large-scale temporal and spatial environmental changes. Results highlight the need to implement continuous monitoring systems and adopt adaptive management strategies to mitigate the impacts of large reservoirs on Amazonian fluvial system dynamics.

Keywords: Remote Sensing; Fluvial Regime; Uatumã River; Hydropower; Amazon.

Resumen

La construcción de grandes presas en los ríos amazónicos promueve alteraciones significativas en el régimen fluvial y la configuración de los ambientes acuáticos regionales. Este estudio investigó la variabilidad espaciotemporal de la superficie de agua en el curso medio y alto del río Uatumã, con énfasis en los impactos geomorfológicos y ecológicos derivados de la formación del embalse de Balbina. La metodología integró datos de teledetección orbital, utilizando series históricas de altimetría por radar e imágenes Landsat para cartografiar la expansión de las áreas inundadas durante el período 1985-2022. Los resultados demuestran un incremento de aproximadamente 1.858 veces en la superficie acuática tras el represamiento, con inundación permanente concentrada principalmente en sectores de baja altitud topográfica. La transformación del sistema fluvial original hacia un ambiente fluvial-lacustre resultó en la formación de cientos de islas y canales ahogados, intensificando la fragmentación del paisaje y alterando sustancialmente la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos. La regularización del caudal atenuó significativamente el pulso natural de inundación, reduciendo la amplitud estacional entre períodos de crecida y estiaje, con impactos consecuentes sobre la conectividad de hábitats, los ciclos reproductivos de especies acuáticas y el transporte de sedimentos. El empleo de técnicas de teledetección posibilitó el mapeo detallado del cauce principal del río Uatumã previo a la creación del lago de Balbina, así como la cuantificación de las áreas ocupadas por agua estacional, constituyendo una herramienta fundamental para el monitoreo de cambios ambientales a gran escala temporal y espacial. Los resultados evidencian la necesidad de implementar sistemas de monitoreo continuo y adoptar estrategias de gestión adaptativa para mitigar los impactos de grandes embalses sobre la dinámica de sistemas fluviales amazónicos.

Palabras clave: Teledetección; Régimen Fluvial; Río Uatumã; Central Hidroeléctrica; Amazonía.

Introdução

As áreas alagadas da Bacia Amazônica desempenham papel fundamental na regulação dos ciclos hidrológicos, atuando frequentemente como reservatórios naturais durante períodos de seca extrema (SILVA, FREITAS e NOVO, 2007). Os ecossistemas alagáveis têm sua dinâmica de inundação controlada principalmente pela variabilidade natural da precipitação que controla o regime de variação do nível da água, conhecido como pulso de inundação (JUNK et al., 1989) que pode variar de 2 a 18 metros nos diferentes rios da Bacia Amazônica (FILIZOLA et al., 2002).

No entanto, a construção de reservatórios para geração de energia elétrica na região, a partir da década de 1980, provocaram impactos ambientais e sociais em grandes rios da Bacia amazônica, como no caso do Rio Uatumã. A represa de Balbina, localizada no estado do Amazonas, criou um lago artificial sobre uma vasta área plana que resultou em uma superfície de água de 3000 km² sobre terrenos de terra firme e igapós que estavam situados no médio e alto curso do Rio Uatumã, resultando em uma paisagem fragmentada com mais de 3.500 ilhas artificiais (SCHÖNGART et al., 2021).

Além das alterações físicas e hidrológicas, a formação de grandes reservatórios na Amazônia tem sido associada à perda de habitats, mudanças na biodiversidade aquática e terrestre, além de impactos diretos sobre comunidades ribeirinhas, que frequentemente enfrentam deslocamento e alterações em seus modos de vida (FEARNSIDE, 2008; RODRIGUES e OLIVEIRA, 2012). O represamento do Rio Uatumã modificou substancialmente a paisagem local, promovendo a formação de milhares de ilhas artificiais e alterando os padrões naturais de inundação, o que impactou a conectividade de habitats aquáticos, a fauna e as populações ribeirinhas (FORSSBERG et al., 2017). Tais transformações reforçam a necessidade de monitoramento contínuo, capaz de subsidiar políticas públicas e estratégias de manejo sustentável dos recursos hídricos na região.

Tradicionalmente, o acompanhamento da dinâmica hídrica nesses ambientes era realizado por meio de estações fluviométricas, que fornecem principalmente registros diários das cotas dos rios. Nas últimas décadas, contudo, dados de sensoriamento remoto orbital possibilitou importantes avanços para a análise espacial e temporal das áreas alagadas, permitindo a delimitação mais precisa da extensão de áreas inundadas, o monitoramento de parâmetros físicos e ecológicos, e a estimativa do nível de corpos d'água a partir de sensores altimétricos embarcados em satélites (MELACK e HESS, 2010; PEKEL et al., 2016). Apesar da ampla disponibilidade desses dados para a região amazônica, ainda existem lacunas em estudos detalhados sobre a frequência e a ocupação da água em determinadas áreas alagadas, especialmente durante eventos hidrológicos extremos e diante do aumento da pressão antrópica sobre os recursos naturais.

O mapeamento e o monitoramento de sistemas aquáticos por meio de dados de satélites são considerados como de uso consolidado pela comunidade de sensoriamento remoto, com diversos

estudos (FASSONI-ANDRADE et al., 2021; LOBO, COSTA e NOVO, 2015; MARINHO et al., 2022; MARINHO e SEVERO, 2023; MARTINEZ et al., 2015; MELACK e HESS, 2010; PEKEL et al., 2016; QUEIROZ, MARINHO e SEVERO, 2024; SEVERO et al., 2025) que abordam diferentes aplicações imagens de satélites para o monitoramento da dinâmica hidrológica na Amazônia. Entre essas aplicações destacam-se a detecção de mudanças em ilhas fluviais, alterações no curso e na morfologia dos rios, estimativas de biomassa, produção primária e outros aspectos da paisagem aquática (MARINHO e MELO, 2009).

A principal vantagem dessas técnicas reside na possibilidade de aquisição de dados sinópticos sobre grandes áreas, em diferentes épocas do ano, favorecendo uma abordagem integrada dos sistemas aquáticos (NOVO, BARBOSA e FREITAS, 2007). Apesar da variabilidade temporal do pulso de inundação nos grandes rios amazônicos ser relativamente bem caracterizada, ainda existem lacunas quanto à compreensão de sua variabilidade espacial, sobretudo em rios sob influência de barramentos, como o Uatumã. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo analisar a variabilidade espacial e temporal dos corpos d’água no médio e alto curso do Rio Uatumã, a partir de dados provenientes de satélites de sensoriamento remoto orbital.

Este estudo busca compreender a variabilidade espacial hídrica em sistemas fluviais amazônicos represados. A quantificação dos padrões de inundação no rio Uatumã, transformado pelo reservatório de Balbina em uma paisagem fragmentada com mais de 3.500 ilhas artificiais, fornece importantes subsídios para discutir impactos da construção de grandes represas na Amazônia.

Material e Métodos

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Uatumã está situada na margem esquerda do Rio Amazonas, abrangendo uma área total de aproximadamente 69.500 km² (MELACK e HESS, 2010). O principal curso d’água é o Rio Uatumã, com extensão de 492 km, tendo como seu principal afluente o Rio Jatapu, localizado à margem esquerda. No baixo curso da bacia destaca-se a Reserva de Desenvolvimento Sustentável do Uatumã (RDS Uatumã), unidade de conservação estadual de uso sustentável criada em 2004 pelo Decreto n.º 24.295, de 25/06/2004, com área de 424.430 hectares. A RDS (Figura 01) localiza-se nos municípios de São Sebastião do Uatumã e Itapiranga, no estado do Amazonas.

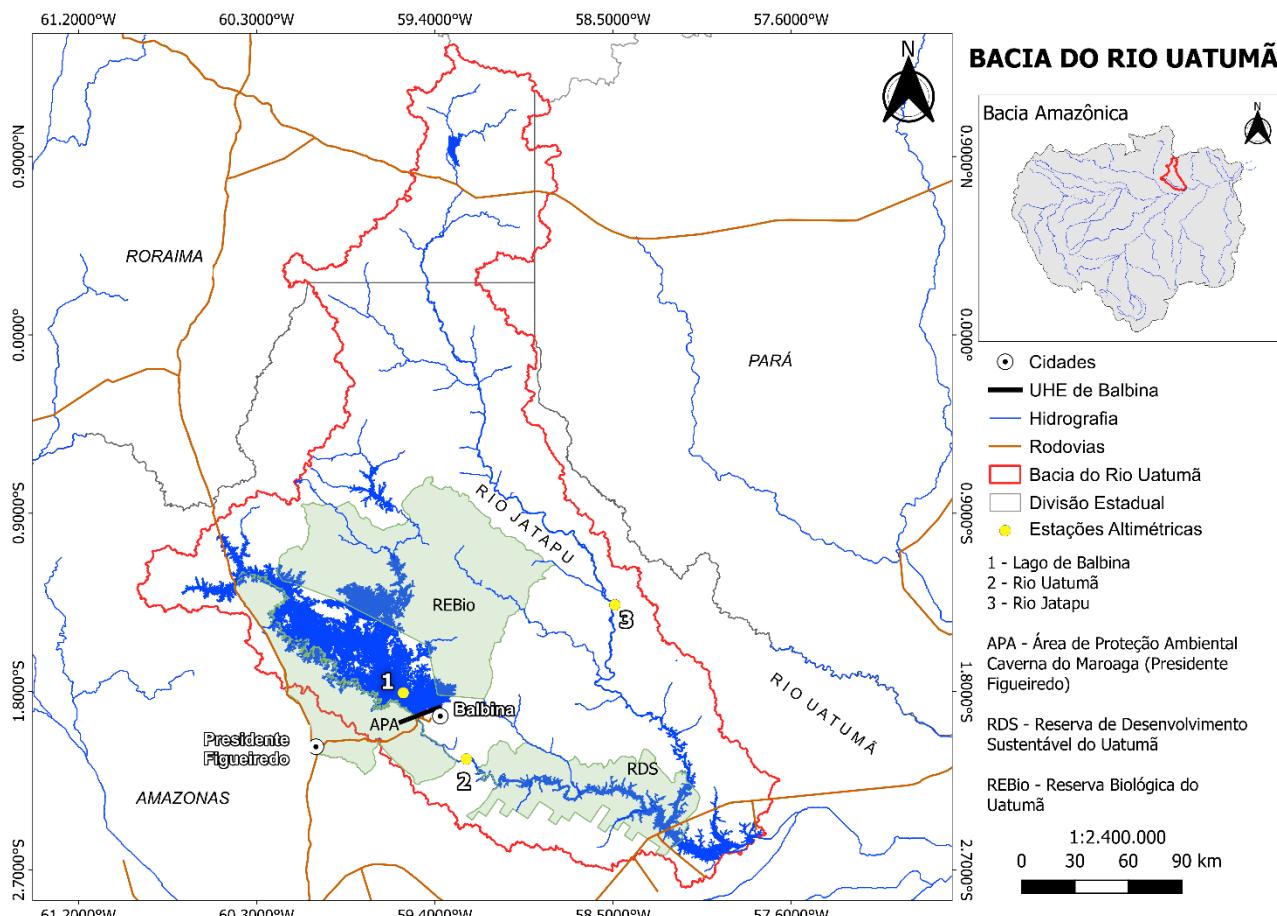


Figura 01- Mapa de localização da Bacia do Uatumã.

Fonte: Os autores, 2025

Os estudos para implantação da Usina Hidrelétrica (UHE) de Balbina cuja implantação foi realizada pela Eletronorte, subsidiária da Eletrobrás, tiveram início na década de 1970, as obras começaram em 1979 e a operação iniciou-se em 1989 (FEARNSIDE, 2015a). A UHE está situada no município de Presidente Figueiredo (AM), e na área de influência do empreendimento foi criada a Reserva Biológica do Uatumã (REBIO Uatumã), unidade de conservação federal de proteção integral instituída pelo Decreto n.º 99.277, de 06/06/1990, posteriormente com limites ajustados por decreto de 19/09/2002. A REBIO Uatumã se caracteriza como uma unidade de proteção integral, com acesso mais restrito e voltada à preservação de ecossistemas naturais e da biodiversidade local e abrange porções dos municípios de Presidente Figueiredo, São Sebastião do Uatumã e Urucará.

O clima predominante na região é classificado como tropical monçônico úmido (Af), de acordo com o sistema Köppen-Geiger, apresentando alta pluviosidade anual, com médias superiores a 2.000 mm, e baixa amplitude térmica ao longo do ano (ALVARES et al., 2013). A fauna local é composta por uma grande diversidade de mamíferos, aves, répteis e peixes, incluindo espécies consideradas raras ou ameaçadas de extinção (FEARNSIDE, 2015a).

Entre as características marcantes do Rio Uatumã destaca-se a coloração escura de suas águas, típica de rios de igapó, resultante da elevada acidez e baixa concentração de nutrientes, fatores que condicionam a baixa produtividade primária nesses ambientes (JUNK et al., 2015; SIOLI, 1984). Essas condições são comuns em cursos d'água originados no Escudo das Guianas ou nos sedimentos Terciários da Bacia Amazônica, influenciados pela presença de extensas áreas de florestas inundáveis e solos arenosos.

Desde o início do projeto de construção da Usina Hidrelétrica de Balbina, a condução do empreendimento foi alvo de questionamentos, principalmente quanto à transparência dos estudos e à adoção de procedimentos ambientais. Os principais relatórios de impacto foram elaborados por consultorias contratadas pela própria Eletronorte, responsável pelo empreendimento. Ressalta-se que o projeto foi implantado sem o devido cumprimento das etapas de Licença Prévia e Licença de Instalação, previstas na legislação ambiental vigente à época, conforme a Resolução nº 006/87 do CONAMA (THOME, 1993).

A vegetação presente na área posteriormente inundada para a formação do reservatório de Balbina não foi removida adequadamente antes do enchimento, resultando na submersão de grande quantidade de matéria orgânica. Esse processo contribuiu para a formação das chamadas "paliteiras" (Figura 2), caracterizadas por árvores mortas submersas, e para o desequilíbrio ambiental decorrente da decomposição desse material vegetal. Destaca-se que a decomposição da biomassa submersa é responsável pela liberação de gases de efeito estufa, como metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), intensificando os impactos ambientais associados ao empreendimento (FEARNSIDE, 2008).



Figura 02 – Vegetação Nativa Morta afetada pelo Lago de Balbina.
Fonte: Acervo dos autores. Dezembro de 2022.

A decomposição da matéria orgânica submersa no reservatório de Balbina ocasiona a produção significativa de gases como metano (CH_4) e ácido sulfídrico (H_2S), além de aumentar a acidez da água. Esse processo está relacionado tanto à biomassa vegetal inundada após a formação do lago, responsável pela formação das chamadas “paliteiras”, quanto à vegetação herbácea que cresce nas zonas de deplecionamento, áreas marginais periodicamente expostas e posteriormente novamente inundadas. Esse ciclo contínuo de crescimento e submersão da vegetação resulta na renovação das emissões de metano, fazendo com que o reservatório de Balbina atue como uma verdadeira “fábrica de metano”, com emissões sustentadas ao longo do tempo (FEARNSIDE, 2008; FEITOSA, GRAÇA e FEARNSIDE, 2007).

Estudos realizados por Feitosa, Graça e Fearnside (2007), demonstraram que a zona de deplecionamento representa aproximadamente 22% da área total afetada pelo reservatório, funcionando como fonte permanente de emissões de gases de efeito estufa. Esse mecanismo diferencia-se da emissão associada à floresta original submersa, que tende a declinar com o tempo. Dessa forma, a contínua produção de biomassa herbácea e sua rápida decomposição nessas áreas contribuem expressivamente para o impacto ambiental de longo prazo em Balbina, corroborando as avaliações de (FEARNSIDE, 2008) sobre o potencial emissor do reservatório.



Figura 03 – Área de deplecionamento, lago de Balbina.

Fonte: Acervo dos autores. Outubro de 2022.

Além dos processos já descritos, estudos anteriores destacam que a decomposição da madeira acima do nível da água, observada nas “paliteiras”, também constitui uma fonte relevante e persistente de emissões de gases de efeito estufa em Balbina. Abril et al. (2013) estimam que a decomposição acima da linha d’água pode responder por até 45% do total das emissões de carbono do reservatório

ao longo de 100 anos. Esse resultado indica que os processos biogeoquímicos desencadeados pela inundação extrapolam a fase inicial de perda de floresta, garantindo a continuidade das emissões por décadas, e reforçando a necessidade de considerar tanto a biomassa submersa quanto a emersa na avaliação do impacto climático de grandes reservatórios tropicais (ABRIL et al., 2013; FEARNSIDE, 2008).

Análise dos dados

Foram utilizadas séries altimétricas do portal Hydroweb/THEIA, estimadas por sensores altimétricos orbitais. Analisaram-se três estações virtuais: Lago de Balbina (monitorado pelas missões Topex/Poseidon, Jason-1 e Jason-2; entre 1992 e 2020), Rio Uatumã (Envisat, estação 1220; entre 2002 e 2010) e Rio Jatapu (Envisat, estação 1239; entre 2002 e 2010). Estes recortes temporais buscaram abranger o período pós-implantação do reservatório e analisar variações associadas a eventos hidrológicos extremos e tendências de longo prazo. As séries foram organizadas em planilha eletrônica, com cálculo de médias, máximos e mínimos mensais e anuais e elaboração de fluviogramas para caracterizar a dinâmica fluvial e lacustre em diferentes setores da bacia.

A metodologia adotada para extração e análise das séries altimétricas segue procedimentos validados para a região amazônica por Silva et al. (2010), que demonstraram a acurácia dos dados do ENVISAT para monitoramento de níveis em grandes rios tropicais, com erros médios inferiores a 30 cm quando comparados a estações convencionais.

A análise da dinâmica da superfície de água utilizou dados do projeto Global Surface Water (GSW), desenvolvido por Pekel et al. (2016), baseado em imagens dos sensores Landsat 5, 7 e 8 para o período de 1984 a 2020. Foram empregados dois produtos específicos do GSW: o produto Occurrence, que mapeia a frequência de ocorrência de água em cada pixel ao longo de toda a série histórica indicando a persistência temporal da cobertura aquática em escala percentual, e o produto Occurrence Change Intensity, que quantifica as mudanças na ocorrência de água comparando os períodos 1984-1999 e 2000-2021. Este último produto identifica áreas de ganho ou perda de água, fornecendo valores que variam de -100 a +100, onde valores negativos indicam redução e valores positivos representam aumento na frequência de ocorrência aquática. Os dados foram processados considerando duas escalas de valores: a escala original dos arquivos GeoTIFF (0 a 255 pixels) e a escala normalizada do Google Earth Engine (-100 a +100), representando variação percentual. Para visualização cartográfica, as classes de mudança foram diferenciadas cromáticamente com tons de verde para áreas de ganho de água e tons de vermelho para áreas de perda, facilitando a identificação espacial das transformações fluviais ocorridas na bacia do rio Uatumã.

O processamento dos dados GSW foi realizado no QGIS 3.10, utilizando como máscara o limite da bacia hidrográfica do rio Uatumã. A classificação binária entre superfícies de água e não-

água dos mosaicos anuais seguiu os procedimentos estabelecidos por Pekel et al. (2016), permitindo a elaboração de mapas temáticos que representam as variações espaciais e temporais da cobertura aquática durante períodos de cheia, seca e transição hidrológica. A quantificação das áreas ocupadas por água foi executada através da ferramenta r.report, calculando valores absolutos de ganho e perda de superfície aquática ao longo da série temporal. Para validação dos resultados, os dados de superfície de água estimados por sensoriamento remoto foram comparados com registros de cotas fluviométricas do banco de dados Theia Hydroweb, que utiliza altimetria por satélite, visando verificar a correspondência entre as variações na extensão das áreas alagadas e as oscilações do nível d'água observadas.

Duas campanhas de campo foram realizadas nos meses de outubro e dezembro de 2022, com o objetivo de validar visualmente a paisagem, reconhecer pontos-chave na área de estudo e registrar imagens fotográficas georreferenciadas. Durante as visitas, foram realizadas observações diretas para verificar a correspondência entre os dados de sensoriamento remoto e as condições ambientais observadas *in situ*.

Resultados e discussões

Variabilidade do Regime Fluvial por Altimetria Satelital

A análise de três estações virtuais altimétricas na bacia do rio Uatumã revelou padrões hidrológicos contrastantes entre trechos sob influência do barramento e aqueles em condições naturais (Tabela 1). O Lago de Balbina apresentou a menor amplitude de variação, com cotas oscilando entre 45,25 m e 47,25 m (amplitude de 2,0 m), evidenciando o efeito de regulação exercido pela UHE Balbina. Em contraste, a estação do rio Uatumã a jusante registrou maior variabilidade (9,99 m a 16,72 m, amplitude de 6,73 m), enquanto a estação do rio Jatapu, tributário não barrado, apresentou comportamento intermediário (34,79 m a 40,82 m, amplitude de 6,03 m).

A análise mensal dos dados altimétricos demonstra que o reservatório de Balbina mantém níveis relativamente estáveis ao longo do ano, com cotas médias variando de 45,30 m em fevereiro a 47,44 m em julho (amplitude anual de 2,14 m). Este padrão contrasta significativamente com o observado em grandes rios amazônicos não represados, onde a amplitude natural pode atingir 10 a 14 metros (JUNK; BAYLEY; SPARKS, 1989). A menor variabilidade no reservatório resulta da estratégia operacional da usina, que visa manter níveis elevados para garantir geração contínua de energia, mesmo durante períodos de menor precipitação.

Tabela 1 – Estações altimétricas e os valores máximos e mínimos de cota para cada estação.

Nº	Satélite	Código	Estação	Curso	Início	Fim	Cota máxima (m)	Cota mínima (m)
1	Topex/Poseidon Jason-1/Jason-2	-	Lago de Balbina	Rio Uatumã	1992	2020	47.25	45.25
2	Envisat	1220	Rio Uatumã	Rio Uatumã	2002	2010	16.72	9.99
3	Envisat	1239	Estação Jatapu	Rio Jatapu	2002	2010	40.82	34.79

Fonte: Hydroweb/Theia. Org.: Os autores. Ano: 2023.

No rio Uatumã a jusante da barragem, o regime hidrológico apresenta características distintas (Figura 4), com amplitude anual de 5,24 m e picos de cheia ocorrendo entre maio e junho (18,02 m), enquanto os menores níveis são registrados em dezembro (12,78 m). Este padrão indica que, embora modificado pelo controle da barragem, o trecho a jusante ainda mantém sazonalidade mais pronunciada em comparação ao reservatório, refletindo a influência tanto da operação da usina quanto dos aportes de tributários não controlados.

O rio Jatapu, por sua vez, exibe comportamento hidrológico diferenciado, com picos de cheia ocorrendo em maio (39,19 m) e menores níveis em novembro (35,87 m), resultando em amplitude anual de 3,32 m. A inversão temporal dos picos em relação ao Uatumã a jusante indica influência de padrões locais de precipitação e características topográficas específicas da sub-bacia, demonstrando a heterogeneidade espacial dos regimes fluviais na região.

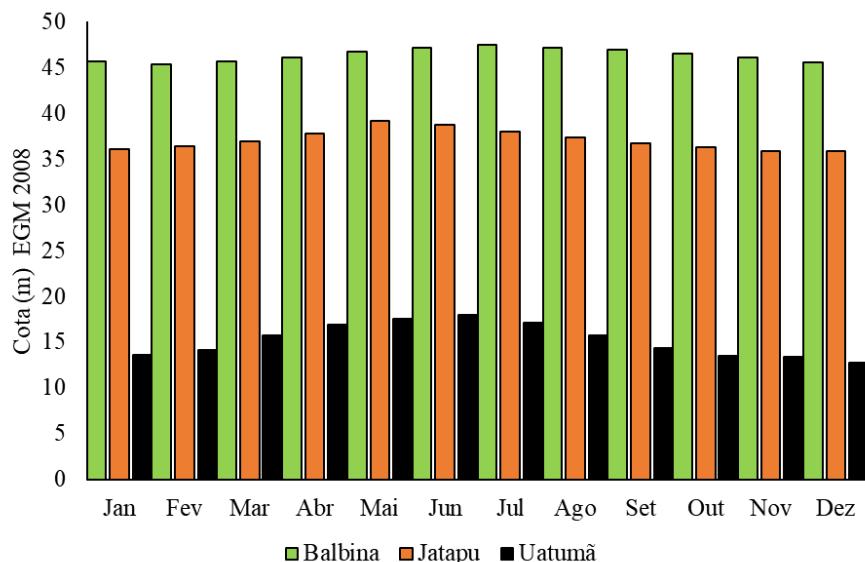


Figura 04 – Cotograma dos rios Uatumã no lago de Balbina, Jatapú e Uatumã à Jusante de Balbina. Elaboração: Os autores (2025).

A atenuação do pulso natural de inundação do Rio Uatumã devida a operação de geração de energia no reservatório de Balbina tem implicações ecológicas profundas para o funcionamento dos

ecossistemas aquáticos e terrestres da região. A redução da amplitude hidrológica compromete a conectividade lateral entre o canal principal e as planícies de inundação, alterando padrões de reprodução, alimentação e dispersão de espécies aquáticas adaptadas à sazonalidade natural dos ambientes de várzea e igapó.

Estudos de Resende et al. (2019) documentaram extensiva mortalidade de florestas de igapó no baixo rio Uatumã, associada às perturbações do pulso de inundação após a operação da UHE Balbina. Utilizando imagens ALOS/PALSAR e validação de campo, os autores identificaram faixas contínuas de floresta morta ao longo de dezenas de quilômetros a jusante da barragem, com proporções significativas de dossel colapsado e sinais de declínio estrutural em trechos remanescentes. Estes resultados demonstram que a alteração do regime hidrológico afeta não apenas a amplitude das cheias, mas também a resiliência das comunidades ripárias.

A formação do reservatório resultou na criação de mais de 3.500 ilhas artificiais, intensificando a fragmentação da paisagem aquática original e alterando substancialmente os padrões de conectividade de habitats. Esta fragmentação afeta processos ecológicos, ciclos de nutrientes, transporte de sedimentos e manutenção da produtividade primária dos ecossistemas aquáticos (FORSBERG et al., 2017; SCHÖNGART et al., 2021).

A comparação de dados nas três estações altimétricas evidencia o gradiente de impactos causados pelo barramento na bacia do rio Uatumã. Enquanto o reservatório de Balbina apresenta regime altamente controlado com baixa variabilidade sazonal, os trechos a jusante mantêm maior amplitude hidrológica, embora ainda modificada pela operação da usina. O rio Jatapu, como tributário não barrado, preserva características mais próximas do regime natural, servindo como referência para compreender as alterações impostas pelo represamento.

A confiabilidade dos dados altimétricos utilizados neste estudo é respaldada por validações anteriores de missões como ERS-2 e ENVISAT para grandes corpos d'água amazônicos com morfologia semelhante (SILVA et al., 2010), conferindo robustez às análises dos efeitos hidrológicos em Balbina. Resultados similares foram identificados por Marinho e Silva (2025), que destacam a capacidade do reservatório em amortecer oscilações naturais do nível d'água, alterando permanentemente o padrão fluvial original da bacia.

No contexto amazônico mais amplo, a regulação fluvial promovida por grandes reservatórios como Balbina representa um modelo de transformação que se replica em outras bacias da região, resultando na atenuação sistemática dos pulsos naturais de inundação e modificação dos regimes de cheias e secas. Estas alterações têm consequências em cascata sobre a estrutura e funcionamento dos ecossistemas aquáticos, evidenciando a necessidade de estratégias de manejo adaptativo que

considerem tanto as demandas energéticas quanto a manutenção da integridade ecológica dos sistemas fluviais amazônicos.

O represamento do rio Uatumã promoveu transformações estruturais na paisagem fluvial do seu médio curso, resultando na fragmentação das áreas alagadas, formação de milhares de ilhas artificiais e alteração da conectividade entre habitats aquáticos e terrestres. Como destacam Marinho e Silva (2025) e Schöngart et al. (2021), a formação do reservatório de Balbina modificou significativamente a dinâmica do pulso de inundação e a extensão das áreas periodicamente alagadas, causando perda de habitats contínuos e intensificação da fragmentação aquática. Estas transformações impactam diretamente a biodiversidade regional, os ciclos biogeoquímicos e a produtividade primária dos ecossistemas, padrão consistente com outros sistemas barrados da Amazônia (FEARNSIDE, 2015a, 2015b, 2019; FORSBERG et al., 2017).

Variação espaço-temporal da superfície de água

A comparação entre as imagens de satélite dos anos de 1985 (pré-represamento) e 2022 (pós-represamento) apresenta uma transformação expressiva na configuração hidrográfica da bacia do Rio Uatumã (Figura 5). Em 1985, destaca-se o curso natural do canal principal e sua rede de drenagem secundária, com predomínio de ambientes terrestres contínuos. Em 2022, observa-se a formação do Lago de Balbina, ocupando uma extensa área da bacia e promovendo a fragmentação da paisagem em centenas de ilhas artificiais. Essa expansão da superfície alagada e a criação de novos ambientes insulares resultam diretamente do represamento do Rio Uatumã, modificando de forma irreversível a paisagem fluvial e os processos ecológicos associados (MARINHO e SILVA, 2025; SCHÖNGART et al., 2021)

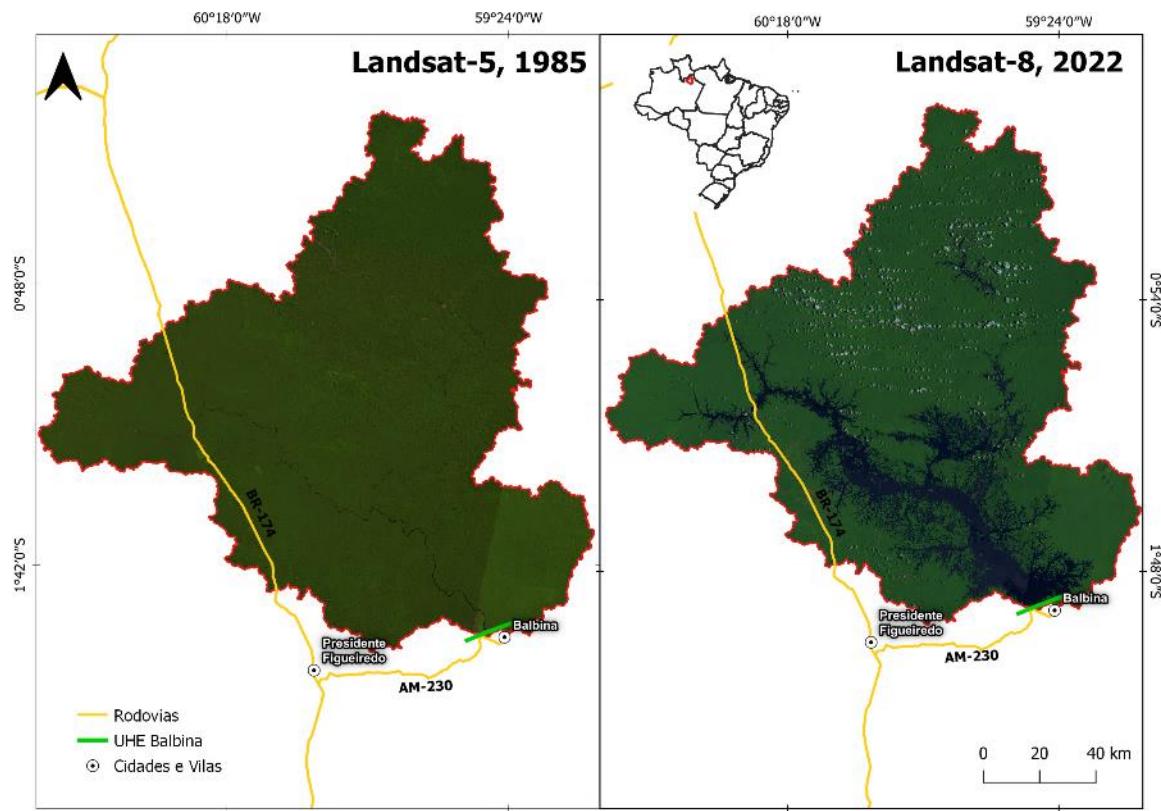


Figura 05 – Mudanças na superfície de água e na configuração da paisagem na bacia do Rio Uatumã, antes (1985) e após (2022) a formação do reservatório de Balbina.
Fonte: Os autores (2025).

Após a formação do reservatório, a paisagem aquática do Lago de Balbina passou a ser caracterizada por um labirinto de canais, o que de acordo com Fearnside (2015), possui mais de 3.000 ilhas e mais de 60 igarapés afluentes. Essa configuração demonstra o grau de fragmentação resultante do represamento e seus potenciais impactos sobre a conectividade, a circulação de água e a dinâmica ecológica regional.

A análise da intensidade de mudança da superfície de água no reservatório de Balbina, apresentada na Figura 6, exibe uma elevada ampliação da área da massa d’água em todo o setor central e leste da bacia do Rio Uatumã após o represamento, representada pelos tons de verde no mapa. Este padrão acompanha a formação do Lago de Balbina, com destaque para a ocupação de áreas anteriormente em terra firme, resultando em fragmentação da paisagem aquática e surgimento de ilhas.

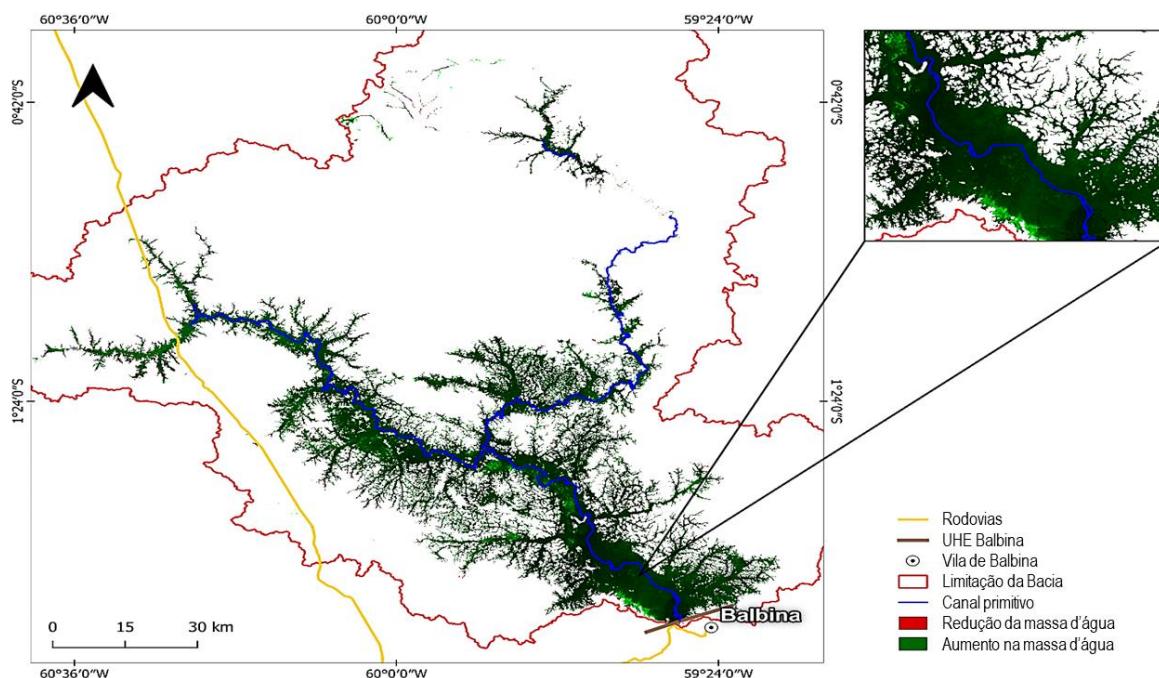


Figura 06 - Intensidade de mudança na ocorrência de água no reservatório de Balbina, baseada no produto “Occurrence Change Intensity” do Projeto Global Surface Water (comparação entre 1984–2021). Em verde, áreas com aumento de massa d’água; em vermelho, áreas com redução.
Fonte: Os autores (2025).

A análise da intensidade de mudança na superfície de água utilizando dados do Global Surface Water revelou transformações drásticas na paisagem aquática do reservatório de Balbina. Os dados foram processados considerando diferentes escalas de representação, onde os valores TIFF na Tabela 2 correspondem aos dados raster originais (números digitais de 0 a 255) e os valores GEE representam a codificação normalizada (-100 a +100) do Google Earth Engine, permitindo identificação dos setores com expansão ou retração da superfície alagada. A codificação cromática utilizada emprega tons verdes para ganho de água, tons vermelhos para perda, e valores intermediários para áreas sem alteração significativa ou impossibilidade de cálculo.

As áreas em vermelho indicadas no mapa correspondem a regiões onde a presença de água diminuiu ao longo das últimas décadas, principalmente em antigos canais secundários e igarapés que perderam conexão direta com o sistema principal após a formação do reservatório. No entanto, observa-se que esses setores de redução são pouco expressivos em extensão e dificilmente perceptíveis no mapa em comparação à vasta área em verde, que destaca a grande ampliação da superfície inundada.

Tabela 2 - Simbologia e interpretação dos valores da Intensidade de Mudança na Superfície de Água no reservatório de Balbina (GSW/Occurrence Change Intensity).

Valor (TIFF)	Valor (GEE)	Cor	Descrição
0	-100	Red	- 100 % perda da massa d'água
100	0	Black	Sem alteração
200	-100	Green	Aumento de 100% na massa d'água
253	-		Não água
254	-128	Grey	Incapaz de calcular um valor devido a nenhum mês homólogo
255	127		Sem dados

Fonte: Adaptado de Global-Surface-Water. **Org.:** Os autores. **Ano:** 2023.

A quantificação das mudanças da paisagem fluvial através dos dados GSW demonstrou o predomínio absoluto da classe "Ganho de massa d'água", totalizando 1.869.404 hectares, contrastando drasticamente com apenas 8.110 hectares de "Perda de massa d'água" (Tabela 3). A categoria "Hidrografia Primitiva", representando áreas com padrão fluvial estável, corresponde a apenas 1.006 hectares do total analisado de 1.878.520 hectares. Estes resultados quantificam um aumento expressivo de aproximadamente 1.858 vezes na superfície de água quando comparada à hidrografia original, evidenciando a magnitude da transformação antrópica imposta pelo represamento do rio Uatumã.

Tabela 3 - Área ocupada por cada classe de ocorrência de água na região do Lago de Balbina (em hectares)

Classe	Área (ha)
Perda massa d'água	8.110
Ganho massa d'água	1.869.404
Hidrografia Primitiva	1.006
Total	1.878.520

Fonte: Global Surface Water. **Org.:** Os autores. **Ano:** 2023.

A análise espacial confirma que o predomínio de áreas verdes na representação cartográfica da Figura 6 reflete a expressiva expansão da massa d'água e a reconfiguração dos ambientes aquáticos e terrestres regionais. Conforme destacado por Forsberg et al. (2017), esta transformação alterou substancialmente os padrões sazonais de inundação, onde áreas de baixa altitude na planície, que anteriormente secavam sazonalmente, passaram a permanecer inundadas de forma permanente, enquanto áreas mais elevadas, que eram sazonalmente alagadas, tornaram-se quase permanentemente secas.

A grande mudança da paisagem, ao mesmo tempo em que promoveu a inundação de amplas áreas de terra firme, também resultou no isolamento de trechos do antigo canal, criação de ambientes lêntico e na criação de centenas de ilhas, fenômeno registrado em grandes reservatórios amazônicos (FEARNSIDE, 2019; LATRUBESSE et al., 2017; TIMPE e KAPLAN, 2017). Ao analisar a distribuição espacial dessas mudanças, observa-se um avanço do processo de fragmentação estrutural, não apenas pela perda de continuidade entre habitats, mas também pela multiplicação de ambientes aquáticos isolados, com potenciais consequências para a biodiversidade e o funcionamento ecológico regional.

A magnitude do ganho de área alagada evidencia a força do agente antrópico na transformação da bacia hidrográfica, com efeitos diretos sobre a configuração da paisagem, a conectividade dos ambientes e a fragmentação dos habitats aquáticos. Paradoxalmente, apesar do considerável ganho de massa de água documentado, a usina de Balbina apresenta baixa eficiência energética devido às características topográficas desfavoráveis. O rio Uatumã, responsável pelo abastecimento do reservatório, possui baixa vazão natural, área de drenagem relativamente pequena e reduzida altura de queda d'água na barragem, fatores que limitam significativamente a eficiência das turbinas e resultam em produção energética desproporcional ao impacto ambiental causado (FEARNSIDE, 2015a). Esta análise reforça a importância do monitoramento contínuo dessas alterações para subsidiar estratégias de manejo e conservação que considerem tanto a magnitude das transformações ambientais quanto a efetividade dos projetos hidrelétricos na região amazônica (MARINHO e SILVA, 2025).

Considerações Finais

A integração de dados de sensoriamento remoto permitiu compreender de forma abrangente os efeitos da formação do reservatório de Balbina sobre o regime fluvial e a configuração da paisagem do rio Uatumã. A análise multitemporal revelou ampliação expressiva da área inundada, acompanhada pela reorganização espacial das zonas alagadas e criação de ilhas e canais, modificando profundamente a configuração hidrogeomorfológica regional. O mapeamento da intensidade de mudança na superfície hídrica mostrou a expansão da massa de água bem como as perdas relacionadas aos antigos canais e igarapés que foram incorporados ao reservatório.

As transformações identificadas transcendem a simples ampliação das áreas alagadas, promovendo fragmentação estrutural do hidrossistema com alterações significativas no funcionamento dos ciclos biogeoquímicos. A regulação do pulso de inundação pelo barramento restringiu substancialmente a amplitude das variações sazonais do nível da água, condição fundamental para reprodução de espécies aquáticas, dispersão de sementes e renovação de habitats.

O controle artificial do fluxo impactou diretamente o transporte de sedimentos e alterou processos essenciais que sustentam a produtividade primária e a biodiversidade em ambientes de igapó, representando desafios adicionais para a conservação de sistemas fluviais amazônicos.

O emprego de técnicas de sensoriamento remoto mostrou-se fundamental para monitorar e quantificar essas alterações em escala regional, fornecendo subsídios para avaliação de impactos ambientais e suporte ao planejamento de ações de manejo e mitigação. A metodologia aplicada demonstrou eficácia na detecção de mudanças hidrogeomorfológicas de larga escala, contribuindo para o monitoramento de reservatórios amazônicos.

A resolução temporal dos dados de altimetria radar utilizados neste estudo apresenta limitações para capturar variações hidrológicas de alta frequência e eventos extremos de curta duração. Esta limitação temporal pode subestimar a variabilidade natural dos sistemas fluviais e dificultar a compreensão de processos ecológicos dependentes de flutuações rápidas do nível da água. Para superar essas limitações, recomenda-se novos estudos com integração de dados provenientes de novas missões altimétricas, como o Surface Water and Ocean Topography (SWOT), em conjunto com estações fluviométricas convencionais.

A continuidade do monitoramento através de sistemas híbridos que combinem sensoriamento remoto com medições *in situ* permitirá melhor compreensão da dinâmica hidrológica em múltiplas escalas temporais, facilitando o desenvolvimento de estratégias de gestão adaptativa voltadas à manutenção da atual biota aquática protegida pela Rebio Uatumã. Tais estratégias são fundamentais para conciliar a produção de energia hidrelétrica com a preservação dos serviços ecossistêmicos na bacia do rio Uatumã e em outros sistemas fluviais amazônicos sob crescente pressão antrópica.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi realizada com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas – FAPEAM (Projeto AQUATUMÃ – Avaliação da qualidade d’água na Rebio Uatumã e Lago de Balbina por sensoriamento remoto, Edital nº 007/2021 – BIODIVERSA/FAPEAM). A primeira autora agradece à UFAM pela bolsa de Iniciação Científica recebida (PIB-H/0032/2022). Agradecemos a equipe gestora da Reserva Biológica do Uatumã em Balbina pelo apoio logístico (SISBIO 81540-1).

Referências

- ABRIL, G.; PARIZE, M.; PÉREZ, M. A.; FILIZOLA, N. P. Wood decomposition in Amazonian hydropower reservoirs: An additional source of greenhouse gases. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 44, p. 104–107, jul. 2013.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, E. G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- ANA. HIDROWEB. Disponível em: <<https://www.snrh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 29 jan. 2024.
- BRASIL. Decreto nº 99.274, de 6 de junho de 1990. **Regulamenta a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/antigos/d99274.htm. Acesso em: 03 jul. 2025.
- FASSONI-ANDRADE; A. C.; FLEISCHMANN, A. S.; PAPA, F.; PAIVA, R. C. D.; WONGCHUIG, S.; MELACK, J. M.; MOREIRA, A. A.; PARIS, A.; RUHOFF, A.; BARBOSA, C.; MACIEL, D. A.; NOVO, E.; DURAND, F.; FRAPPART, F.; AIRES, A.; ABRAHÃO, G. G.; FERREIRA-FERREIRA, J.; ESPINOZA, J. C.; LAIPELT, L.; COSTA, M. H.; ESPINOZA-VILLAR, R.; CALMANT, S.; PELLET, V. Amazon Hydrology From Space: Scientific Advances and Future Challenges. **Reviews of Geophysics**, v. 59, n. 4, p. e2020RG000728, dez. 2021.
- FEARNSIDE, P. **HIDRELÉTRICAS COMO “FÁBRICAS DE METANO”: O PAPEL DOS RESERVATÓRIOS EM ÁREAS DE FLORESTA TROPICAL NA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA**. Oecologia Australis, v. 12, n. 01, p. 100–105, ago. 2008.
- FEARNSIDE, P. M. **Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras**. Manaus: Editora do INPA, 2015a. v. 1
- FEARNSIDE, P. M. **Hidrelétricas na Amazônia: Impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grande obra**. Manaus: Editora INPA, 2015b. v. 2
- FEARNSIDE, P. M. **Hidrelétricas na Amazônia: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras**. Manaus: Editora do INPA, 2019. v. 3
- FEITOSA, G.; GRAÇA, P. M. L. A.; FEARNSIDE, P. M. Estimativa da zona de deplecionamento da hidrelétrica de Balbina por técnica de sensoriamento remoto. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Florianópolis: INPE, 2007.
- FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L.; MOLINIER, M.; GUIMARÃES, V.; OLIVEIRA, E.; FREITAS, M. A.; FREITAS, C. E. C.; RIVAS, A.. Caracterização hidrológica da Bacia Amazônica. In: FREITAS, Carlos Edwar de Carvalho; RIVAS, Alexandre (Orgs.). **Amazônia uma perspectiva interdisciplinar**. Manaus: EDUA, 2002. p. 33–53.
- FORSBERG, B. MELACK, J.M.; DUNNE, T.; GOULDING, M.; PAIVA, R. C. D.; SORRIBAS, M. V.; SILVA, U. L.; WEISSER, S.; SCHUMANN, G. J. P. The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial ecosystems. **PLOS ONE**, v. 12, n. 8, p. e0182254, 23 ago. 2017.

JUNK, WOLFGANG; BAYLEY, PETER B.; SPARKS, RICHARD E. The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. In: : Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL LARGE RIVER SYMPOSIUM (LARS). *Proceedings of the International Large River Symposium (LARS)*. Honey Harbour, Ontario, Canadá: 1989.

JUNK, W. J.; AN, S.; FINLAYSON, C. M.; GOPAL, B.; KVĚT, J.; MITCHELL, S. A.; MITSCH, W. J.; ROBARTS, R. D. A classification of the major habitats of Amazonian black-water river floodplains and a comparison with their white-water counterparts. *Wetlands Ecology and Management*, v. 23, n. 4, p. 677–693, ago. 2015.

LATRUBESSE, E. M; ARIMA, E. Y.; DUNNE, T.; PARK, E.; BAKER, V. R.; D'HORTA, F. M.; WIGHT, C.; WITTMANN, F.; ZUANON, J.; BAKER, P. A.; RIBAS, C. A.; NORGAARD, R. B.; FILIZOLA JUNIOR, N. P.; ANSAR, A.; FLYVBJERG, B.; STEVAUX, J. C. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature*, v. 546, n. 7658, p. 363–369, jun. 2017.

LOBO, F. L.; COSTA, M. P. F.; NOVO, EVLYN, M. L. M. Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian waters impacted by gold mining activities. *Remote Sensing of Environment*, v. 157, p. 170–184, fev. 2015.

MARINHO, R.; WACHHOLZ, F. ROCHA, A. SEVERO, E. B. Monitoramento do sedimento suspenso por sensoriamento remoto no rio Tarumã-Açu (Manaus - AM). In: SILVA NETO, João Cândido André; WACHHOLZ, Flávio (Orgs.). *Geotecnologias e Análise da Paisagem na Amazônia*. 2022. p. 137–151.

MARINHO, R.; MELO, E. Análise multitemporal da geomorfologia fluvial do rio Solimões entre dois períodos hidrológicos (cheia de 1999 e a vazante 2005). In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. *Anais do XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*. Natal: INPE, 2009.

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* Florianópolis: GALOÁ, 2023.

MARINHO, R. R.; SILVA, D. S. O REGIME HIDROSEDIMENTAR DO RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE BALBINA (AMAZONAS). *Revista Contexto Geográfico*, p. 303–311, 2025.

MARTINEZ, J. M.; ESPINOZA-VILLAR, R.; ARMJOS, E.; MOREIRA, L. S. The optical properties of river and floodplain waters in the Amazon River Basin: Implications for satellite-based measurements of suspended particulate matter. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 120, n. 7, p. 1274–1287, 2015.

MELACK, J. M.; HESS, L. L. Remote Sensing of the Distribution and Extent of Wetlands in the Amazon Basin. In: JUNK, Wolfgang J. et al. (Orgs.). *AMAZONIAN FLOODPLAIN FORESTS*. Ecological Studies. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. v. 210 p. 43–59.

PEKEL, J. F.; COTAM, A.; GORELICK, N.; BELWARD, A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, v. 540, n. 7633, p. 418–422, 15 dez. 2016.

QUEIROZ, M. S.; MARINHO, R. R.; SEVERO, E. B. FLUXO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO DO RIO DEMINI, NOROESTE AMAZÔNICO. *Revista Contexto Geográfico*, v. 9, n. 20, p. 82–97, 3 set. 2024.

RESENDE, A. F.; SCHÖNGART, J.; STREHER, A. S.; FERREIRA-FERREIRA, J.; PIEDADE, M. T. F.; SILVA, T. S. F. Massive tree mortality from flood pulse disturbances in Amazonian floodplain forests: The collateral effects of hydropower production. *Science of the Total Environment*, p587-598, 2019.

RODRIGUES, R. A.; OLIVEIRA, J. A. Impactos sociais da desterritorialização na Amazônia brasileira: o caso da hidrelétrica de Balbina (Social impacts of resettlement in the Brazilian Amazon: the case of the Balbina hydroelectric dam). *Emancipacão*, v. 12, n. 1, p. 35–53, 2012.

SCHÖNGART, J.; WITTMANN, F.; RESENDE, A. F.; ASSAHIRA, C.; LOBO, G. S.; NEVES, J. R. D.; ROCHA, M.; MORI, G. B.; QUARESMA, A. C.; DEMARCHI, L. O.; ALBUQUERQUE, B. W.; FEITOSA, Y. O.; COSTA, G. S.; FEITOZA, G. V.; DURGANTE, F. M.; LOPES, A.; TRUMBORE, S. E.; SILVA, T. S. G.; STEEGE, H. T. S.; VAL, A. L.; JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F. The shadow of the Balbina dam: A synthesis of over 35 years of downstream impacts on floodplain forests in Central Amazonia. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 31, n. 5, p. 1117–1135, maio 2021.

SEVERO, E. B. BANDEIRA, I. C. N.; MARINHO, R. R.; FILIZOLA, N. P.; QUEIROZ, M. S. COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO RIO AMAZONAS EM ÓBIDOS, PARÁ, BRASIL. In: XXI SIMPÓSIO INTERNACIONAL SELPER: ALÉM DO DOSSEL – TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES DE SENSORIAMENTO REMOTO. Anais do *XXI SIMPÓSIO INTERNACIONAL SELPER: ALÉM DO DOSSEL – TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES DE SENSORIAMENTO REMOTO*. Belém/PA: 9 jan. 2025. >

SILVA, J. S.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; ROTUNNO FILHO, O. C.; COCHONNEAU, G.; MANSUR, W. J. Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, n. 10, p. 2160–2181, out. 2010.

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

THOME, J. L. *HIDRELÉTRICA DE BALBINA: UM FATO CONSUMADO*. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Sociologia Política. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.

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