

**CARACTERIZAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO
XINGU COM APLICAÇÃO DE ALTIMETRIA ESPACIAL
CHARACTERIZATION OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE RIVER BASIN
XINGU WITH THE APPLICATION OF SPATIAL ALTIMETRY**

Eng. Marcio Fernando Prado de Oliveira. (1)

Raimundo Walber Barros Oliveira. (2)

Tierre de Almeida dos Santos. (3)

Dr.C. Rafael Jovito de Souza. (4)

Dr.C. João D' Anuzio Menezes de Azevedo Filho. (5)

Joecila Santos da Silva. (6)

1. Universidad del Estado de Amazonas. Brasil. mfpo.eng@gmail.com
2. Universidad del Estado de Amazonas. Brasil. rwbfbmgr23@uea.edu.br
3. Universidad del Estado de Amazonas. Brasil. tdadsmgr22@uea.edu.br
4. Universidad del Estado de Amazonas. Brasil. rjovito@uea.edu.br
5. Universidad del Estado de Amazonas. Brasil. jdazevedo@uea.edu.br
6. Universidad del Estado de Amazonas. Brasil. jsdsilva@uea.edu.br

RESUMO

A região Amazônica possui um extenso território e complexa rede hidrográfica, tendo desafios técnicos e logísticos ao monitoramento do regime hidrológicos dos rios devido à inacessibilidade de algumas regiões. O uso da altimetria espacial por satélites altimétricos permite monitorar níveis dos corpos hídricos em áreas de difícil acesso, auxiliando na coleta e qualidade das informações hidrológicas da Rede Hidrometeorológica Nacional. O presente trabalho objetiva aplicar técnica de altimetria espacial para caracterizar a variabilidade espacial e sazonal do regime hidrológico do rio Xingu e correlacionar as anomalias mensais de níveis de água, usando dados altimétricos de nível de água no período de 2008 a 2023 obtidos por estações virtuais, utilizando os satélites Jason2, Jason-3 e Jason CS/Sentinel 6. Os cotogramas gerados mostram a variabilidade espacial e sazonal do regime hidrológico, tendo dois períodos hidrológicos bem definidos. Seu regime hidrológico é caracterizado como modal, com aumento e recessão lentas. A enchente ocorre entre os meses de outubro à março, tendo as cotas máximas em março. A vazante começa em abril e se estende até setembro, mês que apresenta as cotas mínimas. Tais resultados certificam a possibilidade de

utilização dos dados altimétricos como meio de medir e monitorar a sazonalidade das cotas dos grandes rios da região amazônica, servindo como base para estudos hidrológicos futuros.

Palavras-chave: Altimetria especial, Monitoramento hidrológico; Cotograma; Variabilidade espacial.

ABSTRACT

The Amazon region has an extensive territory and a complex hydrographic network, with technical and logistical challenges in monitoring the hydrological regime of rivers due to the inaccessibility of some regions. The use of spatial altimetry by altimetric satellites makes it possible to monitor the levels of water bodies in areas of difficult access, helping in the collection and quality of hydrological information from the National Hydrometeorological Network. The present work aims to apply spatial altimetry technique to characterize the spatial and seasonal variability of the hydrological regime of the Xingu River and to correlate the cognitive anomalies of water levels, using altimetric data of water level in the period from 2008 to 2023 received by virtual stations, using the Jason-2, Jason-3 and Jason CS/Sentinel 6 satellites. The generated quotagrams show the spatial and seasonal variability of the hydrological regime, having two well-defined hydrological periods. Its hydrological regime is characterized as modal, with slow increase and recession. The flood occurs between the months of October to March, with the maximum levels in March. The ebb begins in April and extends until September, the month that presents the minimum levels. Such results certify the possibility of using altimetric data as a means of measuring and monitoring the seasonality of the quotas of the large rivers in the Amazon region, serving as a basis for future hydrological studies.

Keywords: Special altimetry, Hydrological monitoring; Cotagram; Spatial variability.

Recibido: 10/01/2024

Aprobado:22/02/2024

1. INTRODUÇÃO

Indiscutivelmente a água é de fundamental importância para o desenvolvimento da vida, tanto com fator de sobrevivência quanto para o desenvolvimento socioeconômico da sociedade. Contudo, o uso desordenado da água, sem o devido cuidado, pode colocar em risco a sustentabilidade e segurança deste importante recurso natural.

Com o propósito de garantir a segurança hídrica e o desenvolvimento sustentável do Brasil, a Agência Nacional de Águas – ANA, faz uso do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH, instrumento de gestão de recursos hídricos estabelecido pela Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH, instituída pela Lei nº 9.433/97.O SNIRH é uma ferramenta computacional integrada e robusta que realiza a coleta, tratamento, armazenamento, recuperação de dados e produção de informações sobre recursos hídricos de forma a monitorar as atividades dos rios, visando ampliar o conhecimento sobre a qualidade deste recurso hídrico.(SNIRH,2023) O

monitoramento hidrológico consiste na coleta, tratamento, armazenamento e gerenciamento de dados hidrológicos. Este trabalho é fundamentado no acompanhamento das variações hidrológicas em diversas estações hidrometeorológicas consideradas estratégicas, sendo possível compreender profundamente o ciclo da água, a dinâmica dos processos úmidos, as precipitações e fenômenos atmosféricos, os níveis dos corpos hídricos e vazões, dentre outros aspectos. Este conjunto sistematizado de dados serve de subsídio na tomada de decisão em todos os aspectos da gestão dos recursos hídricos, na vasta gama de aplicações operacionais bem como na investigação (Pereira *et al.*, 2018). O monitoramento hidrológico permite, ainda, aos órgãos de defesa civil, tomar as decisões necessárias para evitar ou minimizar os potenciais danos decorrentes de fenômenos hidrológicos extremos, que podem resultar em enchentes, ou secas, que prejudicam o abastecimento e uso da água nos diversos setores produtivos, principalmente na agricultura, geração de energia e indústrias (Moraes *et al.*, 2018).

É um grande desafio realizar o monitoramento dos recursos hídricos na bacia amazônica, visto que em certos pontos desta bacia a rede de observação hidrometeorológica é escassa ou praticamente inexistente, devido principalmente ao difícil acesso. Este é um fator que dificulta a compreensão das variabilidades e incertezas que envolvem estudos do ciclo hidrológico nessa área (Seyler *et al.*, 2009). Assim, utilizar dados de satélite de observação da Terra possibilita a análise com detalhes, tanto espacial quanto temporal, do sistema hidrológico como um todo, em especial as localidades de difícil acesso (Alsdorf *et al.*, 2007).

A altimetria espacial parte do princípio de que os satélites altimétricos medem a altura instantânea da superfície oceânica através da emissão de uma onda eletromagnética no nadir do satélite e pela medida do intervalo de tempo que separa a emissão da onda, da recepção de um eco. Esses satélites possuem cobertura global, o que também possibilita que seja obtida altura da superfície da lâmina de água em hidrossistemas continentais. Devido a sua vasta resolução espacial, gera resultados em locais de difícil acesso, onde não há redes de monitoramento hidrológicas convencionais ou, mesmo quando tais redes existem, podem complementar os dados *in situ* quando os mesmos foram interrompidos. Portanto, é uma excelente técnica para obtenção de medidas de nível da água na bacia do rio Xingu, dada as limitações da rede de monitoramento hidrológico na região (Silva, 2010).

Dessa forma, a altimetria espacial tem sido aplicada de forma ampla em estudos hidrológicos, sendo por exemplo, utilizada com o intuito de monitorar e quantificar variações da dinâmica do rio, suprimindo a carência de dados, melhorando a qualidade e os custos quanto à obtenção de dados hidrológicos.

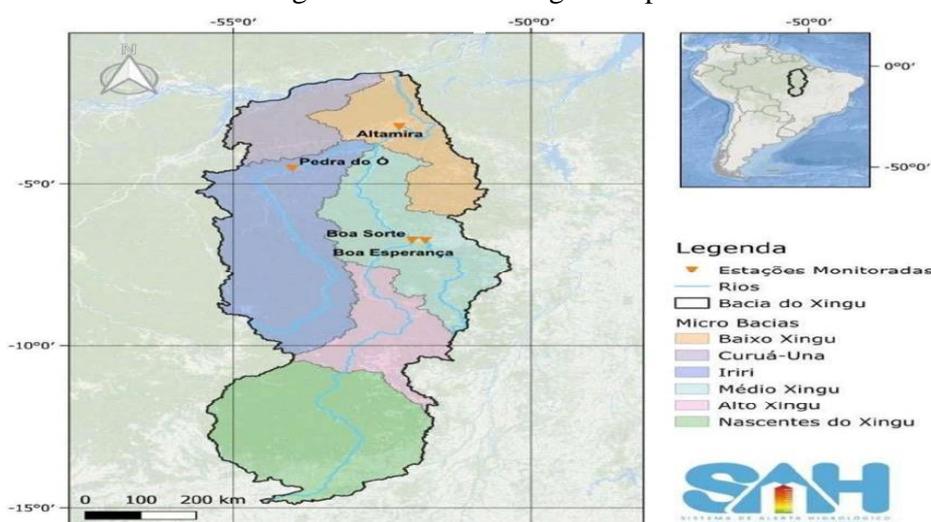
Neste contexto, o objetivo deste trabalho é a aplicação da técnica de altimetria espacial a fim de caracterizar e analisar a variabilidade espacial e sazonal do regime hidrológico do rio Xingu, subbacia da bacia Amazônica, com base em dados altimétricos de nível de água obtidos através de estações virtuais, utilizando os satélites Jason-2, Jason-3 e Jason-CS/Sentinel-6, no período de 2008 a 2023, contribuindo com informações hidrológicas para fins de gestão dos recursos hídricos da região.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1. Área de Estudo

A área de estudo é apresentada na Figura 1, englobando a sub-bacia do rio Xingu, na Amazônia Oriental. O rio Xingu é o quarto maior tributário do Amazonas, tendo quase 2500 km de extensão e contribui com cerca de 4% da descarga anual do rio Amazonas, cujo valor é de 131.947 m³/s (ANA, 2007). A maior parte da bacia do Xingu se localiza dentro da região de floresta amazônica, mas as cabeceiras se localizam em regiões dominadas por savanas arbustivas (Aliança Águas Amazônicas, 2023).

Figura 1: Bacia do Xingu e respectivas sub-bacias



Fonte: http://www.cprm.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php?getbacia=bamazonasAnteriores#

O rio Xingu nasce no encontro das Serras Formosa e do Roncador e está dividido basicamente em três compartimentos: Alto, Médio e Baixo Xingu. No Alto Xingu seus formadores são: o rio Ferro, o rio Culuene e o rio Sete de Setembro. Entra no Parque Indígena do Xingu, onde recebe outros importantes afluentes como o SuiáMiçu, Manissaua-Miçu e Arraias. No Médio Xingu, recebe entre outras, as contribuições do rio Fresco, no município de São Félix do Xingu, e mais a jusante, do rio Iriri, o afluente mais importante do Xingu (CPRM,2023).

2.2. Dados Altimétricos

Neste trabalho utilizaram-se os dados dos satélites Jason-2, Jason-3 e Jason CS-Sentinel 6, entre os anos de 2008 e 2023. Os dados altimétricos estão incorporados à Rede de Monitoramento Altimétrico do Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia (RHASA)

tendo acesso junto à base de dados Hydroweb, da plataforma THEIA-CNES (<http://hydroweb.theia-land.fr/?lang=en&>). A distribuição das EVs ao longo da bacia é listada na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Estações virtuais utilizadas no rio Xingu.

Nome da Estação Virtual	Latitude (°)	Longitude (°)	Cota Média Mínima (m)	Cota Média Máxima (m)	Amplitude Média (m)	Distância até o mar (Km)
XINGU_2509	-6.1427	-52.5159	168,78	173,22	4,44	1020
XINGU_2511	-6.5909	-52.2149	175,75	179,83	4,08	1088

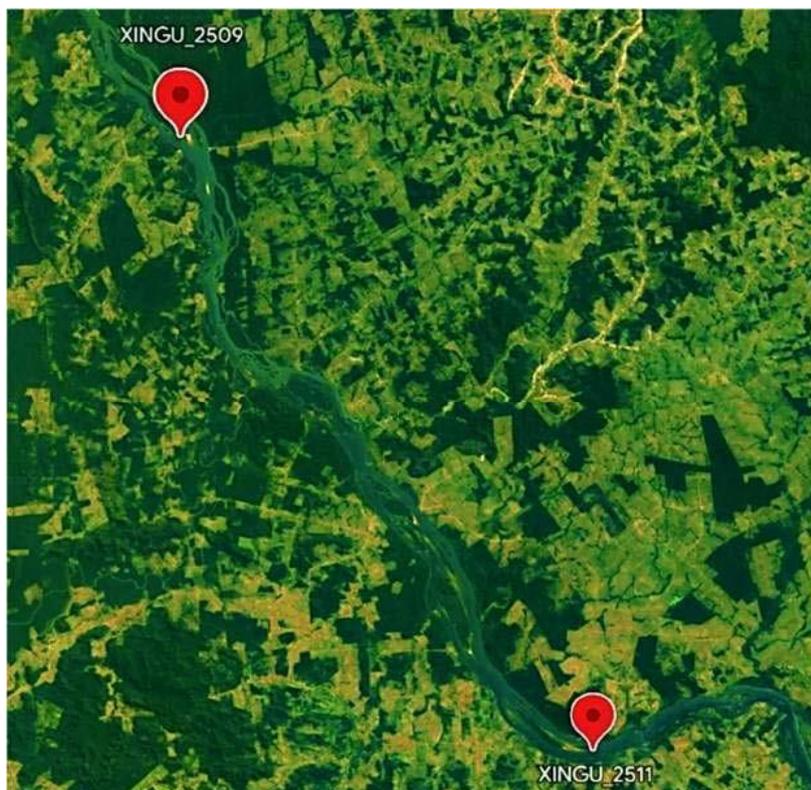
Fonte: Próprio autor, 2023.

2.3. Métodos

2.3.1 Elaboração das Estações Virtuais

Esses dados de nível de água estimados são fornecidos por meio de Estações Virtuais (EV), que correspondem ao ponto de cruzamento da passagem dos satélites com um corpo hídrico. O termo virtual é usado somente com o intuito de diferenciar de uma estação *in situ*. A realização da estação virtual (EV) é baseada na junção de um traço do satélite altimétrico com os corpos hídricos na superfície terrestre para alcançar uma série temporal da altura do plano de água (Silva et al., 2010; Calmant e Seyler, 2006). Para a criação das EVs foi empregada a metodologia especificada por Silva et al. (2010), onde os dados altimétricos das medições adquiridas dos três satélites em conjunto foram selecionados por meio do programa *Multi-mission Altimetry Processing Software* (MAPS, 2018) e construídos por meio de um mosaico de imagem em segundo plano do programa *Google Earth* (Google Earth, 2022), conforme a Figura 2. Através do modelo de ondulação geoidal EGM2008, elaborado por Pavlis *et al.* (2008), as alturas elipsoidais de nível de água, foram convertidas em alturas geoidais.

Figura 2 - Distribuição das estações virtuais na bacia do rio Xingu (XINGU_2509 e XINGU_2511).



Fonte: Mosaico de imagem do Google Earth, em segundo plano.

2.3.2 Caracterização do regime hidrológico

Inicialmente, para a caracterização do regime hidrológico, foi obtida a representação gráfica das informações hidrológicas através de séries temporais das alturas da lâmina da água, com o objetivo de analisar o comportamento das cotas altimétricas ao decorrer dos anos de registro dos satélites, ponderando a existência de regularidade e estacionariedade, tal como, o possível evento de anomalias.

Em seguida, foram gerados 2 cotagramas visando observar o comportamento do nível de água ao longo de um ano hidrológico, de modo de avaliar a sazonalidade durante os quinze anos selecionados para estudo (2008 a 2023). Para a montagem dos cotagramas, foram construídos gráficos para cada uma das séries temporais com auxílio do cálculo das médias mensais anuais das cotas altimétricas com base da ordenação, no Excel, dos dados de cotas altimétricas de forma que cada coluna representasse um ano e cada linha dessa coluna, um mês. Desta forma, matrizes de 12 linhas e N_a (número de anos) colunas foram estruturadas. De cada linha foi retirado o valor médio, representando a cota altimétrica média daquele mês considerando todos os anos registrados, conforme equação 1.

$$\frac{\sum}{n} \quad 1$$

Onde:

: cota altimétrica média mensal [m];

C: cota altimétrica do mês [m]; e

: número de registros do mês.

O gráfico foi desenvolvido posicionando no eixo das abscissas os meses análogos ao período de um ano inteiro. No eixo das ordenadas foram distribuídas as cotas altimétricas médias mensais considerando todos os anos.

2.3.3 Amplitude da Lâmina de água

Os valores de amplitude média da superfície da lâmina de água foram calculados. Estes resultados foram obtidos com base nos dados dos cotagramas, sendo utilizados na avaliação da variabilidade do regime hidrológico em questão.

$\bar{a} = a - f$ (2) Onde:

\bar{a} : amplitude média [m]; a : cota

máxima do cotograma [m];

f : cota mínima do cotograma [m].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

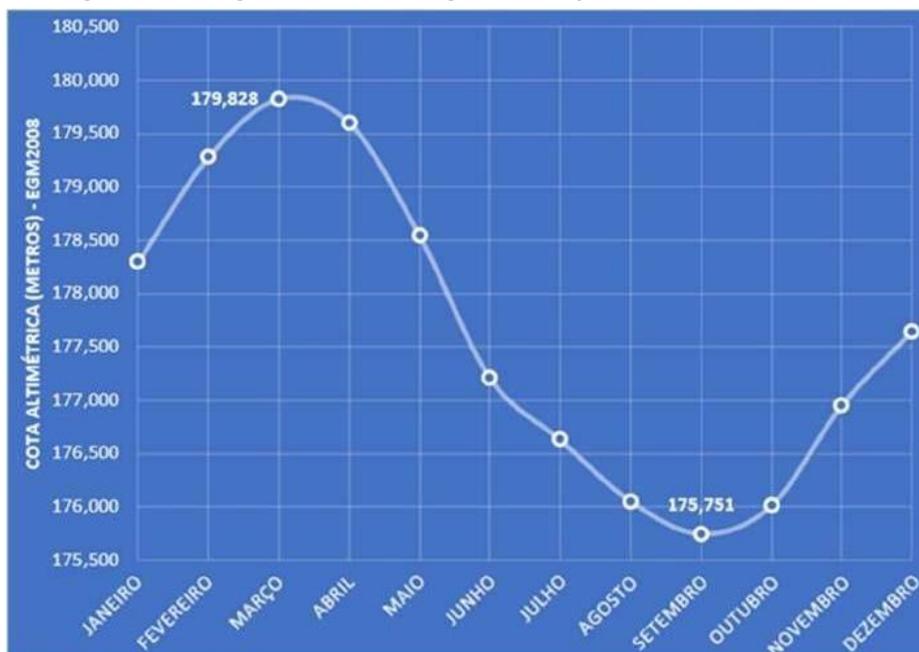
Segundo Silva et al, (2003) os rios são cursos de água que transportam escoamentos concentrados, com superfície livre, alimentados pelas águas advindas de precipitações pluviais ou da contribuição subterrânea. Apresentam a forma mais visível de escoamento superficial da bacia hidrográfica, fazendo parte integrante do ciclo hidrológico. (Chistofolletti, 1981) A vazão é a fundamental grandeza que caracteriza um rio (Villela e Mattos, 1975), e conforme Tucci (2001) sendo variável no tempo e no espaço e tida como estocástica.

Essa variabilidade representada pela subida e descida das águas consideradas no decorrer de um ano (janeiro a dezembro) ou um ano hidrológico (ciclo de vazante-cheia-vazante) corresponde ao regime fluvial ou regime hidrológico do rio. A delimitação dos períodos sazonais é de grande importância para aplicações hidrológicas relacionadas às diferenças hidrodinâmicas e hidromorfológicas estabelecidas nos períodos de cheia e estiagem.

Nas Figura 3 e Figura 4 constam os cotagramas elaborados para cada uma das duas EVs mostradas na Tabela 1, onde seus dados foram analisados de maneira separada, para a delimitação dos períodos sazonais. A caracterização do regime hidrológico do rio Xingu mostra que a cheia se desenvolve por diversos meses, apresenta um regime modal, pois tem somente uma curva, com dois períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano e ascensões (períodos entre a seca e a cheia) e recessões (períodos entre a cheia e a seca) assimétricas.

Na Figura 3 é apresentado de forma clara e definida as características de sazonalidade do rio Xingu, na EV XINGU_2511, onde a enchente ocorre entre os meses de outubro até março, com cota máxima em março no valor de 179,83 m, de forma acelerada, e a vazante ocorrendo entre os meses de abril e setembro, tendo recessão lenta, com cota mínima em setembro, no valor de 175,75 m, tendo como amplitude média de 4,08 m.

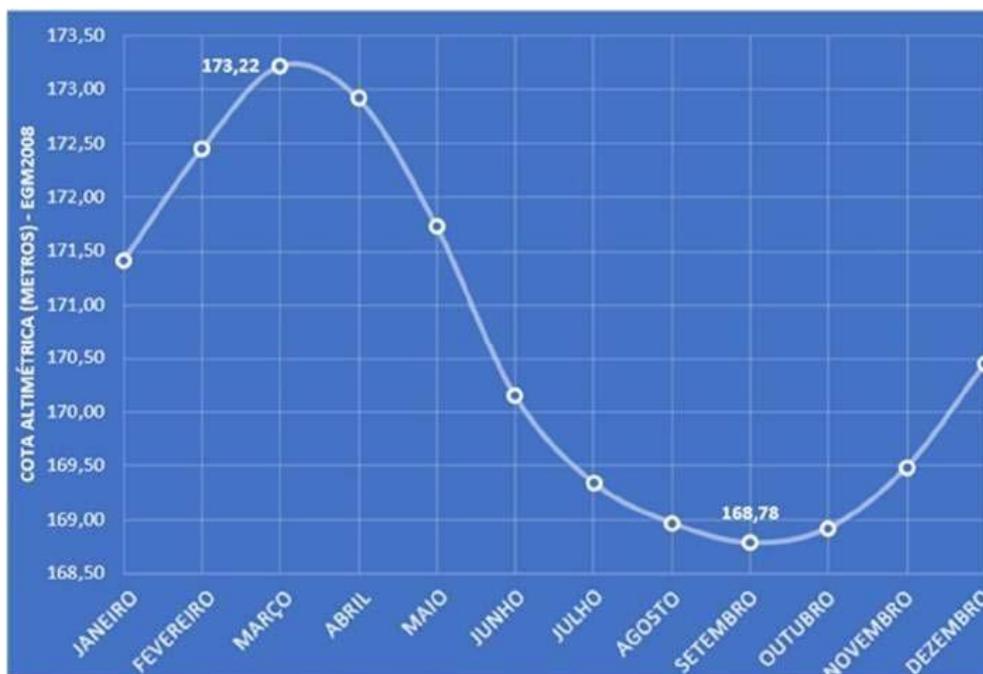
Figura 3: Cotograma do rio Xingu da Estação Virtual XINGU_2511.



Fonte: Próprio autor, 2023

Já na Figura 4, referente a EV XINGU_2509, também é mostrado o regime modal do rio Xingu, onde a enchente ocorre, de forma análoga à anterior, entre os meses de outubro até março, com cota máxima em março, no valor de 173,22 m, de forma acelerada, sendo a vazante entre os meses de abril e setembro, tendo recessão lenta, com cota mínima em setembro, no valor de 168,78 m, tendo como amplitude média de 4,43 m.

Figura 4: Cotograma do rio Xingu da Estação Virtual XINGU_2509 através das cotas altimétricas de 2008-2023 utilizando dados dos satélites Jason-2, Jason-3 e Jason CS-Sentinel 6.



Fonte: Próprio autor, 2023

Por se encontrarem próximas, com distância de 68 km entre elas, os cotogramas das 2 Evs apresentam-se similares, com os mesmos meses de enchente e vazantes e apenas 0,36 m de diferença de amplitudes.

Destaca-se que as informações provenientes da caracterização do regime hidrológico do rio Xingu apresentada nesse trabalho são importantes para utilização na tomada de decisão pelos agentes públicos, como definição da quantidade e qualidade das águas, usos de água, disponibilidade hídrica, eventos hidrológicos críticos, planos de recursos hídricos, regulação e fiscalização dos recursos hídricos e programas voltados a conservação e gestão dos recursos hídricos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo objetivou a caracterização do regime hidrológico com dados altimétricos do satélite Jason-2 Jason-3 e Jason CS/Sentinel 6 na bacia do rio Xingu. Os dados altimétricos apresentados no trabalho mostram o regime hidrológico neste ponto do rio Xingu, que demonstrou regime modal, com dois períodos hidrológicos definidos ao longo do ano, com ascensão e recessão assimétricas. A cheia desenvolve-se a partir do mês de outubro até março com cotas máximas em março, enquanto a vazante entre os meses de abril e setembro, mês em que apresenta cotas mínimas.

A altimetria espacial apresenta-se como uma excelente alternativa para à coleta de dados relacionados as variações do nível de água existentes nos períodos de cheia e vazante, mesmo em regiões de difícil acesso, com poucos dados e/ou com problemas na qualidade dos dados, fato este bastante comum em diversas áreas da Amazônia, dado o seu tamanho semi-continental. Ressaltase que o uso dos dados altimétricos também é apropriado para regiões complexas e rios transfronteiriços.

As séries temporais obtidas serão importantes em estudos futuros, como o nivelamento das estações *in situ*, e para obtenção de perfis de declividades de estiagens e cheias, além de complementar e otimizar a rede básica hidrológica da bacia Amazônica.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – Prof.Água, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°.2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

6. REFERÊNCIAS

ALSDORF, D., RODRIGUEZ, E., LETTENMAIER, D. Measuring surface water from space. *Reviews of Geophysics*, v. 45, n. 2, pp. RG2002. doi: 10.1029/2006RG000197. 2007.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (Brasil). Diagnóstico da outorga de direito de uso de recursos hídricos no Brasil: fiscalização dos usos de recursos hídricos no Brasil. Brasília: ANA, 2007

(Cadernos de recursos hídricos, 4). Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2007/DiagnosticoDaOutorgaDeDireitoDeUso.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2023.

ALIANÇA ÁGUAS AMAZÔNICAS. Xingu. 2023. Disponível em: <http://pt.aguasamazonicas.org/bacias/principais-sub-bacias/xingu/>. Acesso em: 25 jul. 2023.

CALMANT, S.; SEYLER, F. Continental surface waters from satellite altimetry. *Comptes Rendus Geosciences*, v. 338. pp. 1113-1122, 2006.

CPRM SACE (Sistema de alertas Hidrológicos).2023. Bacia do rio Xingu –

Características. Disponível em:
http://www.cprm.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php?getbacia=bamazonasAnteriore s#.
Acesso em: 24 jul. 2023.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia fluvial. São Paulo: Edgard Blucher, 150p. 1981.

GOOGLE EARTH, Google Earth Pro, Versão 9.191.0.0. . Google Inc. 2022.

Disponível em: <https://earth.google.com/web/@-6.14979903,52.51034765,175.01733911a,5612.01252927d,34.99991467y,36.25689181h,0t,0r/d ata=MikKJwolCiExX2tHcHZsNjgwaXg2end5RG9Ma2lONVdOeWtueTltdTMgAQ> Acesso em: 26 jul.2023

MAPS, 2018. Multi-mission Altimetry Processing Software, Versão 2.2, 2018.MORAES, L. F.; CABONGO, O.; POLETO, C. Avaliação da rede de monitoramento de uma bacia hidrográfica do Rio Grande do Sul, Brasil. Acta Brasiliensis, v. 2, n. 2, pp 74-79.doi: <https://doi.org/10.22571/2526-433893>. 2018.

PEREIRA, M. A. F.; BARBIEIRO, B. L.; QUEVEDO, D. M. Importância do monitoramento e disponibilização de dados hidrológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos. Sociedade & Natureza, v.23, n.32, pp.308-320. doi: 10.14393/SN-v32-2020-43458. 2020

SEYLER, F., CALMANT, S., SANTOS DA SILVA, J., FILIZOLA, N., COCHONNEAU, G., BONNET, M. P., COSTI, A. C. Z. Inundation risk in large tropical basins and potential survey from radar altimetry: example in the Amazon basin, Marine Geodesy, v. 32, n. 3, pp. 303-319. doi: 10.1080/01490410903094809. 2009.

SILVA, A. J. P., LOPES, R. C., VASCONCELOS, A. M., BAHIA, R. B. C. Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores. In: L. A. BIZZI, C. SCHOBENHAUS, R. M. VIDOTTI E J. H. GONÇALVES (eds.), Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Brasília: CPRM. 2003.

SILVA, J. S. Altimetria Espacial Em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica: Aplicações Hidrológicas. Sarrebruck: Éditions Universitaires Européennes. 360p. ISBN: 978-613-1-52979-5, 2010.

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, 114(10), 2160-2181. doi: 10.1016/j.rse.2010.04.020. 2010FL. 2010.

SILVA, J. S, CALMANT S., SEYLER, F. Variabilidade espacial do nível de água em eventos extremos da bacia Amazônica observada pelo satélite altimétricos Envisat in: NOBRE C.A. (ED). BORMA L.S (ed.). Secas na Amazônia: causas e consequência São Paulo: Oficina de Texto, pp. 209-242. 2013.

SNIRH - Sistema de alertas Hidrológicos.2023. Sobre o SNIRH. Disponível em:
<https://www.snirh.gov.br/portal/snirh-1/o-que-e> . Acesso em: 25 jul. 2023

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, ABRH. 952p. 2013.

VILLELA, S. M. e MATTOS, A. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245p. 1975.