

Artigo de Pesquisa

**CARACTERIZAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO DO RIO NEGRO
ATRAVÉS DA ALTIMETRIA ESPACIAL****Characterization of the hydrological regime of the negro river using spatial
altimetry**

Maria Elane Garcia Piedade¹, Jeane Ribeiro Rodrigues Assayag², Tierre de Almeida dos Santos³,
Maria Glória Gonçalves de Melo⁴, João D'Anuzio Menezes de Azevedo Filho⁵, Joecila Santos da
Silva⁶.

¹ Universidade do Estado do Amazonas, Centro de Estudos Superiores de Parintins, Parintins, Brasil.
E-mail: megp.mgr23@uea.edu.br

 <https://orcid.org/0009-0007-9431-6928>

² Universidade do Estado do Amazonas, Centro de Estudos Superiores de Parintins, Brasil. E-mail:
jrra.mgr23@uea.edu.br

 <https://orcid.org/0009-0005-4985-9646>

³ Universidade do Estado do Amazonas, Centro de Estudos Superiores de Parintins, Parintins, Brasil.
E-mail: tdads.mgr22@uea.edu.br

 <https://orcid.org/0009-0008-1953-5386>

⁴ Universidade do Estado do Amazonas, Centro de Estudos Superiores de Parintins, Parintins, Brasil.
E-mail: mgmelo@uea.edu.br

 <https://orcid.org/0000-0001-8446-5021>

⁵ Universidade do Estado do Amazonas, Centro de Estudos Superiores de Parintins, Parintins, Brasil.
E-mail: jdazevedo@uea.edu.br

 <https://orcid.org/0000-0002-2373-1261>

⁶ Universidade do Estado do Amazonas, Escola Superior de Tecnologia, Manaus, Brasil. E-mail:
jsdsilva@uea.edu.br

 <https://orcid.org/0000-0003-1005-5083>

Recebido em 19/12/2023 e aceito em 23/02/2024

RESUMO: Com o uso da altimetria espacial é possível monitorar os níveis dos corpos hídricos com alta resolução espacial e temporal. Esta técnica contribui de maneira efetiva na rede de monitoramento hidrológico. A medição de cota e valores de vazão na bacia Amazônica oferece grande desafio técnico e logístico, o que torna a rede de monitoramento hidrológica convencional deficiente em alguns aspectos como na cobertura espacial. O presente estudo contou com a elaboração de sete séries temporais de nível de água no rio Negro e cotogramas utilizando dados do satélite Jason-2, e Jason-3 e Jason-CS/Sentinel-6. O regime hidrológico do rio Negro é caracterizado como multimodal, pois tem um pico de cheia, com ascensão lenta e recessão acelerada. O período de estiagem é de julho a novembro, apresentando com mais frequência, as vazões mínimas nos

meses de outubro e novembro, e um período de cheia suavizado, que abrange de dezembro a julho, onde as vazões máximas são encontradas mais frequentemente nos meses de junho e julho.

Palavras-chave: Satélite; Monitoramento; Recursos Hídricos.

ABSTRACT: With the use of spatial altimetry it is possible to monitor the levels of water bodies with high spatial and temporal resolution. This technique makes an effective contribution to the hydrological monitoring network. The measurement of elevation and flow values in the Amazon basin poses a great technical and logistical challenge, which makes the conventional hydrological monitoring network deficient in some aspects such as spatial coverage. The present study involved the elaboration of 07time series of water level in the Negro River and quotagrams using data from the Jason 2,3 and S6A satellite. The hydrological regime of the Negro River is characterized as a flood mode with slow rise and accelerated recession. a period of drought that begins in July to November, presenting more frequently, the minimum flows in the months of October and November, and a period of softened flood, that covers from December to July, where the maximum flows are found more frequently in the months of June and July.

Keywords: Satellite; Monitoring; Water Resources.

INTRODUÇÃO

A gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas tem sido cada vez mais abordada pelas políticas nacionais e internacionais. Na legislação brasileira, a Lei nº 9.433/97 (Lei das Águas) consolida estes princípios e tem como objetivo assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, tendo em vista o desenvolvimento sustentável, a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, bem como a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrente do uso inadequado dos recursos (BRASIL, 1997). Para garantir que tais objetivos sejam cumpridos, a lei avança ao estabelecer instrumentos de gestão, dentre os quais estão os Planos de Recursos Hídricos, que visam, através de diagnóstico da situação atual e criação de cenários, fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), institucionalizada pela Lei 9.984/2000, sendo a autarquia do governo federal responsável pelo monitoramento, registro de informações hídricas, bem como, a implementação da PNRH no Brasil, criou o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), atendendo o que preconiza a Lei das Águas. Trata-se de um sistema de registro, coleta, edição, armazenamento e recuperação de dados hidrológicos, bem como, fatores intervenientes para sua gestão (ANA, 2023). O banco de dados do SNIRH é alimentado principalmente por estações pluviométricas e fluviométricas operadas pela ANA e por instituições parceiras.

A Bacia Amazônica é a maior bacia hidrográfica do planeta com uma área de drenagem de aproximadamente 6 milhões de km², caracterizada pela sua imensa superfície drenada, apresenta, terrenos baixos e planos junto aos cursos d'água,

possuindo uma grande diversidade de afluentes. Os rios da região Amazônica apresentam leitos de largura extensa, tendo numerosos braços de escoamento da água. Seus eixos fluviais são verdadeiras vias de comunicação humana e corredores de grande importância socioeconômica para a bacia, com parte de suas atividades encontradas, com frequência, exposta às enchentes causadas pelo constante avanço e recuo das águas na região. Durante as cheias, as águas da superfície dos grandes rios entram nos lagos podendo permanecer vários meses, alterando o valor do pico da cheia, que progride lentamente e grandes superfícies são temporariamente inundadas. Em período de vazante, as águas armazenadas são liberadas, aumentando o valor da estiagem. Esses lagos extensos agem como reservatórios naturais afetando o ciclo hidrológico do curso principal do rio Amazonas e dos seus principais afluentes e conseqüentemente o ciclo hidrológico global.

Um dos principais afluentes da bacia hidrografia amazônica é o rio Negro que tem sua origem associada com terrenos de planaltos, produz um comportamento hidrológico marcado inicialmente por um intenso escoamento, que ao se aproximar da região de planície, já em confluência com o rio Branco, sofre modificação pela ampliação da área de escoamento e pelo efeito de confluência com o rio Solimões (INPA, 2012).

Um gerenciamento adequado do potencial hídrico disponível na bacia Amazônica é fundamental para conhecer a sua distribuição espacial e temporal. O estabelecimento de redes de monitoramento é uma das práticas adotadas para aquisição de dados hidrológicos e sua operação é algo que exige um trabalho contínuo de coleta e interpretação de dados, cuja confiabilidade torna-se maior à medida que suas séries históricas ficam mais extensas, envolvendo eventos de cheias e de secas.

Uma ferramenta de grande importância para a aquisição de informações sobre regiões extensas, com complexa variabilidade sazonal e de difícil acesso como a região Amazônica, é o sensoriamento remoto, que possibilita imagear áreas cobertas por nuvens, capacidade de penetração na vegetação, areia, e superfícies com camadas de neve, capacidade de iluminação própria (sensor ativo), possibilitando que o ângulo de iluminação seja controlado e a cobertura obtida em tempos específicos, até mesmo durante a noite, permitindo atingir maior resolução espacial (Jensen, 1986).

A altimetria espacial, inserida nesta área temática, fornecem dados de níveis de água em rios e lagos, com aceitável resolução espacial e temporal (Silva, 2010). A Amazônia é uma região potencial para as aplicações de altimetria por satélites. Seus extensos rios possibilitam grandes faixas de aquisição de dados fluviométricos via sensoriamento remoto. Além disso, a grande contribuição para a gestão dos recursos hídricos é a possibilidade de aquisição de dados em regiões de difícil acesso e pouco monitoradas (Silva *et al.*, 2014).

Neste estudo, busca-se aplicar a técnica de altimetria espacial a fim de caracterizar e analisar a variabilidade espacial e temporal do regime hidrológico do rio Negro

com base em dados altimétricos de nível de água obtidos de estações virtuais utilizando o algoritmo Ice-1 dos satélites Jason-2, Jason-3 e Jason-CS/Sentinel-6.

MATERIAIS E MÉTODOS

O rio Negro é o segundo maior rio em volume de água da bacia Amazônica (Figura 1), possui uma área territorial de 604.138 km². Apresenta uma vazão média anual de 29×10^3 m³/s, a precipitação varia de 3.500 mm/ano perto de sua nascente a 2.137 mm na sua foz. Tem sua origem na Colômbia com o nome de rio Chamusqueni, em seguida recebe a denominação de rio Guainia, para finalmente receber o nome de rio Negro, após receber as águas do canal Cassiquiare. Seus principais afluentes são o rio Branco e o rio Vaupés. Drena a região leste dos Andes na Colômbia e segue a direção geral sudeste até passar por Manaus, onde une-se ao rio Solimões e, a partir dessa união, este último passa a chamar-se rio Amazonas (Figliuolo *et al.*, 2011).

Sua origem, associada com terrenos de planaltos, produz um comportamento hidrológico marcado inicialmente por um intenso escoamento, que ao se aproximar da região de planície, já em confluência com o rio Branco, sofre modificação pela ampliação da área de escoamento e pelo efeito da confluência com o rio Solimões (INPA, 2012).



Figura1. Localização da área de estudo com as estações virtuais do rio Negro. **Fonte:** Mosaico de Imagens do Google Earth em segundo plano (2023).

Dados

Neste estudo, foram empregados dados provenientes dos satélites Jason-2, Jason-3 e Jason S6A, juntamente com o algoritmo padrão de processamento FO Ice-1. A pesquisa abrangeu o período de 2008 a 2023 e teve como foco a utilização de

dados altimétricos. Esses dados foram obtidos da Rede de Monitoramento Altimétrico do Laboratório de Recursos Hídricos e Altimetria Espacial da Amazônia (RHASA), e estão disponíveis na base de dados Hydroweb. A plataforma que abriga esses recursos é a THEIA-CNES, e mais informações podem ser encontradas na Tabela 1 do estudo.

Tabela 01 – Estações virtuais utilizadas no rio Negro.

Nome da Estação Virtual	Latitude (°)	Longitude (°)	Cota Média Mínima (M)	Cota Média Máxima (M)	Amplitude Média (M)	Distância da Foz (km)
Negro_0089_01	1.2651	-66.8746	73,515	79,26	5,745	2593
Negro_0089_02	0.9067	-67.0024	71,48	77,235	5,755	2523
Negro_0089_03	0.0894	-67.2919	63,5	67,995	4,495	2384
Negro_0254_04	-0.2399	-65.8224	33,35	37,27	3,92	2169
Negro_0076_05	-1.0275	-62.6974	18,49	24,24	5,75	1739
Negro_0241_06	-1.3053	-62.1269	16,54	24,3775	7,8375	1662
Negro_0063_07	-3.1636	-59.9459	11,76	21,67	9,91	1295

Fonte: dados oriundos da pesquisa, organizado pelos autores (2023).

Métodos

Elaboração das Estações Virtuais

A criação da estação virtual (EV) é baseada na interseção de uma trajetória do satélite altimétrico com os corpos de água na superfície terrestre, permitindo assim a obtenção de uma série temporal que registra as variações na altura do plano de água ao longo do tempo (Silva, 2010; Calmant e Seyler, 2006). A metodologia empregada para estabelecer essas estações virtuais segue o delineamento descrito por Silva et al. (2010), no qual os dados altimétricos são selecionados por meio do software Multi-mission Altimetry Processing Software (MAPS, 2018) e posteriormente representados em um mosaico de imagem de fundo utilizando o programa Google Earth (Google Earth Pro, 2022).

Além disso, para garantir a consistência das altitudes, foi utilizada a modelagem de ondulação geoidal EGM2008, desenvolvida por Pavlis et al. (2008), para converter as alturas elipsoidais do nível da água em altitudes geoidais.

Caracterização de regime hidrológico

Inicialmente, com o propósito de caracterizar o comportamento do regime hidrológico, procedeu-se à representação gráfica das informações hidrológicas por meio de séries temporais que refletiam as variações na altura da lâmina de água. O intuito era examinar a evolução das cotas altimétricas ao longo dos anos de

observação via satélite, identificando a presença de padrões regulares, estabilidade ao longo do tempo e eventuais anomalias que pudessem se manifestar.

Para construir os cotogramas, elaborou-se gráficos individuais para cada série temporal. Isso foi concretizado mediante o cálculo das médias mensais anuais das cotas altimétricas. Utilizando o Excel, os dados das cotas altimétricas foram organizados de maneira que cada coluna representasse um ano e cada linha correspondesse a um mês. Desse modo, uma matriz de dimensões $12 \times N_a$ (onde N_a é o número de anos registrados) foi criada. A partir de cada linha dessa matriz, a média dos valores foi calculada, o que representou a cota altimétrica média para aquele mês, considerando todos os anos de registro, conforme descrito na Equação 1.

$$C_m = \frac{\sum C}{n_{rd}} \quad (1)$$

Onde:

C_m : cota altimétrica média mensal [m];

C: cota altimétricas do mês [m]; e

n_{rd} : número de registros do mês.

A elaboração do gráfico envolveu a disposição dos meses, representando um período de um ano completo, ao longo do eixo horizontal (abscissas). As cotas altimétricas médias mensais, calculadas a partir de todos os anos registrados, foram representadas ao longo do eixo vertical (ordenadas).

Amplitude da Lâmina de água

A média das amplitudes da superfície da lâmina d'água foi computada de acordo com a Equação 2. Esses resultados foram adquiridos a partir dos dados contidos nos cotogramas e desempenharam um papel essencial na avaliação da variabilidade do regime hidrológico em consideração.

$$\bar{A} = \overline{H_{máx}} - \overline{H_{mín}} \quad (2)$$

Onde:

\bar{A} : amplitude média [m];

$\overline{H_{máx}}$: cota máxima do cotograma [m];

$\overline{H_{mín}}$: cota mínima do cotograma [m].

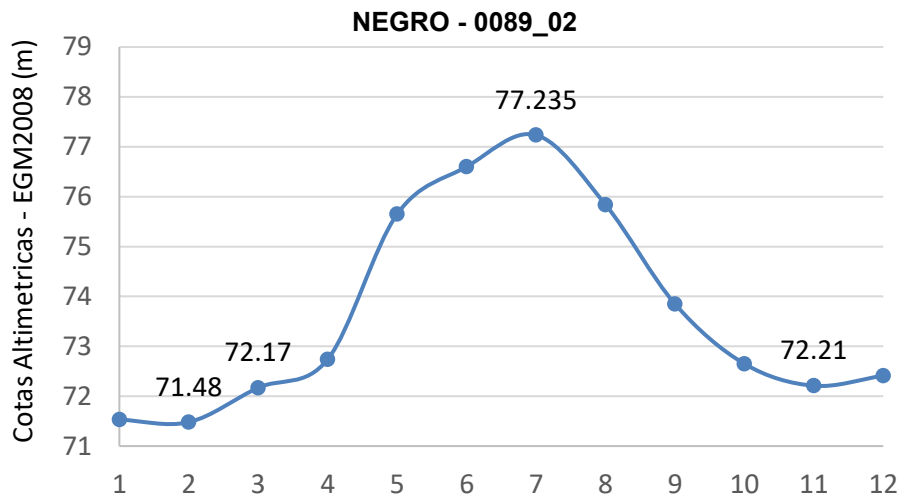
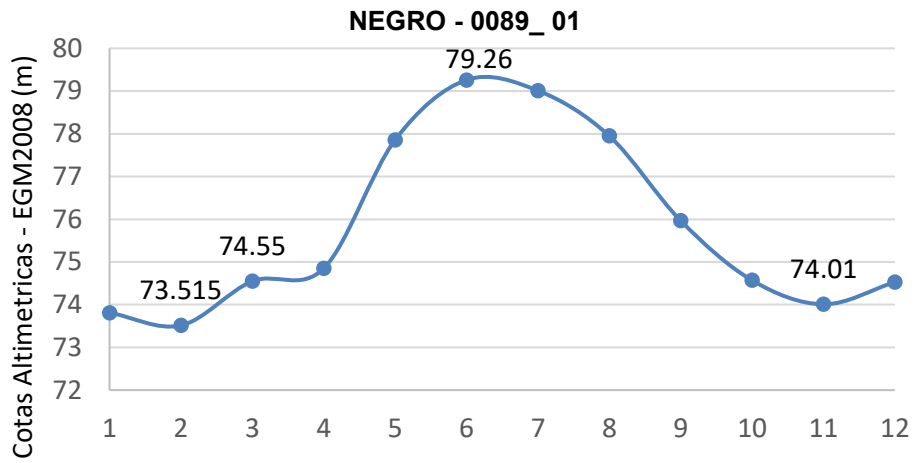
RESULTADOS E DISCUSSÕES

O conjunto das sete estações virtuais teve seus dados analisados, separadamente, para a geração das séries temporais altimétricas. Os gráficos (figuras 2 a 8) foram gerados de maneira que se tornasse possível compreender o comportamento do nível de água ao longo dos anos, de modo a avaliar a sazonalidade durante os 15 anos selecionados para estudo (2008 a 2023). A delimitação dos períodos sazonais é de grande importância para aplicações de metodologias referentes à coleta de informações que estão relacionadas às diferenças hidrodinâmicas e hidromorfológicas estabelecidas nos períodos de cheia e estiagem, sendo responsável por determinar quanto tempo (taxa de renovação ou tempo de residência) uma massa de água permanece em determinado trecho ou, em outras palavras, o tempo de permanência da água em um volume de controle (Braunschweig *et al.*, 2003).

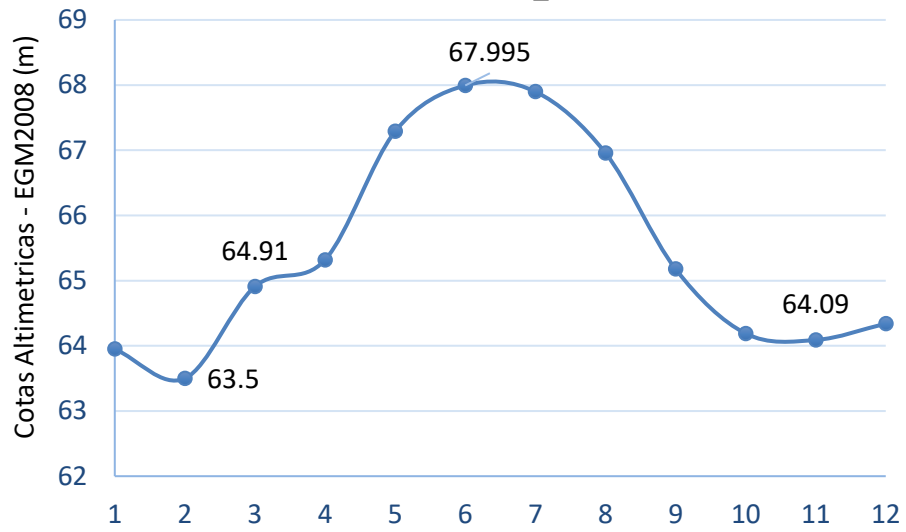
Foi possível observar que o rio Negro apresenta dois períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano, a inundação desenvolve-se sobre vários meses e permanece em sua superfície máxima durante algumas semanas, com ascensões e recessões assimétricas. O período de estiagem que se inicia em julho ou agosto estendendo-se até novembro, apresentando com mais frequência, as cotas mínimas nos meses de outubro e novembro, com valores variando entre 74,01 m a 11,76 m. O período de cheia é suavizado, abrange os meses de dezembro a julho, onde as cotas máximas encontradas mais frequentemente nos meses de junho e julho, apresentando valores de 79,26 m a 21,67 m. Particularmente, pode-se observar que a ascensão dos cotogramas de cheia é mais lenta, frequentemente com um pico de cheia menos acentuado ocorrendo no mês de março, enquanto a recessão aumenta progressivamente na vazante. Essas características particulares possibilitou o surgimento de dois cotogramas bimodais e cinco modais.

O regime hidrológico do rio Negro caracteriza-se por apresentar uma variabilidade significativa da lâmina de água (Tabela 1). Evidencia-se o crescimento da amplitude média em direção à foz, com variação de 3,92 m a 9,91 m. Visto que, com o aumento da área de drenagem, a contribuição combinada dos diversos tributários das margens direita e esquerda e o efeito regulador das zonas de inundação, a oscilação tende a apresentar um leve amortecimento e a amplitude entre os picos de descida e subida torna-se maior.

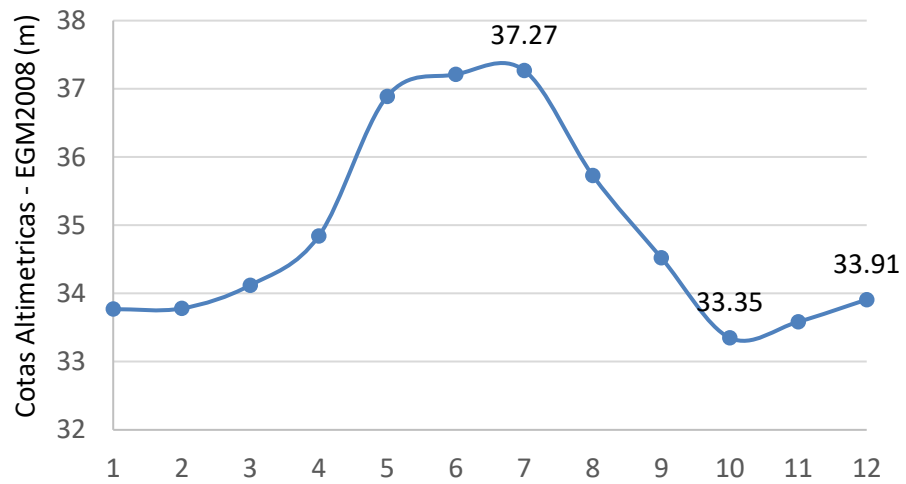
Destaca-se que as informações provenientes da caracterização do regime hidrológico do rio Negro apresentada nesse trabalho são importantes para serem usadas na tomada de decisão pelos agentes públicos em programas voltados a conservação e gestão dos recursos hídricos.

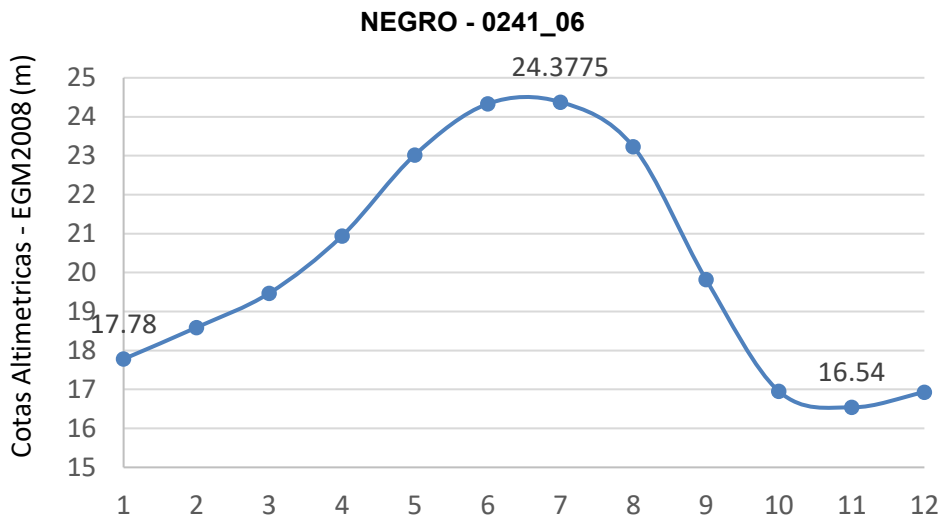
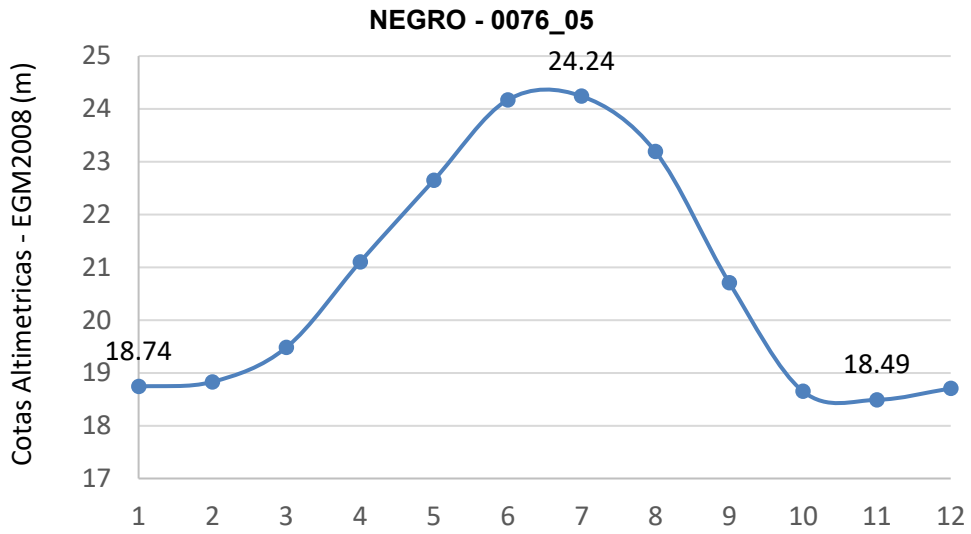


NEGRO - 0089_03



NEGRO - 0254_04





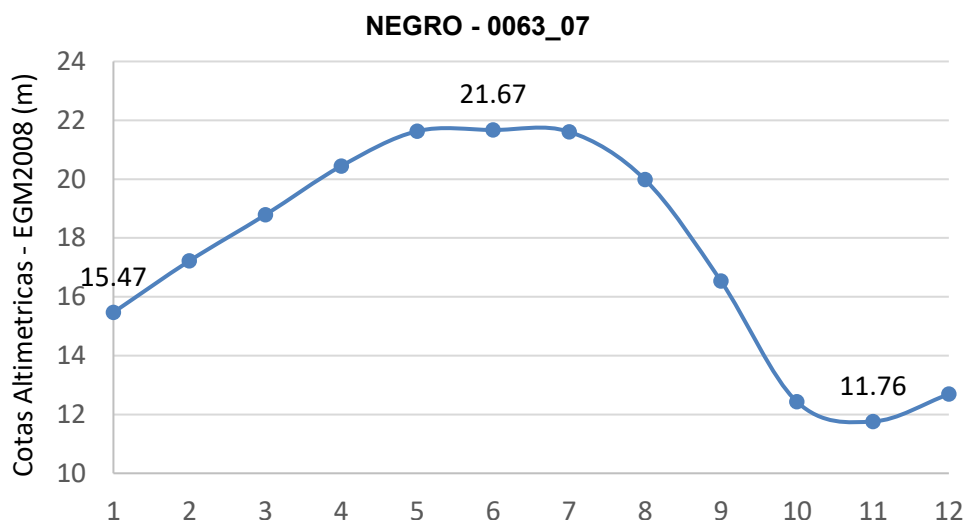


Figura 02 – Cotograma do rio Negro referente ao período de 2008 – 2023 com identificação das cotas mínimas e máximas. **Fonte:** dados obtidos na pesquisa, organizado pelos autores, 2023.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados altimétricos da caracterização do regime hidrológico o rio Negro apresentados mostram um regime hidrológico multimodal, com dois períodos hidrológicos definidos ao longo do ano, com ascensão e recessão assimétricas. A cheia desenvolve-se a partir dos meses de dezembro a julho, onde as cotas máximas encontradas mais frequentemente nos meses de junho e julho, enquanto a vazante inicia-se em julho ou agosto estendendo-se até novembro, apresentando com mais frequência, as cotas mínimas nos meses de outubro e novembro.

O desenvolvimento de estudos hidrológicos sobre as dinâmicas fluviais na bacia Amazônica oferece desafio técnico e logístico. Com a possibilidade da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto como a altimetria espacial, com resolução espacial superior quando comparada com as estações de monitoramento tradicional é possível estudar os corpos hídricos na bacia Amazônica.

A utilização dos dados oriundos dos satélites altimétricos Jason-2 Jason-3 e Jason S6A possibilitou ampliar os conhecimentos sobre o estudo dos níveis de água do rio Negro, assim com suas variações espaciais e sazonais cujas séries temporais podem ser utilizadas 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.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, ao Programa de Mestrado Profissional – ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE N° 2717/2015. À Fundação de Amparo à

Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM pelo apoio financeiro em forma de bolsa e a Universidade do Estado do Amazonas.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Concepção: Maria Elane Garcia Piedade e Joecila Santos da Silva. **Escrita do artigo:** Maria Elane Garcia Piedade. **Análise Formal:** Maria Elane Garcia Piedade e Jeane Rodrigues Ribeiro Assayag. **Metodologia e Pesquisa:** Maria Elane Garcia Piedade e Jeane Rodrigues Ribeiro Assayag. **Preparação de dados:** Tierre Almeida dos Santos. **Revisão:** João D’anúzio de Azevedo Filho e Maria Glória Gonçalves de Melo. **Supervisão:** Joecila Santos da Silva.

REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022:** informe anual/ Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA. 2023. 105p. Disponível em: <file:///C:/Users/joeci/Downloads/Conjuntura%202022.pdf>. Acesso: 11 de agosto de 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Rede Hidrometeorológica da Amazônia.** 2011. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/RHAmazonica.pdf>. Acesso: 29 de maio de 2023.

BRASIL. **Lei 9.443, de 08 de janeiro de 1997.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm. Acesso em: 11 de agosto de 2023.

BRAUNSCHWEIG, F.; MARTINS, F.; NEVES, R.; MARTINS.; PINA, P.; SANTOS, M.; SARAIVA, S. **A importância dos processos físicos no controle da eutrofização em estuários.** INAG –Instituto da Água, 2003.

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

FIGLIUOLO, G. C.; SILVA, J. S.; CALMANT, S.; SEYLER, F. Caracterização da Variabilidade Espacial e Sazonal do Regime Hidrológico da Bacia do Rio Negro com Aplicação de Altimetria Espacial. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió. Maceió: ABRH, 2011.

GOOGLE EARTH PRO. **Google Earth Pro**, versão 7.3.6.9345. Google Inc. 2022.

INPA. **Desvendando as fronteiras do conhecimento na Região Amazônica do Alto Rio Negro.** Manaus-AM: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 2012, 350p.

MAPS. **Multi-mission Altimetry Processing Software**, Versão 2.2, 2018.

PAVLIS, N. K.; HOLMES, S. A.; KENYON, S. C.; FACTOR J. K. **An Earth Gravitational Model to Degree 2160**: EGM2008. Geophysical Research Abstracts. Vol. 10, EGU2008-A-01891. 2008.

PAVLIS, N. K.; HOLMES, S. A.; KENYON, S. C.; FACTOR, J. K. 2012. **An Earth Gravitational Model to Degree 2160**: EGM2008, 2008.

ROUX, E. et al. Producing time-series of river water height by means of satellite RADAR altimetry – Comparison of methods, **Hydrological Sciences Journal/ Journal Des Sciences Hydrologiques**, v. 55, n. 1, p. 104-120. DOI: 10.1080/02626660903529023, 2010.

SILVA, J. S. **Altimetria Espacial em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica: Aplicações Hidrológicas**. Sarrebruck: Éditions Universitaires Européennes, 2010.

SILVA, J. S.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; MOREIRA, D. M.; OLIVEIRA, D.; MONTEIRO, A. Radar Altimetry Aids Managing Gauge Networks. **Water Resources Management**. n. 28, p. 587-603, 2014.



Revista Geonorte, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Amazonas. Manaus-Brasil. Obra licenciada sob Creative Commons Atribuição 3.0