

## **Caracterização do regime hidrológico do rio negro com dados altimétrico fornecidos pelo satélite Sentinel-3A**

**Robson de Souza Maciel Júnior**

Universidade do Estado do Amazonas – Amazonas

**Mateus Ferreira de Oliveira**

Instituto Federal do Amazonas – Amazonas

**Joecila Santos da Silva**

Universidade do Estado do Amazonas – Amazonas

### **RESUMO**

A Bacia Amazônica, a maior do mundo, cobre uma área extensa de cerca de seis milhões de km<sup>2</sup> e se estende por sete países. A Região Hidrográfica Amazônica, dentro do território brasileiro, abrange cerca de 45% do país e inclui sete estados. Um dos principais rios é o rio Negro, o segundo maior afluente do rio Amazonas, com características de águas pretas e extensa área de drenagem. O clima na região é tropical úmido, com precipitação média de 2500 mm/ano e temperaturas médias variando de 26°C a 33°C. Os fenômenos El Niño e La Niña afetam o clima global e provocam eventos extremos na bacia amazônica, como secas e cheias. O El Niño causa secas e incêndios florestais, enquanto a La Niña eleva os índices pluviométricos, resultando em grandes cheias. As secas e cheias são fenômenos críticos que causam desequilíbrios hidrológicos e impactam áreas habitadas e ecossistemas.

**Palavras-chave:** Bacia Amazônica, Região Hidrográfica, Rio Negro.

### **1 INTRODUÇÃO**

A Bacia Amazônica é a maior bacia hidrográfica do mundo, abrangendo uma vasta área de aproximadamente seis milhões km<sup>2</sup> e se estende por sete países: Brasil, Colômbia, Bolívia, Equador, Guiana Peru e Venezuela. A Região Hidrográfica Amazônica está inserida na bacia Amazônica, e se limita ao território brasileiro, ocupando aproximadamente 3.870 mil km<sup>2</sup>, correspondendo a 45% do território nacional e englobando sete estados. Tem como característica a extensa rede hidrográfica, com grande disponibilidade de recursos hídricos (ANA, 2024).

Um dos principais rios dessa bacia é o rio Negro, segundo maior afluente do rio Amazonas, que é um típico rio de águas pretas que flui sobre uma área de até 600.000 km<sup>2</sup>. O clima nesta região é tropical úmido, com precipitação média de 2500 mm/ano e variação de temperatura média de 26 °C no inverno austral e 33 °C no verão austral (FILIZOLA, 1999). O rio Negro apresenta dois picos de vazão distintos durante o período de cheia, um com baixa amplitude, durante os primeiros três meses do ano, e outro, mais intenso, no meio do ano. A vazão média de água do rio Negro é de aproximadamente 30.000 m<sup>3</sup>/s e representa cerca de 14% da vazão total de água doce do rio Amazonas no Oceano (FILIZOLA *et al.*, 2009).



Os fenômenos El Niño/La Niña-Oscilação Sul – ENOS são decorrentes de anomalias na temperatura do Oceano Pacífico e trazem consequências para o clima de todo o mundo, embora de formas diferentes. O fenômeno El Niño é decorrente do aquecimento anormal das águas do Oceano Pacífico, enquanto o fenômeno com características contrárias, batizado de La Niña, do resfriamento das águas do Oceano Pacífico. (SANTOS et al., 2011). Na bacia amazônica esses fenômenos causam eventos extremos (secas e cheias), o El Niño provoca a seca e incêndios florestais (FEARNSIDE, 2009) e a La Niña eleva os índices pluviométricos, o que causa grandes cheias.

As secas se caracterizam por um período suficientemente prolongado, para que a ausência ou fraca distribuição da precipitação provoque grave desequilíbrio hidrológico. Quanto aos fenômenos críticos de cheias, as inundações e enchentes são ocasionadas pela elevação do nível de água de rios, lagos e açudes, acima de sua vazão normal, ocasionando transbordamento em áreas não habitualmente submersas (ANA, 2015).

A ocorrência de eventos extremos tem ocorrido com maior frequência nas últimas décadas, no rio Negro, como as secas que ocorreram em 2005, 2010, 2016 e 2023, além das maiores cheias já registradas em 2009, 2012 e 2021. Em 2005, a seca foi considerada a maior do último século, sendo causada pelas temperaturas elevadas no Atlântico Norte tropical, o que efetivamente desloca os ventos alísios, e toda a umidade que carregam, para o norte, distante da Amazônia, no entanto, este evento seria superado 5 anos depois pela seca de 2010, quando a cota chegou a 13,63 m e novamente superado em 2023, quando atingiu 12,70 m, menor nível já registrado em mais de 120 anos, a qual esvaziou rios importantes da Amazônia e isolou milhares de pessoas em comunidades ribeirinhas, já que os rios são as principais vias de transporte para o interior do estado e, com nível baixo, as embarcações não conseguiam as condições mínimas de navegação, eventos estes que seriam previstos a ocorrência apenas a cada 100 anos (MARENGO *et al.*, 2011). Em 2009, 2012 e 2021 as regiões Centrais e Norte da bacia experimentaram inundações de grande magnitude, registrando em Manaus as três maiores cheias dos últimos 120 anos, cujo valores atingiram 29,77, 29,97 e 30,02 m, em 2009, 2012 e 2021 respectivamente. Estas cheias recordes estiveram associadas ao resfriamento das águas superficiais do Oceano Pacífico, fenômeno conhecido como La Niña, que provocaram chuvas acima do padrão climatológico na parte Sudoeste, Norte e Central da bacia (CPRM, 2009, 2012 e 2021). O evento de cheias do ano de 2021 representou para o estado do Amazonas o maior e mais impactante evento de 3 inundações de toda sua história de monitoramento hidrológico. Dos seus 62 municípios, 57 tiveram situação de emergência reconhecida. Na capital do estado, Manaus, onde os dados de níveis de rio são registrados desde 1902, o nível do rio Negro superou todos os registros anteriores, confirmando 2021 como a maior cheia dos últimos 122 anos na região. (CPRM, 2021).

Tais eventos ocasionam impactos que influenciam não somente na dinâmica do rio e seus afluentes, bem como na diversidade de paisagens e na vida das populações, que são diretamente afetadas com as

alterações de níveis dos rios, tanto nos períodos de seca prolongados quanto nos períodos de cheias atípicas (AGUIAR *et al.*, 2013; SANTOS, 2015).

Um dos componentes hidrológicos rotineiramente considerados no monitoramento dos eventos hidrológicos extremos é a variação do nível de água. O monitoramento desta variável é realizado através de redes de estações hidrométricas e requer uma série de observações *in situ* por um período muito longo, com custos altíssimos de instalação e manutenção (ALSDORF *et al.*, 2007). Na bacia Amazônica o sistema de informações hidrológicas HidroWeb, mantido pela Agência Nacional de Águas – ANA, contém dados de diferentes estações hidrológicas, em território brasileiro (ANA, 2024). Embora tais dados forneçam uma definição temporal densa, a resolução espacial é limitada e a atualização desse sistema pode levar de 6 a 12 meses. Diversas iniciativas têm sido efetivadas em busca de avanços para prover informações hidrológicas em bacias sem monitoramento fluviométrico ou pouco monitoradas, como a intensificação da utilização de dados hidrológicos estimados a partir de sensores remotos, embarcados em satélites. Inserida nesta área temática, a altimetria espacial fornece dados de níveis de água em rios e lagos, com aceitável resolução espacial e temporal (SILVA, 2010). Os extensos rios da bacia Amazônica possibilitam grandes faixas de aquisição de dados fluviométricos via sensoriamento remoto. As aplicações de altimetria por satélites nessa região, apresenta grande contribuição para a gestão dos recursos hídricos e a possibilidade de aquisição de dados em regiões de difícil acesso e pouco monitoradas (SILVA *et al.*, 2014).

## 2 OBJETIVO

Este estudo busca aplicar a técnica de altimetria espacial, utilizando o satélite altimétrico Sentinel-3A a fim de caracterizar e analisar a variabilidade espacial e sazonal do regime hidrológico do rio Negro, com base em dados altimétricos de nível de água, obtidos através, de estações virtuais, cujo período de funcionamento se estende de 2016 a 2023, com tempo de revisita de 27 dias e 1338 ciclos temporais.

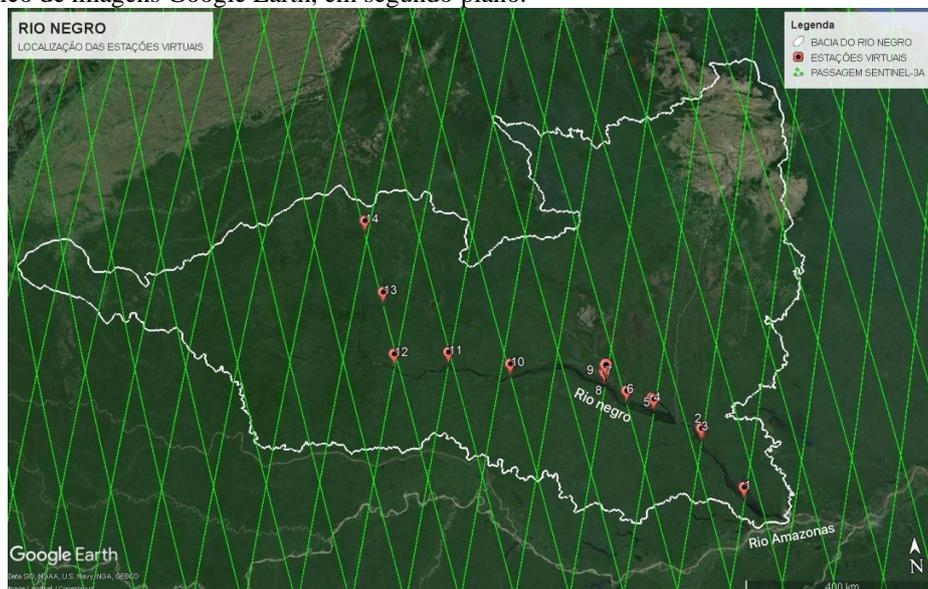
## 3 METODOLOGIA

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O Rio Negro é um rio de águas transfronteiriças se estende entre as coordenadas 73°25'W a 5°4'N e 59°35'W a 3°35'S, atravessando a Colômbia (10%), Venezuela (6%), Guiana (2%) e o Brasil (82%) (LATUBRESSE *et al.*, 2005; FRAPPART *et al.* 2008). Tem sua origem na Colômbia com o nome de rio Chamusiqueni, em seguida recebe a denominação de rio Guainia, e após a confluência com o rio Cassiquiare, receber o nome de rio Negro. Seus principais afluentes são o rio Branco e o rio Vaupés. Drena a região leste dos Andes na Colômbia e segue a direção sudeste até desaguar no rio Amazonas (Figliuolo *et al.*, 2011). Conforme Liebmann e Marengo (2001), na bacia do rio Negro a taxa de precipitação média anual

possui variação de mais de 50%, com valores entre 2000 e 2500 mm/ano nas proximidades de Manaus e cerca de 3000 mm/ano no Noroeste (Figura 1).

Figura 1 — Localização da bacia do rio Negro com as estações virtuais em círculos vermelhos, traços do satélite Sentinel-3A em linhas verdes. Mosaico de imagens Google Earth, em segundo plano.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2024.

### 3.2 DADOS ALTIMÉTRICOS

Foram utilizados os dados dos satélites altimétricos Sentinel 3A, compreendendo os períodos de junho de 2016 a dezembro de 2023, empregando o algoritmo standard de tratamento de FO Ice-1 e o modelo de ondulação geoidal EGM2008, desenvolvido por Pavlis *et al.* (2008).

Os dados altimétricos adotados fazem parte da Rede de Monitoramento Altimétrico do Laboratório RHASA e encontram-se disponíveis na base de dados Hydroweb, da plataforma THEIA-CNES (<https://hydroweb.next.theia-land.fr/>).

### 3.3 DOWNLOAD DOS DADOS ALTIMÉTRICOS DA PLATAFORMA THEIA-CNES

Uma Estação Virtual (EV) é determinada a partir do cruzamento entre as órbitas do satélite sobre a superfície de um corpo d'água, com viabilidade para aquisição de série temporal da altura do nível d'água (SILVA, 2010; CALMANT et al, 2006). Na base de dados Hydroweb é possível filtrar os dados e selecioná-los por bacia, rio ou lago. Extraíram-se 14 estações, totalizando 1338 ciclos, referentes ao período que compreendem 06/2016 a 12/2023.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DO REGIME HIDROLÓGICO

Com o intuito de caracterizar o comportamento do regime hidrológico, procedeu-se à representação gráfica das informações hidrológicas por meio de séries temporais, no software Excel 365, que refletiam as variações na altura da lâmina de água. O objetivo era analisar as cotas altimétricas ao longo dos anos, identificando a presença de padrões regulares, estabilidade ao longo do tempo e eventuais anomalias que pudessem se manifestar. Elaborou-se cotogramas individuais para cada série temporal. Isso foi concretizado mediante o cálculo das médias mensais anuais das cotas altimétricas conforme a metodologia proposta por Bittencourt e Amadio (2007).

Obtiveram-se ainda valores de amplitude média da superfície da água calculados conforme a Equação 1. Estes resultados foram obtidos com base nos dados dos cotogramas, sendo utilizados na avaliação da variabilidade do regime hidrológico em questão.

$$\bar{A} = \overline{H_{m\acute{a}x}} - \overline{H_{m\acute{i}n}} \quad (1)$$

onde  $\bar{A}$  é a amplitude média,  $\overline{H_{m\acute{a}x}}$  a cota máxima do cotograma e  $\overline{H_{m\acute{i}n}}$  a cota mínima do cotograma.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Os dados altimétricos procedentes do satélite Sentinel-3A resultaram do conjunto de 14 estações virtuais (EVs), listadas e descritas na Tabela 1 juntamente com suas respectivas cotas máximas e mínimas e amplitude e ilustradas na Figura 1.

Pode-se observar na Tabela 1 e na Figura 2 que à medida que o curso do rio se aproxima da foz, há um aumento dos valores da amplitude média, onde a estação virtual NEGRO\_SA32\_263\_01, distante 2532 km da foz, tem amplitude de 5,59 m, enquanto a estação, NEGRO\_SA32\_676\_01, distante 1404 km da foz, tem amplitude de 10,94 m.

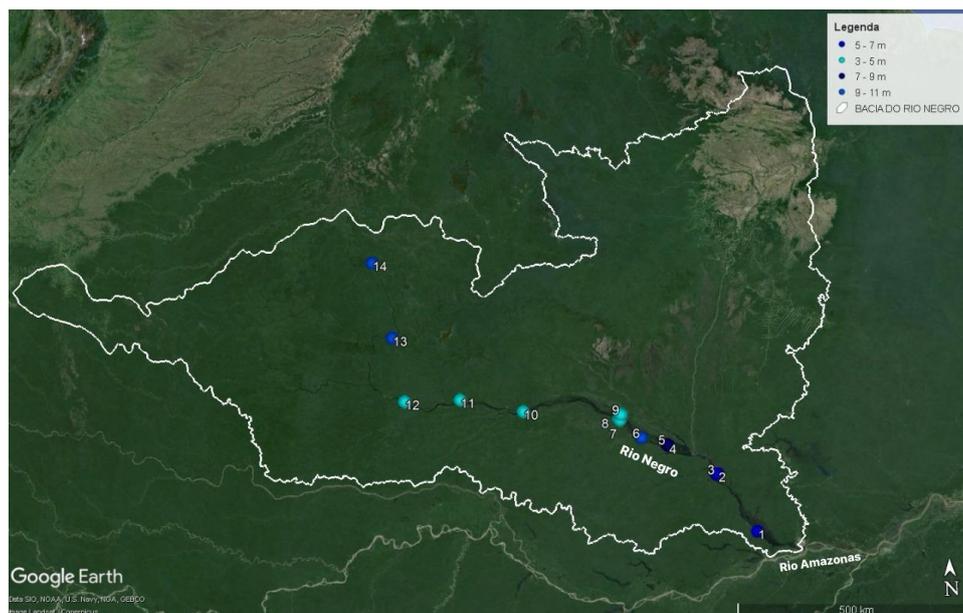
Os cotogramas elaborados para cada EV estão ilustrados na Figura 3, eles foram gerados intencionando analisar a variabilidade do nível de água ao longo do ano, procurando avaliar a sazonalidade no intervalo de atividade do Sentinel-3A, entre os anos de 20168 e 2023.

Tabela 1 – Discriminação das estações virtuais, com os valores de cota máxima, mínima e amplitude.

| Número da Estação Virtual | Nome da Estação virtual | Latitude (°) | Longitude (°) | Total de ciclos | Cota máxima (m) | Cota mínima (m) | Amplitude (m) | Distância da foz (km) |
|---------------------------|-------------------------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------------|
| 1                         | NEGRO_S3A_676_01        | -2.794094°   | -60.761611°   | 102             | 22,12           | 11,18           | 10,94         | 1404                  |
| 2                         | NEGRO_S3A_562_01        | -1.735400°   | -61.430108°   | 100             | 23,39           | 13,87           | 09,52         | 1556                  |
| 3                         | NEGRO_S3A_562_02        | -1.739208°   | -61.463108°   | 65              | 23,49           | 12,79           | 10,70         | 1566                  |
| 4                         | NEGRO_S3A_488_01        | -1.198606°   | -62.271108°   | 102             | 24,32           | 17,08           | 07,29         | 1682                  |
| 5                         | NEGRO_S3A_488_01        | -1.172906°   | -62.304406°   | 99              | 24,27           | 17,12           | 07,15         | 1687                  |
| 6                         | NEGRO_S3A_719_02        | -1.034303°   | -62.737906°   | 101             | 24,13           | 18,28           | 05,85         | 1744                  |
| 7                         | NEGRO_S3A_334_03        | -0.709508°   | -63.097900°   | 105             | 24,72           | 20,20           | 04,52         | 1807                  |
| 8                         | NEGRO_S3A_334_02        | -0.693700°   | -63.119100°   | 74              | 25,15           | 20,23           | 04,93         | 1810                  |
| 9                         | NEGRO_S3A_334_01        | -0.614525°   | -63.076806°   | 105             | 24,87           | 20,26           | 04,62         | 1815                  |
| 10                        | NEGRO_S3A_491_01        | -0.482606°   | -64.735108°   | 98              | 31,61           | 28,28           | 03,32         | 2023                  |
| 11                        | NEGRO_S3A_762_01        | -0.235003°   | -65.797603°   | 99              | 37,18           | 33,03           | 04,15         | 2166                  |
| 12                        | NEGRO_S3A_648_01        | -0.224306°   | -66.740100°   | 93              | 43,79           | 39,28           | 04,51         | 2295                  |
| 13                        | NEGRO_S3A_263_01        | 0.871894°    | -66.898906°   | 100             | 77,22           | 71,63           | 05,59         | 2536                  |
| 14                        | NEGRO_S3A_263_02        | 2.171897°    | -67.186400°   | 95              | 83,69           | 77,15           | 06,54         | 2717                  |

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2024.

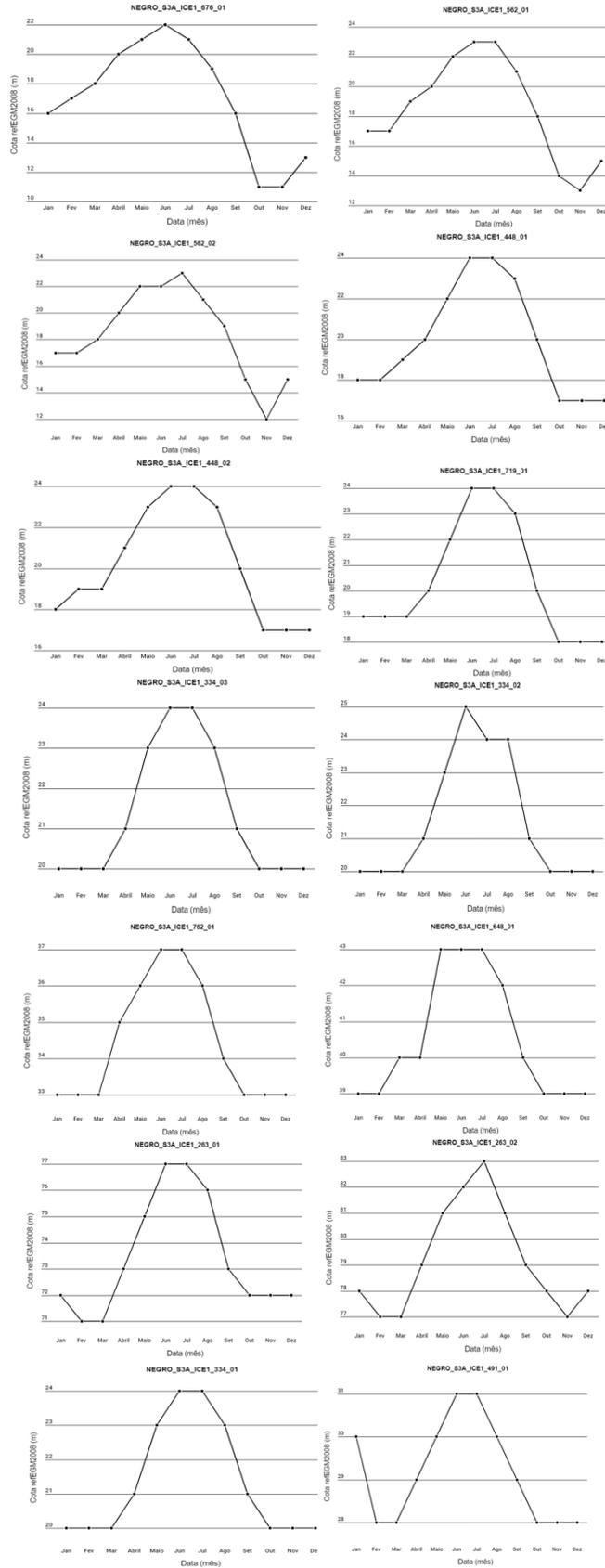
Figura 2 – Variação da amplitude da lâmina de água no rio Negro, em azul. Mosaico de imagens Google Earth, em segundo plano.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2024.



Figura 3 – Cotogramas das estações virtuais do rio Negro com identificação das cotas.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2024.



Na Figura 3 pode-se identificar que o rio Negro apresenta dois períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano: (i) um período de vazante que se inicia em julho podendo se estender até fevereiro, apresentando regularmente as cotas mínimas no mês de outubro; e (ii) um período de cheia, que abrange de fevereiro a julho, onde as vazões máximas são encontradas com maior frequência no mês de junho. Estes valores de mínimo e máximo corroboram com Silva *et al.* (2011) que comentam que para o regime hidrológico equatorial a inundação ocorre durante o período compreendido entre os meses de abril a junho e que a estiagem ocorre durante os meses de setembro a novembro. Comprovando os resultados que foram mostrados acima, o Boletim Hidrometeorológico n.25 da CPRM (2021) aponta que o rio Negro, em Manaus, apresenta um hidrograma em que em 75% dos anos da série histórica a cota máxima ocorreu no mês de junho, tendendo a iniciar seu processo de vazante, após esse período, até atingir a cota mínima.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste estudo, analisaram-se 14 estações virtuais provenientes de dados altimétricos da missão Sentinel-3A, utilizando-se o algoritmo de tratamento de FO Ice-1. Esta investigação possibilitou caracterizar que o rio Negro apresenta regime hidrológico modal, com dois períodos hidrológicos definidos ao longo do ano, com ascensões e recessões assimétricas ao longo do rio. Foi possível evidenciar os períodos de cheias e vazantes, além dos níveis máximos e mínimos do rio durante um período de seis anos e meio, cujos valores ocorrem com maior frequência nos meses de junho e outubro, respectivamente.

Sabe-se ainda que os dados altimétricos são liberados após a passagem do satélite, contribuindo para a caracterização quali-quantitativa das bacias hidrológicas na região Amazônica, visto que por ser uma região predominantemente de transporte fluvial, a atualização do sistema de monitoramento tradicional pode levar de 6 a 12 meses. É nesse contexto que as estações virtuais podem ser utilizadas como redes de monitoramento e mesmo que a missão Sentinel-3A não sejam tão densas quanto outras, elas possuem amostragens temporais a cada 27 dias, permitindo que sejam mensuradas as cotas em zonas ainda não instrumentadas tradicionalmente e de difícil acesso, bem como em áreas exteriores ao território brasileiro, complementando e otimizando a rede de estudos hidrológicos.



## REFERÊNCIAS

- ALSDORF, D. et al. (2007). Measuring surface water from space. *Reviews of Geophysics*, n. 45, v.2, pp. RG2002, doi: 10.1029/2006RG000197.
- ANA. Agência Nacional De Águas (2024). *Base de Dados Hidrológicos*. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/regioeshidrograficas2014.pdf>> . Acesso em: 28 fev. 2024.
- CALMANT, S.; SEYLER, F. Continental surface waters from satellite altimetry. *Comptes Rendus Geosciences*, v. 338. pp. 1113-1122, 2006
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2009). Relatório da cheia de 2009. CPRM, Manaus, AM. 23pp. Disponível em: <[https://www.cprm.gov.br/sace/rehi/manaus/rel\\_final\\_2009.pdf](https://www.cprm.gov.br/sace/rehi/manaus/rel_final_2009.pdf)>. Acesso em 29 fev. 2024.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2012). Relatório da cheia de 2012. CPRM, Manaus, AM. 21pp. Disponível em: <[https://www.cprm.gov.br/sace/rehi/manaus/rel\\_final\\_2012.pdf](https://www.cprm.gov.br/sace/rehi/manaus/rel_final_2012.pdf)>. Acesso 29 fev. 2024.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2021). Sistema de Alerta Hidrológico do Amazonas: relatório técnico de operação do ano de 2021. CPRM, Manaus, AM. 32pp. Disponível em: <[https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/22533/4/relatorio\\_SAH\\_Amazonas\\_%202021.pdf](https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/22533/4/relatorio_SAH_Amazonas_%202021.pdf)> . Acesso em: 29 fev. 2024.
- FEARNSIDE, P. M. Global warming in Amazonia: Impacts and Mitigation. *Acta Amazônica*. v. 39, n.4, p.1003 – 1012, 2009.
- 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.
- FILIZOLA, N. P. *O fluxo de sedimentos em suspensão nos Rios da bacia Amazônica*. ANEEL, Brasília, 1999.
- FRAPPART, F.; PAPA, F.; FAMIGLIETTI, J. S.; PRIGENT, C.; ROOSSOW, W. B.; SEYLER, F. Interannual variations of river water storage from a multiple satellite approach: A case study for the Rio Negro River basin. *Journal Geophysical Research*, v. 113, 2008.
- GOOGLE EARTH PRO. Google Earth Pro, versão 7.3.6.9750. Google Inc. 2024.
- LATRUBESSE, E. M., STEVAUX, J. C., SINHA, R. Tropical rivers. *Geomorphology*, v. 70, p.187– 206, 2005.
- MARENGO, J. A.; BETTS, R. *Riscos das mudanças climáticas no Brasil: análise conjunta Brasil - Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia*. Brasil/Reino Unido: INPE – CCST (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro de Ciência do Sistema Terrestre) / Met Office Hadley Centre, 2011.
- SILVA, J. S. *Altimetria Espacial Aplicada aos Estudos de Processos Hídricos em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica*. 2010. 279p. Tese (Doutorado em Ciências), UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 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.