

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DA ELEVAÇÃO DE ÁGUA SUPERFICIAL DE PRODUTOS DO SATÉLITE SWOT EM RESERVATÓRIOS DE PERNAMBUCO

Jonas Felipe Santos de Souza¹; Mayara Silva de Oliveira² & Alfredo Ribeiro Neto³

Abstract: Water level monitoring is crucial for water resource management and addressing the challenges of climate change. The new Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission provides unprecedented spatial and temporal resolution estimates of water surface elevation (WSE) for water bodies worldwide. This study evaluated the accuracy of WSE SWOT estimates over a set of nine reservoirs located in the Pernambuco state. The L2_HR_LakeSP Prior SWOT products were evaluated after systematic error correction, comparing the WSE SWOT measurements with in-situ water level monitoring time series from August 2023 to March 2025. The results showed that the WSE SWOT time series obtained a good fit to the in-situ water level monitoring, with some reservoirs achieving a high Pearson's r correlation coefficient, greater than 0.99. On the other hand, in some cases, WSE SWOT data have difficulty to represent properly the in-situ time series. Satellite measurement errors may be due to instrumental, atmospheric, and geophysical factors. Overall, the SWOT satellite has demonstrated the ability to monitor water levels in reservoirs with high accuracy.

Keywords – SWOT satellite; water level; monitoring.

Resumo: O monitoramento dos níveis de água é crucial para a gestão dos recursos hídricos e para o enfrentamento dos desafios das mudanças climáticas. A nova missão de Topografia Oceânica e de Águas Superficiais (SWOT) fornece estimativas de resolução espacial e temporal sem precedentes da elevação da superfície da água (WSE) de corpos hídricos em todo o mundo. Este estudo avaliou a precisão das estimativas WSE SWOT sobre um conjunto de nove reservatórios localizados no estado de Pernambuco. Os produtos SWOT L2_HR_LakeSP Prior foram avaliados após a correção de erros sistemáticos, comparando as medições WSE SWOT com séries temporais de nível de água de monitoramento *in situ* no período de agosto de 2023 a março de 2025. Os resultados mostraram que as séries temporais WSE SWOT obtiveram um bom ajuste aos níveis de água de monitoramento *in situ*, com alguns reservatórios alcançando um coeficiente de correlação Pearson r alto, maior que 0,99. Por outro lado, em alguns casos, os dados WSE SWOT apresentam dificuldade em representar de maneira adequada as séries temporais *in situ*. Os erros de medição do satélite podem ser decorrentes de fatores instrumentais, atmosféricos e geofísicos. No geral, o satélite SWOT demonstrou a capacidade de monitorar o nível de água em reservatórios com alta precisão.

Palavras-Chave – Satélite SWOT; nível de água; monitoramento.

1) Doutorando em Recursos Hídricos pelo PPGEC-UFPE, rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE; jonas.ssouza@ufpe.br

2) Doutoranda em Recursos Hídricos pelo PPGEC-UFPE, rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE;

mayara.oliveira@ufpe.br

3) Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UFPE, rua Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, Recife-PE; alfredo.ribeiro@ufpe.br

INTRODUÇÃO

Impactado por atividades humanas e mudanças no clima, os corpos d'água estão sujeitos a eventos extremos, como cheias e secas. Desse modo, o monitoramento consistente dos níveis de água de lagos e reservatórios é essencial para o entendimento da dinâmica hidrológica, a gestão de recursos hídricos e a previsão dos desafios e impactos das alterações climáticas (Søndergaard; Jeppesen, 2007; Woolwal *et al.*, 2020). Aumentar a capacidade de monitoramento da elevação da superfície de água e acompanhar de forma abrangente suas mudanças de nível em rios e lagos tem importância fundamental para a previsão e controle de enchentes e a mitigação dos impactos causados (Alsdorf *et al.*, 2007).

Sistemas convencionais de monitoramento hidrológico fazem uso de medições *in situ* e, desse modo, dependem de redes de medição de chuva, vazão e nível de água. Entretanto, embora o monitoramento *in situ* da elevação de água por meio de estações hidrométricas forneçam as informações mais confiáveis, apenas um número reduzido de lagos e reservatórios são equipados por estações convencionais para monitoramento devido ao alto custo de instalação, manutenção e operação (Pavelsky *et al.*, 2014; Shu *et al.*, 2021).

O sensoriamento remoto surge então como uma alternativa ao fornecimento de informações da extensão e elevação do nível da água, com resolução espacial e frequência temporal apropriadas. Para estimar a mudança no armazenamento dos lagos, as mudanças na elevação e na área de superfície da água devem ser conhecidas. Diversas técnicas foram desenvolvidas que combinam imagens de sensores de radar e/ou ópticos com medições de radares altimétricos para estimar a mudança no armazenamento de água (Gao *et al.*, 2012; Duan; Bastiaanssen, 2013; Bacalhau *et al.*, 2022).

A missão *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), uma colaboração entre as agências espaciais dos Estados Unidos (NASA) e França (CNES), lançada em dezembro de 2022, mostrou grande potencial para o monitoramento de lagos e reservatórios, uma vez que é o primeiro satélite capaz de fornecer estimativas de área e elevação de água superficial simultaneamente, com ciclo de repetição de aproximadamente 21 dias (Biancamaria *et al.*, 2016). Até o lançamento do satélite SWOT, os estudos focaram apenas em estimar a sua precisão e por meio de simuladores hidrológicos que emulam o tipo de dado esperado. Entretanto, mesmo que os diversos estudos prévios atestem o grande potencial do SWOT, uma quantidade limitada de estudos divulgados avaliou os produtos obtidos diretamente do satélite. Em função disso, este estudo tem como objetivo fazer uma avaliação dos dados de elevação de superfície de água lançados pelo satélite SWOT aplicados em reservatórios no estado de Pernambuco.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

Foram selecionados 9 reservatórios localizados nas regiões Agreste, Zona da Mata e Litoral do estado de Pernambuco. Essa região possui uma área estimada em 35.000 km^2 . O clima nessa região é assinalado por irregularidades espaciais e temporais no regime de chuvas, com os valores de precipitação anual indo de 800 mm no Agreste até 2200 mm no Litoral e Zona da Mata. Além disso, a região é caracterizada por eventos extremos, de modo que, historicamente, municípios do Agreste decretaram emergência decorrentes de longos períodos de seca, ao mesmo tempo em que no Litoral e Zona da Mata, municípios decretaram emergência por excesso de chuva e inundações (PERH-PE, 2022). A área de interesse e a distribuição geográfica dos reservatórios selecionados em Pernambuco

são mostradas na Figura 1. A Tabela 1 apresenta as características dos reservatórios, com indicação dos volumes mínimo e máximo observados no período jan/2023–mar/2025. Como pode ser visto, as capacidades máximas dos reservatórios atingidas variam de 1 hm^3 (10^6 m^3) a 146 hm^3 (10^6 m^3).

Figura 1 – Localização da região de interesse e distribuição espacial dos reservatórios analisados.

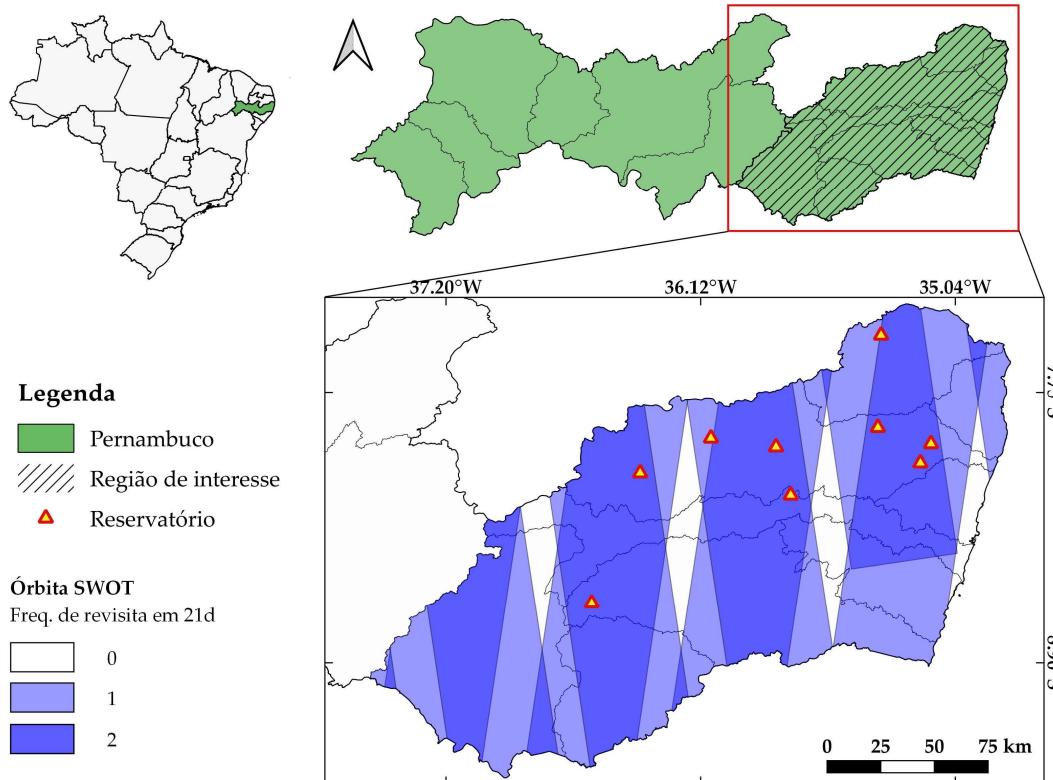


Tabela 1 – Características dos reservatórios, com indicação dos volumes mínimo e máximo observado no período jan/2023–mar/2025.

Reservatório	Rio	Capacidade máxima (10^6 m^3)	Volume mínimo observado (10^6 m^3)	Volume máximo observado (10^6 m^3)
Carpina	Capibaribe	255,37	73,31	146,86
Tapacurá	Tapacurá	104,87	73,37	122,25
Goitá	Goitá	52,53	0,76	36,66
Jucazinho	Capibaribe	204,82	7,57	31,76
Tiúma	Tiúma	6,40	3,72	6,29
Gurjão	Una	3,85	1,37	3,77
Mateus Vieira	Riacho da Bica	2,75	0,21	2,12
Manuino	Ipojuca	2,02	1,08	1,74
Oitis	Laranjeiras	3,40	0,09	0,99

Dados utilizados

Os dados científicos do instrumento de medição KaRIn são divididos nas categorias Level 1B e Level 2. Para este estudo, foram selecionados os produtos L2_HR_LakeSP de Level 2, visto que são de alta resolução processados a partir dos produtos L2_HR_PIXC para gerar os parâmetros físicos específicos de lagos (CNES, 2025). O produto L2_HR_LakeSP inclui três subprodutos: (1) lagos baseados em observações (*Obs*); (2) lagos baseados em bancos de dados anteriores (*Prior*); e (3) lagos com características não atribuídas (*Unassigned*). Para o propósito deste trabalho, foram selecionados apenas os produtos L2_HR_LakeSP Prior, visto que os reservatórios analisados compõem o inventário desse subproduto. As séries temporais de elevação de água superficial (WSE – do inglês *water surface elevation*) SWOT dos reservatórios foram obtidas da base de dados Earthdata (<https://search.earthdata.nasa.gov/>) da NASA no período ago/2023–mar/2025. Os valores WSE correspondem à distância entre a superfície da água e uma da superfície de referência (geoide ou elipsoide).

Para a avaliação dos dados WSE SWOT foram utilizadas séries históricas de monitoramento *in situ* obtidas do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (<https://www.ana.gov.br/sar/>).

Remoção de erros sistemáticos

Os valores WSE obtidos dos produtos SWOT são convertidos da altura elipsoidal WGS84 para altura ortométrica usando o modelo de geoide EGM2008, enquanto a referência de medição dos dados *in situ* provenientes da ANA podem usar diferentes sistemas de referência de nível. Devido às diferenças na definição das superfícies de referência entre os modelos de geoide global e as referências de elevação regionais, as anomalias de elevação dos dois tipos de dado (WSE SWOT e *in situ*) podem levar a vieses sistemáticos. Neste estudo, as medições de elevação de água *in situ* foram usadas como séries temporais de referência. Os erros sistemáticos entre as medições WSE SWOT e *in situ* foram corrigidas de acordo com as Equações 1 e 2 (Siddique-E-Akbor *et al.*, 2011; Birkett; Beckley, 2010):

$$\Delta h = \bar{X} - \bar{WSE} \quad (1)$$

$$Y_i = WSE_i + \Delta h \quad (2)$$

onde Δh é o erro sistemático, \bar{X} é o valor médio da amostra da série temporal *in situ*, \bar{WSE} é o valor médio da série temporal WSE SWOT e Y_i refere-se ao nível de água corrigido.

Métricas de avaliação

Esse estudo avaliou a precisão dos valores WSE SWOT usando quatro métricas de avaliação: Coeficiente de correlação Pearson r (Equação 3), Erro Médio Absoluto (MAE – do inglês *Mean Absolute Error*, Equação 4), raiz do erro quadrático médio (RMSE – do inglês *Root Mean Squared Error*, Equação 5) e erro percentual absoluto médio (MAPE – do inglês *Mean Absolute Percentage Error*, Equação 6).

$$r = \frac{\rho X_{ref} X}{\rho X_{ref} \rho X} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_{ref,i} - X_i| \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ref,i} - X_i)^2} \quad (5)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_{ref,i} - X_i}{X_i} \right| \quad (6)$$

onde X_{ref} e X são os valores de elevação de água observados por medições *in situ* e calculados pelo SWOT, respectivamente, $\rho X_{ref} X$ é a covariância entre os valores observados e calculados, $\rho X_{ref} \rho X$ é o desvio padrão dos valores observados e calculados.

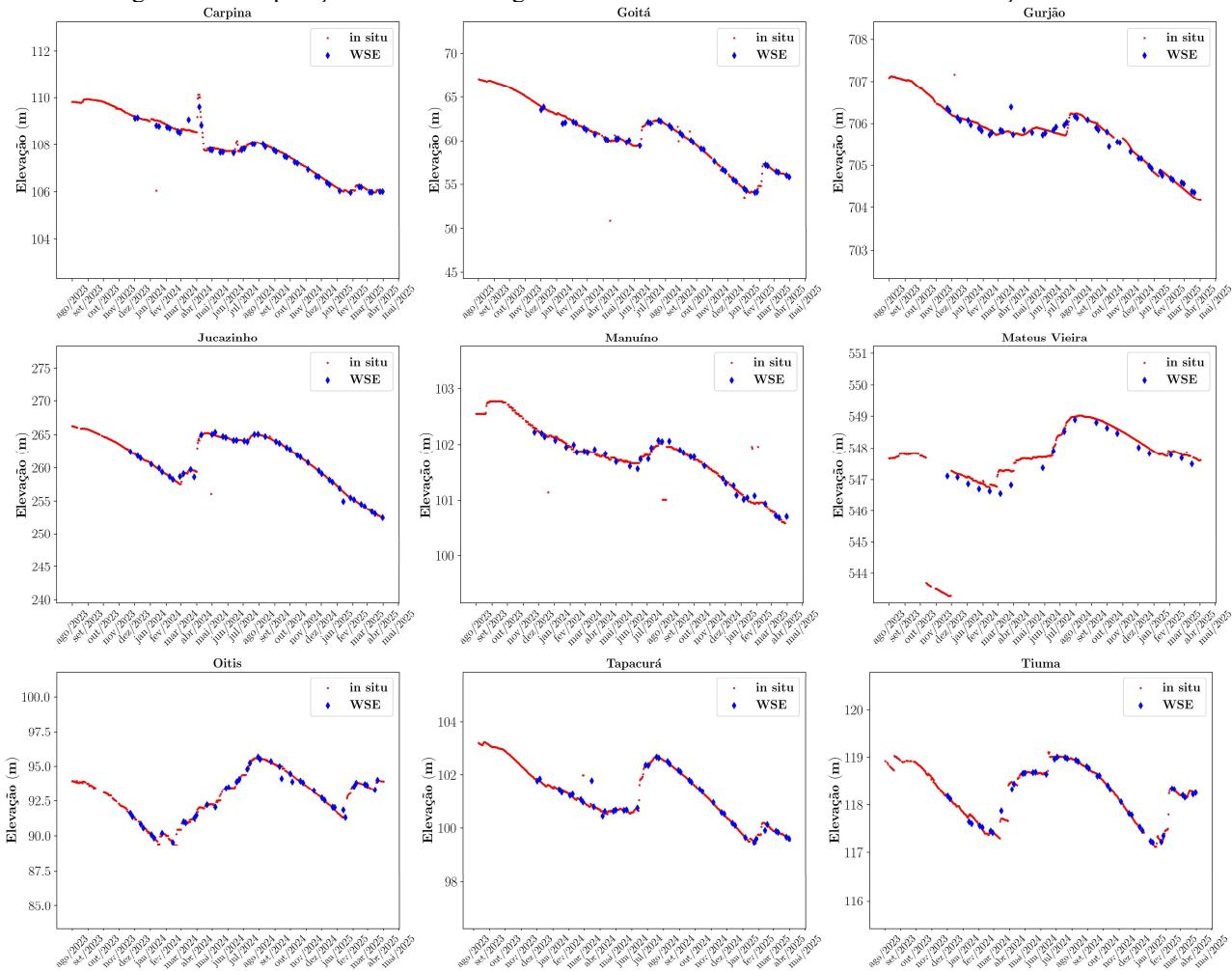
RESULTADOS

Após a etapa de correção de erros sistemáticos, foram removidos os valores *outliers* encontrados na série dos valores WSE dos produtos L2_HR_Lake_SP e, então, foram comparados com as medições *in situ* de nove reservatórios. Os resultados mostraram que o ajuste dos valores WSE aos valores *in situ* alcançou boas métricas de avaliação (Tabela 2). Os valores WSE para os reservatórios de Goitá, Jucazinho, Oitis e Tiuma não só podem refletir com mais precisão a tendência sazonal, mas também mostram uma correlação muito alta ($r > 0,99$) com o nível de água de observações *in situ* (Figura 2). Entretanto, em alguns casos é possível notar limitações dos dados de elevação de água SWOT em refletir as mudanças de tendência, como pode ser observado na Figura 2 os casos dos reservatórios de Mateus Vieira e Gurjão. É importante notar que o reservatório de Mateus Vieira obteve uma baixa correlação ($r = 0,68$) e o pior desempenho nos valores das métricas MAE e RMSE, o que pode ser um resultado do número amostral reduzido, quando comparado aos demais reservatórios. Os resultados apresentados vão ao encontro àqueles encontrados por Zhao *et al.* (2025), em que também foram avaliados os produtos SWOT de elevação de água.

Tabela 2 – Métricas de avaliação aplicadas aos dados WSE SWOT.

Reservatório	N. amostral	Pearson r	MAE (m)	RMSE (m)	MAPE (%)
Carpina	41	0,911	0,157	0,452	0,14
Goitá	43	0,996	0,142	0,272	0,24
Gurjão	45	0,969	0,095	0,140	0,01
Jucazinho	45	0,996	0,129	0,325	0,04
Manuíno	37	0,991	0,049	0,058	0,05
Mateus Vieira	20	0,683	0,380	0,885	0,07
Oitis	43	0,993	0,107	0,191	0,01
Tapacurá	43	0,972	0,085	0,219	0,08
Tiuma	43	0,996	0,033	0,051	0,02

Figura 2 – Comparação dos níveis de água nos reservatórios entre WSE SWOT e medições *in situ*.



Traçando uma análise das diferenças entre os valores WSE SWOT e *in situ*, algumas questões podem ser levadas em consideração. Uma vez que as medições feitas pela missão SWOT são baseadas em instrumentos orbitais, erros de medição podem estar associados a três categorias: instrumental, atmosférico e parâmetros geofísicos. Bazzi *et al.* (2025) mostraram que a correção do atraso troposférico seco é o principal fator associado às diferenças entre os níveis de água WSE e *in situ*, seguido pela correção atmosférica dos valores sigma0 (Yang *et al.*, 2023). Além disso, outros fatores também devem ser levados em consideração na explicação do viés associado aos valores WSE SWOT, como os valores de cruzamento de faixa (distância entre as posições do nadir e do pixel relacionadas ao ângulo de incidência) (Normandin *et al.*, 2024).

A diferença entre os valores WSE SWOT e *in situ* também pode estar relacionada a problemas nas séries temporais *in situ*, como pode ser visto na Figura 2. Erros de medição *in situ* podem ser notados nas séries históricas dos reservatórios de Manuíno e Mateus Vieira, como também a presença de *outliers* nos demais reservatórios. Além disso, é possível notar ainda a mudança abrupta de valores no reservatório de Tiúma. Erros como esses podem comprometer a avaliação de medições provenientes de produtos orbitais.

CONCLUSÃO

Este estudo analisou e avaliou a precisão, bem como a aplicabilidade do produto L2_HR_LakeSP, com base na comparação dos níveis de água de medições *in situ* com os níveis de água medidos fornecidos pelo satélite SWOT para um conjunto de nove reservatórios no período ago/2023-mar/2025.

Os produtos L2_HR_LakeSP contemplam parâmetros hidráulicos de corpos d'água superficiais, o que pode dar suporte eficiente à análise de tendências de nível de água em reservatórios em uma determinada bacia hidrográfica, região, ou escala global. Entretanto, esse experimento é limitado pelo escopo dos dados coletados e analisados; dos três subprodutos associados ao L2_HR_LakeSP disponíveis, foi avaliado apenas um.

Direções futuras de pesquisa podem incluir a análise das informações contidas no Produto de Dados de Nuvem de Pixels de Máscara de Água SWOT Nível 2 (SWOT_L2_HR_PIXC) para aprimorar a identificação de estimativas válidas do nível de água. Informações complementares de parâmetros instrumentais, como os citados por Bazzi *et al.* (2025), podem trazer melhorias na detecção de valores discrepantes.

Entretanto, apesar das limitações no escopo deste estudo, com alta precisão na aquisição do nível de água e ampla capacidade de cobertura de faixa, os produtos do satélite SWOT demonstraram vantagens significativas no monitoramento de reservatórios. Este recurso apresenta grande potencial de pesquisa e aplicação no cálculo preciso do armazenamento de águas superficiais, tornando possível a integração dos dados WSE SWOT com extensão da área de água obtidas de produtos de outros satélites para o cálculo da variação de volume de água armazenado, o que fornece importante suporte de dados para a promoção da pesquisa do ciclo hidrológico global, prevenção e controle de desastres hídricos e desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. O primeiro e segundo autores são bolsistas de doutorado da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE). O terceiro autor é bolsista de Produtividade e Pesquisa do CNPq.

REFERÊNCIAS

- ALSDORF, D. E. *et al.* “Measuring surface water from space.” *Reviews of Geophysics* 45, RG2002, 2007.
- BACALHAU, J. R. *et al.* “Bathymetry of reservoirs using altimetric data associated to optical images.” *Advances in Space Research* 69(11), pp. 4098–4110, 2022.
- BAZZI, H. *et al.* “Assessing SWOT interferometric SAR altimetry for inland water monitoring: insights from Lake Léman.” *Frontiers Remote Sensing* 6(1572114), 2025.
- BIANCAMARIA, S.; LETTENMAIER, D. P.; PAVELSKY, T. M. “The SWOT mission and its capabilities for land hydrology.” *Surveys in Geophysics* 37, pp. 307–337, 2016.

- BIRKETT, C. M.; BECKLEY, B. "Investigating the Performance of the Jason-2/ OSTM Radar Altimeter over Lakes and Reservoirs." *Marine Geodesy*, 33(S1), pp. 204-238, 2010.
- CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES. *Level 2 KaRIn High Rate Lake Single Pass Vector Product (L2_HR_LakeSP)*: Internal Document SWOT-TN-CDM-0673-CNES. Centre National d'Etudes Spatiales: Paris, France, 2025. Disponível em: <<https://podaac.jpl.nasa.gov/swot?tab=datasets>>. Acesso em: 2 de maio de 2025.
- DUAN, Z.; BASTIAANSSEN, W. "Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data." *Remote Sensing of Environment* 134, pp. 403–416, 2013.
- GAO, H.; BIRKETT, C.; LETTENMAIER, D. P. "Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing." *Water Resources Research* 48(9), 2012.
- PAVELSKY, T. M. et al. "Assessing the potential global extent of swot river discharge observations." *Journal of Hydrology* 519, pp. 1516–1525, 2014.
- PERNAMBUCO. SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E RECURSOS HÍDRICOS. *Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – PERH/PE*: Volume 2 – Caracterização das Bacias. Recife, 2022. 422 p. Disponível em: <<https://www.apac.pe.gov.br/planos>>.
- NORMANDIN, C. et al. (2024). "First results of the surface water ocean topography (SWOT) observations to rivers elevation profiles in the Cuvette Centrale of the Congo Basin". *Frontiers in Remote Sensing*, v. 5, p. 1466695.
- SHU, S. et al. "Evaluation of historic and operational satellite radar altimetry missions for constructing consistent long-term lake water level records." *Hydrology and Earth System Sciences* 25(3), pp. 1643–1670, 2021.
- SIDDIQUE-E-AKBOR, A. H. M. et al. "Inter-comparison study of water level estimates derived from hydrodynamic–hydrologic model and satellite altimetry for a complex deltaic environment." *Remote Sensing Environment* 115(6), pp. 1522-1531, 2011.
- SØNDERGAARD, M.; JEPPESEN, E. "Anthropogenic impacts on lake and stream ecosystems, and approaches to restoration." *Journal of Applied Ecology* 44, pp. 1089-1094, 2007.
- WOOLWAL, R. et al. "Global lake responses to climate change." *Nature Reviews Earth and Environment* 8, pp. 388-403, 2020.
- YANG, Q. et al. "Evaluation of InSAR tropospheric delay correction methods in the plateau monsoon climate region considering spatial–temporal variability." *Sensors* 23 (9574), 2023.
- ZHAO, Y. et al. "Validation of InlandWater Surface Elevation from SWOT Satellite Products: A Case Study in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River." *Remote Sensing* 17(1330), 2025.