

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

POTENCIAL DA ALTIMETRIA POR RADAR DA MISSÃO SWOT NO MONITORAMENTO OPERACIONAL DE NÍVEIS DE ÁGUA EM RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Rafael Reis Alencar Oliveira¹; Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins²;
Marielle Gosset³ & Dario Lima Macedo⁴

Abstract: The Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission represents a milestone in the advancement of space-based hydrology and lake monitoring, as it provides high-resolution altimetric data with global coverage. This study presents an analysis of the performance of the SWOT mission's L2_HR_LakeSP product for monitoring water levels in reservoirs of the Brazilian semiarid region, based on comparisons with daily in situ measurements from six reservoirs in the Sertões de Crateús basin. The results showed strong temporal agreement and high correlation between the time series, with global mean errors ranging from 0.06 to 0.25 m after bias correction and outlier removal. Performance was found to be sensitive to reservoir size, with higher deviations observed in smaller water bodies, which exhibited 1σ variability exceeding the mission's altimetric accuracy target (<10 cm). This highlights the need for targeted investigations focused on small-scale reservoirs. The analysis confirms the mission's potential for hydrological monitoring in the semiarid region, but also emphasizes the importance of investments in local altimetric leveling to enable full integration, as well as the use of higher-granularity products, such as L2_HR_PIXC, to improve altimetric retrieval and to incorporate small reservoirs in semiarid regions that are currently excluded from traditional monitoring networks.

Resumo: A missão *Surface Water and Ocean Topography* representa um marco no avanço da hidrologia espacial e monitoramento de lagos, pois fornece dados altimétricos de alta resolução espacial e cobertura global. Este trabalho apresenta uma análise do desempenho do produto L2_HR_LakeSP de missão SWOT para o monitoramento de níveis de água em reservatórios do semiárido cearense, com base na comparação com medições diárias de campo de seis reservatórios da bacia hidrográfica dos Sertões de Crateús. Os resultados demonstraram alta aderência temporal e forte correlação das séries temporais, com erros médios globais entre 0,06 e 0,25 m, após correção de viés altimétrico e remoção de outliers. Observou-se sensibilidade do desempenho em função do porte, com maiores desvios nos menores corpos d'água, que obtiveram variabilidade de 1σ acima da meta de precisão altimétrica da missão (<10 cm), o que reforça a necessidade de investigações específicas para pequena açudagem. A análise confirma o potencial da missão no monitoramento hidrológico no semiárido, porém ressalta-se a importância de investimentos em nivelamento altimétrico local para viabilizar essa plena integração, bem como a uso de produtos de maior granularidade, como o L2_HR_PIXC, para melhor obtenção da altimetria e inclusão dos pequenos reservatórios do semiárido atualmente desconsiderados na rede de monitoramento tradicional.

Palavras-Chave – Altimetria por radar, Reservatórios semiáridos, Missão SWOT.

¹ Funceme, Avenida Rui Barbosa, 1246, Fortaleza/CE, reis.rafaeu@gmail.com

² Funceme, Avenida Rui Barbosa, 1246, Fortaleza/CE, esper.martins@gmail.com

³ IRD/GET, 14 Av. Edouard Belin, 31400 Toulouse, marielle.gosset@ird.fr

⁴ Funceme, Avenida Rui Barbosa, 1246, Fortaleza/CE, dario.macedo@funceme.br

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do semiárido brasileiro depende fortemente da gestão eficiente dos recursos hídricos, especialmente da água armazenada em reservatórios. No Ceará, essa relação se evidencia no monitoramento oficial de 155 reservatórios (COGERH, 2025) e na proliferação de pequenos açudes construídos, muitas vezes, sem planejamento ou manutenção (FUNCEME, 2017). A irregularidade climática, marcada por secas severas e recorrentes, impulsionou a expansão da infraestrutura hídrica como forma de adaptação. Contudo, a compreensão sobre a dinâmica da pequena açudagem ainda é limitada. O excesso de barramentos e a escassez de chuvas comprometem a recarga dos mananciais, reforçando a urgência por monitoramento mais amplo e sistemático (Habets et al., 2018).

A recente missão SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*) representa um marco nesse esforço. Lançada em dezembro de 2022, a missão ampliou o uso do radar interferométrico em banda Ka para fornecer, de forma inédita, mapas bidimensionais de elevação e extensão da água superficial, com resolução espacial de até 100 metros e repetitividade de 21 dias (Desai et al., 2024; Crétaux et al., 2015; Bazzi et al., 2025).

Diferente das missões altimétricas anteriores — com cobertura limitada e voltadas a grandes corpos d'água — o sensor orbital SWOT promete ampliar significativamente a capacidade de observação sobre reservatórios de pequena escala, pois além de incluir aqueles com áreas da ordem de 0,6 hectares (NASA, 2022), traz uma cobertura global com detalhamento local.

Sua utilização no monitoramento dos pequenos açudes do Ceará representa uma oportunidade inédita para caracterizar a variação sazonal de níveis e volumes, especialmente em áreas antes invisibilizadas pelas técnicas tradicionais, como os sensores ópticos, que sofrem interferência de cobertura de nuvens ou pela pequena magnitude dos espelhos d'água. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma primeira análise dos resultados e potencialidades da missão SWOT no monitoramento hidrológico operacional de reservatórios superficiais no semiárido brasileiro. Através da análise de dados SWOT aplicados a reservatórios no Ceará, pretende-se avaliar sua acurácia aos dados hidrológicos já monitorados em campo, avaliar sua cobertura e verificar possíveis limitações, contribuindo para o avanço do uso de tecnologias espaciais no apoio à gestão participativa e territorial dos recursos hídricos em regiões semiáridas.

MONITORAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS NO CEARÁ

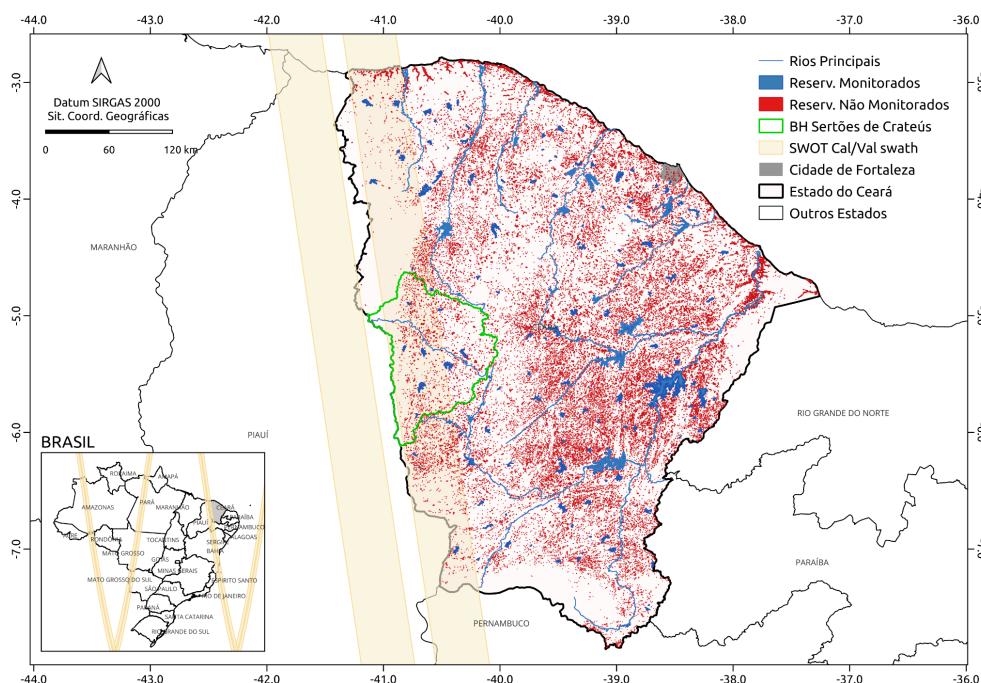
O monitoramento quantitativo dos recursos hídricos superficiais no Estado do Ceará, como em qualquer região nordestina, representa um pilar fundamental para a gestão hídrica em um território marcado pela escassez hídrica e elevada variabilidade pluviométrica. Inserido no Semiárido brasileiro, o Ceará desenvolveu, desde a década de 1990, uma das mais estruturadas políticas de recursos hídricos do país, centrada no fortalecimento institucional, na ampliação da infraestrutura de açudagem e na criação de mecanismos participativos de governança.

A Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), criada em 1993, é a responsável pela operação e monitoramento dos principais reservatórios do estado. A companhia mantém uma rede de monitoramento que acompanha diariamente em campo os níveis de 155 açudes (Figura 1), gerando dados fundamentais para a tomada de decisões em contextos críticos, como os de estiagem prolongada.

No entanto, estudos recentes mapearam remotamente cerca de quarenta e oito mil reservatórios de diferentes portes no território cearense (FUNCEME, 2017), sendo a maioria de pequena área superficial ($80\% < 0,05 \text{ km}^2$) e densamente presente ao longo dos cursos d'água. A

figura 01 apresenta a distribuição espacial dos reservatórios oficialmente monitorados pelo Estado e os não monitorados. Esta realidade impõe grandes desafios à gestão, como a necessidade de monitoramento de açudes que não estão na rede oficial, a interferência hidrológica entre pequenos e grandes reservatórios, e as elevadas taxas de evaporação, que chegam a 40% nos períodos de estiagem. Entre os principais desafios apontados estão a integração interinstitucional, a necessidade de instrumentalização tecnológica, a implementação de políticas permanentes de racionamento e reuso da água, a capacitação de recursos humanos e a expansão de sistemas de alerta para eventos extremos (Dantas, 2020).

Figura 1 – Distribuição espacial dos reservatórios oficialmente monitorados e os não monitorados no Estado do Ceará.



O monitoramento dos níveis de água ou cotas dos açudes nas bacias hidrográficas cearenses é realizado por medições diárias e contínuas em campo para avaliação da disponibilidade hídrica (COGERH, 2025). Essas informações são processadas e disponibilizadas por meio do Portal Hidrológico do Ceará, permitindo o acompanhamento em tempo real das condições dos reservatórios e subsidiando decisões operacionais e estratégicas. O monitoramento quantitativo desempenha um papel crucial na identificação de tendências hidrológicas, no suporte à alocação de água entre os diversos usos (abastecimento humano, irrigação, indústria) e na prevenção de conflitos pelo uso da água, fornecendo subsídios para a implementação de políticas públicas e investimentos em infraestrutura hídrica.

A MISSÃO SWOT E SEU POTENCIAL PARA O MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

A missão SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*) é uma iniciativa conjunta da NASA (Estados Unidos), CNES (França), CSA (Canadá) e UKSA (Reino Unido), com o objetivo de revolucionar o monitoramento da hidrosfera por meio de medidas de topografia da superfície da água em alta resolução espacial e precisão altimétrica. A principal inovação da missão está no uso do instrumento KaRIn (*Ka-band Radar Interferometer*), composto por duas antenas posicionadas em braços de 10 metros em cada lado do satélite, permitindo a obtenção de dados em duas faixas

(left e right swaths) com cerca de 50 km cada, totalizando uma largura de varredura de ~120 km, excluindo os 20 km centrais de baixa precisão. O instrumento permite gerar mapas 2D da elevação da superfície da água com metas de resolução espacial de 20 m e precisão vertical de cerca de 10 cm para corpos d'água maiores que 250 m de largura (Desai *et al.*, 2024).

A missão é estruturada em quatro fases principais: Fase de Calibração e Validação (Cal/Val), que ocorreu nos primeiros 6 meses após o lançamento (jan a jul de 2023), com órbita repetitiva curta e sobrevoos diários em áreas de validação; Fase de Ciência (Science Phase) iniciada em julho de 2023 com órbita de 21 dias de repetição global, adequada para aplicações científicas e operacionais; as Fases Operacionais Regulares que incluem reprocessamentos com dados atualizados, correções e lançamentos de novas versões dos produtos - momento atual; e por fim a Fase de Arquivamento e Suporte Continuado, prevista para os anos finais da missão, focando em suporte ao usuário e consolidação de dados históricos.

Os produtos esperados da missão SWOT voltados para hidrologia de lagos estão organizados por níveis de processamento. Dentre os produtos de nível 2 (L2) de alta taxa (*High Rate - HR*), destacam-se o L2_HR_PIXC (*Pixel Cloud*), conjunto de pixels com elevação e localização geográfica de superfícies detectadas como água, contendo também métricas de qualidade e variáveis auxiliares, geralmente utilizado para fins científicos devido à sua complexidade e volume de dados; e o L2_HR_LakeSP (*Lake Single Pass*) referente a vetores de lagos observados em cada passagem, com informações de elevação média, área, volume relativo e conectividade hidrológica, que devido ao formato simples é mais indicado ao público geral ou sistemas operacionais (Desai *et al.*, 2024; Pottier *et al.*, 2024).

Especificamente, os dados da missão SWOT oferecem uma oportunidade inédita de expandir a rede de monitoramento hidrológico para incluir milhares de pequenos reservatórios não cobertos por medições convencionais, como as da COGERH. Além de fornecer séries temporais contínuas e de alta precisão sobre elevação e área da superfície da água, a missão contribui para a atualização de bancos geoespaciais, aprimoramento da modelagem hidrológica e suporte à gestão regional de recursos hídricos. Ao preencher lacunas em áreas historicamente pouco monitoradas, a SWOT pode se consolidar como ferramenta estratégica para a governança da água, especialmente em regiões semiáridas com baixa densidade de observações e alta vulnerabilidade climática.

METODOLOGIA

Este trabalho baseia-se na comparação entre dados de sensoriamento remoto altimétrico da missão SWOT e dados de campo obtidos pelo monitoramento hidrológico da COGERH, com o objetivo de avaliar o potencial do satélite para o monitoramento de reservatórios superficiais no semiárido cearense. A área de estudo compreende reservatórios inseridos na bacia hidrográfica dos Sertões de Crateús (Figura 1 e Tabela 1), selecionada por apresentar uma série histórica contínua de dados de campo e por estar inserida na área de cobertura prioritária da missão SWOT durante suas duas fases principais: fase de calibração e validação (Cal/Val), com dados diários nos primeiros meses após o lançamento, e a fase nominal, na qual os dados são produzidos de forma operacional atualmente. Os dados diários de nível da água foram obtidos junto à Funceme, que gere o portal hidrológico, e serão tratados como séries relativas de Water Surface Elevation (WSE) *in situ*. Por sua vez, os dados do SWOT utilizados foram os produtos de nível 2 de alta resolução (L2_HR), em especial o produto L2_HR_LakeSP, que fornece informações consolidadas por polígono quanto à área, elevação média da superfície da água (WSE), volume relativo e incertezas associadas. A escolha do produto se justifica por sua aplicabilidade direta ao monitoramento de reservatórios e a acesso a medidas para corpos d'água com área mínima de 0,6 hectares.



Tabela 1 – Reservatórios monitorados e não monitorados analisados na Bacia do Sertões de Crateús, Estado do Ceará.

Nome	Lake_Id	Município	Área (ha)	Capacidade (m³)	Longitude	Latitude
Do Batalhão	6320026002	Crateús	93,84	1638800	-40.8062	-5.2610
Carnaubal	6320024492	Crateús	1212,37	73200000	-40.7145	-5.8388
Colina	6320016342	Quiterianópolis	175,35	4297203	-40.6581	-5.1948
Flor do Campo	6320019522	Novo Oriente	1875,09	105000000	-40.6728	-5.5722
Realejo	6320024872	Crateús	486,00	31550000	-40.7689	-4.8986
São José III	6320031632	Ipaporanga	250,79	7960000	-40.6701	-5.2805

A análise metodológica consistiu na seleção de reservatórios que intersectam a faixa da órbita (*swath*) de Cal/Val do SWOT e disponibilidade de dados de WSE diários ao longo das fases da missão. Foi utilizado as datas de sobrevoo do satélite sobre os reservatórios selecionados para realizar o cruzamento temporal com os dados em campo. Como parte do pré-processamento, realizou-se o alinhamento altimétrico entre as séries por meio do cálculo do viés sistemático e a remoção de valores atípicos com base em critérios estatísticos. As séries temporais foram avaliadas quanto a correlação, o desvio médio, o viés e o comportamento dinâmico dos níveis d'água e a variabilidade dos erros via desvio padrão amostral (1σ), conforme estudos prévios realizados por Bazzi et al. (2025) e Crétaux et al. (2015).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Desempenho geral do produto SWOT (L2_HR_LakeSP)

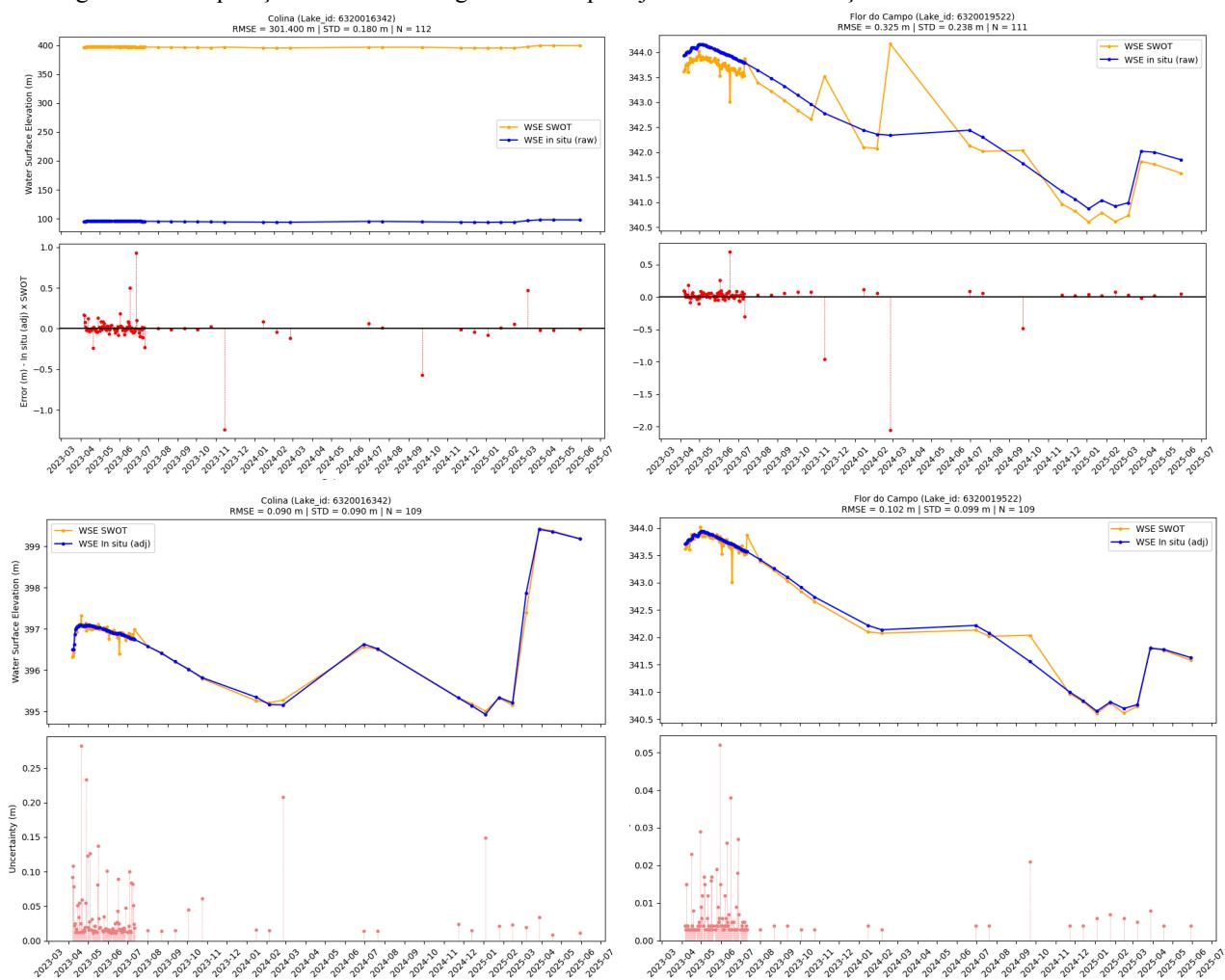
A comparação entre os dados da missão SWOT e as séries temporais *in situ* coletadas pela COGERH permitiram avaliar o desempenho altimétrico da missão para seis reservatórios localizados na bacia hidrográfica dos Sertões de Crateús: Carnaubal, Colina, Do Batalhão, Flor do Campo, Realejo e São José III (Tabela 1). Para isso, foram utilizados dados da fase de calibração/validação e fase nominal, cobrindo o período de março de 2023 a junho de 2025.

Durante a análise inicial, observou-se que a maioria dos reservatórios apresentou diferenças altimétricas significativas em relação aos dados da missão SWOT, refletindo a ausência de um nivelamento comum (Figura 2.a). Os menores valores de viés foram verificados justamente nos casos em que as cotas de campo estavam mais próximas da referência altimétrica do SWOT, sugerindo que estes estavam baseados em cotas absolutas, ainda que sem aferição recente.

O monitoramento de campo realizado pela instituição responsável baseia-se na leitura diária de cotas associadas a curvas cota-área-volume (CAVs), que podem ter sido determinadas a partir de projetos originais dos reservatórios ou atualizadas com base em levantamentos batimétricos recentes. Em muitos casos, essas cotas estão referenciadas a um *datum* relativo, estabelecido localmente para o acompanhamento da operação hidráulica dos reservatórios. Mesmo nos casos em que as cotas são tratadas como absolutas, estas podem estar vinculadas a levantamentos topográficos antigos, geralmente realizados durante a construção da barragem, e nem sempre correspondem a uma referência geodésica padronizada.

Diante disso, optou-se por ajustar os dados *in situ* com base nos valores altimétricos do satélite, cuja acurácia vertical e padronização global oferecem maior robustez para comparações. Essa abordagem permitiu que o foco da análise fosse direcionado para a variação e evolução temporal dos níveis de água, aspecto no qual os dados de campo mantêm elevada confiabilidade, com medições centimétricas realizadas por leituras da COGERH treinados, assegurando precisão na estimativa das WSE ou cotas dos reservatórios ao longo do tempo.

Figura 2 – Comparação dos níveis de água antes e após ajuste de viés e remoção de outliers dos reservatórios.



O viés sistemático, obtido pela diferença média entre os dados SWOT e os WSE *in situ*, foi eliminado por meio de uma correção relativa direta aos dados de campo. A tabela 2 consolida os resultados e a Figura 2.b ilustra a eficácia do procedimento de ajuste ocorrido para todos os reservatórios, com melhora percentual no RMSE superior a 94% para Realejo e próxima de 99,9% para Colina e São José III. Os valores de RMSE corrigido variaram de 0,06 m (Carnaubal) a 0,24 m (Realejo e Do Batalhão), com coeficientes de correlação superiores a 0,90 em todos os casos.

Vale ressaltar que as incertezas (*wse_u*) no gráfico representam a incerteza total associada à estimativa de WSE, combinando componentes aleatórios e sistemáticos. Durante a fase de calibração da missão SWOT, os valores foram mais elevados e variáveis devido aos ajustes instrumentais em curso. Na fase nominal, a estabilização da órbita e dos algoritmos resultou em incertezas menores e mais consistentes.

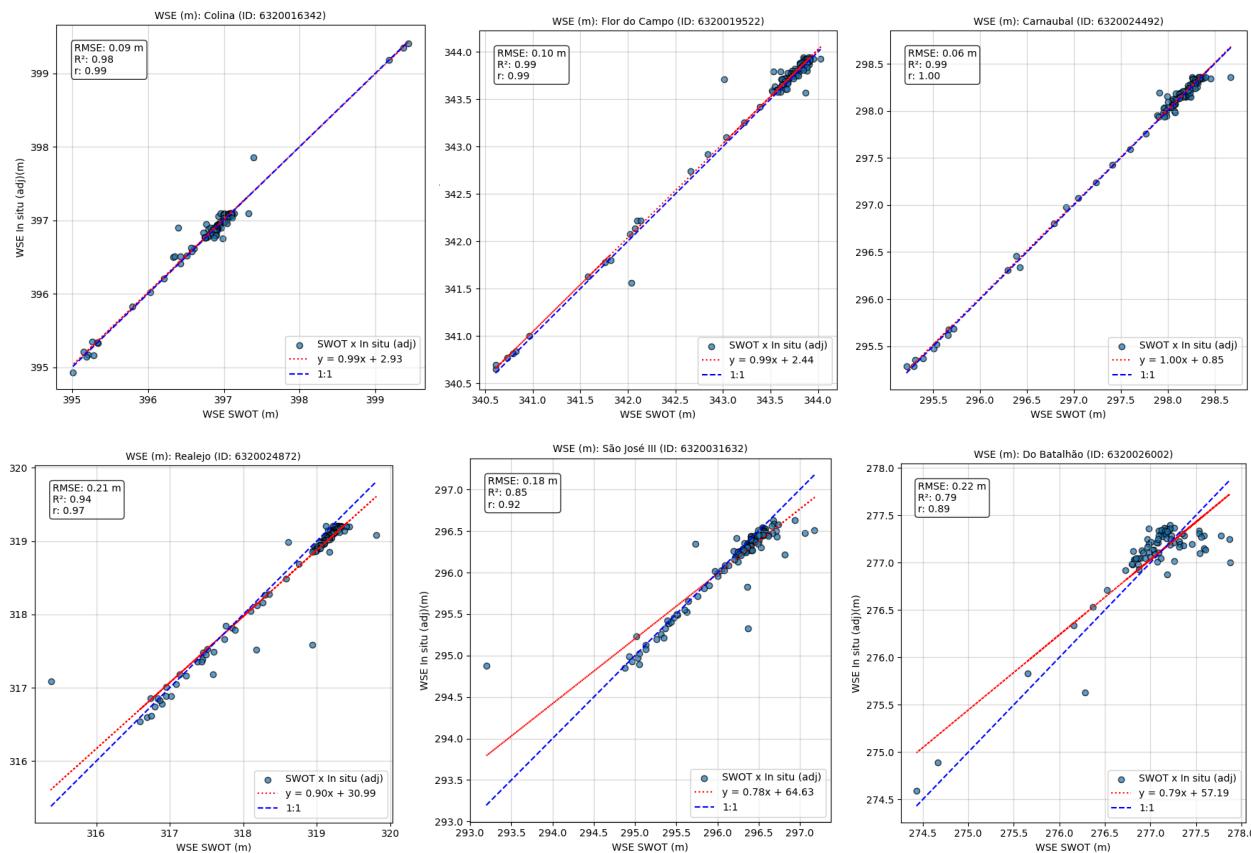
Aderência temporal entre as séries estatísticas

Após a remoção de outliers e o alinhamento altimétrico, as séries temporais demonstraram elevada consistência entre os dados SWOT e as observações *in situ*, reproduzindo com fidelidade os ciclos sazonais de variação dos níveis d'água (Figura 3). Observou-se que as discrepâncias mais acentuadas ocorrem em datas específicas — notadamente durante a fase de calibração — associadas a altas incertezas nos produtos SWOT e fase inicial de melhoramento do algoritmo de

processamento do sensor, como refletido nos valores de incerteza altimétrica registrados.

Reservatórios como Colina, Flor do Campo e Carnaubal destacaram-se pela baixa dispersão residual ($STD < 0,10$ m) e altíssima correlação ($r \geq 0,99$). Em contraste, Realejo apresentou um comportamento inicialmente enviesado, com diferenças absolutas de até 4,3 m antes da correção, atribuíveis à ausência de nivelamento altimétrico nos dados de campo.

Figura 3 – Distribuição dos erros entre os níveis de água WSE (m) do SWOT vs. in situ.



A Tabela 2 resume os principais indicadores para cada reservatório. A quantidade de pares comparáveis variou entre 107 e 132 observações, sendo a média geral de RMSE corrigido igual a 0,16 m e o desvio padrão médio de 0,16 m. O melhor desempenho foi observado para o reservatório Carnaubal (RMSE corrigido de 0,06 m), enquanto Realejo e São José III, apesar da acurácia final aceitável, requerem correções mais expressivas devido a desvios altimétricos sistemáticos.

Os resultados obtidos para o reservatório Do Batalhão revelam um aspecto relevante: embora o erro após correção tenha sido relativamente baixo (RMSE corrigido de 0,247 m; desvio padrão de $\pm 0,25$ m), comparável aos valores obtidos para Realejo e Colina, o percentual de melhoria foi mais modesto ($\approx 51\%$). Em contraste, os reservatórios Realejo e Colina apresentaram reduções superiores a 94% e 99%, respectivamente.

Essa discrepância pode estar relacionada à reduzida área superficial Do Batalhão (93,84 ha), que o posiciona próximo do limite mínimo recomendado pela missão SWOT (250 m \times 250 m) para assegurar a acurácia hidrológica dentro dos níveis de erro esperados (Pottier *et al.*, 2024).

Esse padrão se repete em outros reservatórios de menor porte, como São José III (250 ha), que, apesar de apresentar resultados ajustados satisfatórios, demonstrou maior variabilidade nos erros. Em contrapartida, corpos d'água mais extensos, como Flor do Campo (1875 ha) e Carnaubal

(1212 ha), apresentaram métricas mais estáveis e erros residuais significativamente reduzidos (RMSE corrigido $\leq 0,10$ m). Essa tendência reforça o papel da área superficial como variável crítica para a confiabilidade das estimativas altimétricas por radar, sobretudo em ambientes de borda do *swath*, onde distorções geométricas, efeitos de sobrevoo e contornos irregulares afetam a precisão interferométrica do sistema KaRIn.

Tabela 2 – Estatísticas comparativas dos níveis de água WSE (m) do SWOT vs. *in situ*.

Reservatório	RMSE	std	Bias	RMSE cor	1σ	n	n cor	Melhora (%)
Carnaubal	0.20	0.14	-0.14	0.06	0.06	111	107	69.52
Colina	301.40	0.18	301.40	0.09	0.09	112	109	99.97
Do Batalhão	0.50	0.33	0.38	0.25	0.25	77	76	50.90
Flor do Campo	0.33	0.24	-0.22	0.10	0.10	111	109	68.64
Realejo	4.45	1.09	-4.31	0.24	0.23	127	126	94.53
São José III	196.47	1.08	196.47	0.23	0.22	134	132	99.89

Essas observações são coerentes com os critérios operacionais estabelecidos para a missão SWOT, que recomenda áreas mínimas de superfície de água contínua, livre de vegetação densa, para garantir desempenho hidrológico adequado (Pottier et al., 2024), bem como foi observada por Grippa et al. (2019) em aplicações da altimetria em áreas semiáridas da África, onde lagos temporários pequenos obtiveram erros mais elevados e necessidade de filtragem espacial rigorosa.

Análise da distribuição dos erros

A distribuição dos erros (*in situ* ajustado – SWOT) para cada reservatório indica que os resíduos se concentram majoritariamente dentro da faixa de $\pm 0,25$ m, mesmo em reservatórios relativamente pequenos. Como mostra a Figura 4, os valores medianos aproximam-se de zero, o que evidencia a efetividade do processo de ajuste altimétrico e, principalmente, alinhamento ao objetivo central da missão — que visa fornecer observações globais de superfície de água com resolução espacial sem precedentes.

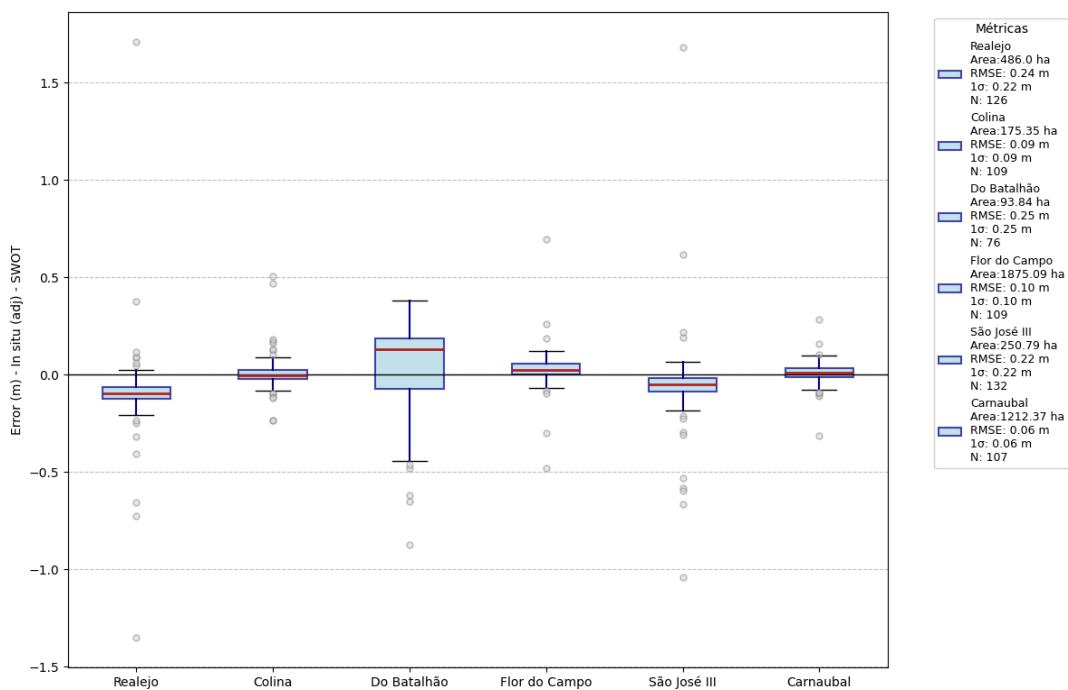
Vale ressaltar que essa performance demonstra um grande potencial operacional da missão SWOT, especialmente ao considerar que o satélite oferece dados regulares, padronizados e com ampla cobertura, inclusive sobre regiões historicamente carentes de monitoramento hidrológico, com grande densidade de barramentos ou de difícil acesso.

De acordo com o relatório técnico JPL D-79084, o SWOT foi projetado para alcançar uma precisão vertical inferior a 10 cm (1σ) em superfícies de água contínuas e não vegetadas com área superior a 1 km². A partir dessa referência, observa-se que apenas Carnaubal (0,06 m), Colina (0,09 m) e Flor do campo (0,099 m) atendem plenamente à meta da missão, com desempenho consistente e baixa dispersão dos resíduos. Já Do Batalhão (0,25 m), Realejo (0,23 m) e São José III (0,22 m) apresentaram dispersões superiores ao limite técnico, sugerindo sensibilidade a fatores externos como geometria do reservatório, visada parcial, posição no *swath* e/ou ineficiência dos algoritmos de processamento dos níveis de água (WSE) em alguns casos particulares.

As caudas mais assimétricas dos boxplots para esses três reservatórios indicam essa maior suscetibilidade aos erros extremos. Estudos prévios apontam que os fatores citados afetam negativamente a coerência interferométrica e aumentam a incerteza altimétrica, especialmente nas bordas da faixa de observação (*near/far range*) do satélite (Grippa et al., 2019). Bazzi et al., 2025 & Fernandez et al., 2017 apontam também limitações associadas a baixos valores de coerência ou perda de detecção em áreas com menor contraste entre água e terra, como bordas dos corpos d'água.

Sendo, portanto, o efeito *speckle* mais pronunciado em áreas com pixels parcialmente cobertos por água como em espelhos d’água menores.

Figura 4 – Distribuição dos erros entre dos níveis de água WSE (m) do SWOT vs. *in situ*.



Adicionalmente, a posição geográfica dos reservatórios dentro da faixa de observação do SWOT (cross-track) pode influenciar a geometria do radar interferométrico KaRIn e, portanto, a coerência da superfície e a qualidade da fase interferométrica. Bazzi et al. (2025) e Grippa et al. (2019) relataram essas incertezas, particularmente em corpos d’água menores ou cercados por relevo irregular ou cobertura heterogênea.

CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES

Este estudo avaliou o desempenho do produto SWOT L2_HR_LakeSP no monitoramento de níveis de água em reservatórios públicos do semiárido brasileiro, a partir da comparação com dados em campo obtidos pela COGERH no Estado do Ceará. Os resultados demonstram que, uma vez aplicada a correção de bias altimétrico entre os sistemas de referência e remoção de valores extremos, os dados da missão SWOT apresentaram alta consistência temporal com as observações de campo, atingindo erros residuais entre 0,06 e 0,25 m para todos os reservatórios analisados.

A análise indicou que a acurácia das estimativas altimétricas apresenta sensibilidade em função do porte dos reservatórios. Reservatórios com maior área superficial mostraram desempenho mais consistente, enquanto reservatórios menores apresentaram maior variabilidade nos erros. Embora aspectos como geometria, coerência interferométrica e localização relativa dentro da faixa de observação possam influenciar esses resultados, tais fatores não foram diretamente avaliados neste trabalho. Investigações futuras que considerem essas variáveis poderão contribuir para uma compreensão mais abrangente da performance altimétrica da missão em diferentes contextos físicos.

A análise da variabilidade 1 σ dos erros evidencia que os produtos SWOT apresentam desempenho compatível com aplicações de monitoramento hidrológico em reservatórios cearenses. No entanto, a predominância de corpos d’água de pequeno porte no semiárido brasileiro ressalta a

importância de estudos regionais específicos sobre a resposta da missão SWOT nesse tipo de ambiente.

Esse aspecto torna-se ainda mais relevante ao considerar que os resultados de alguns reservatórios analisados — notadamente os de menor porte — ficaram acima da meta de acurácia vertical da missão, estipulada em 10 cm (1σ) para áreas não vegetadas com mais de 1 km². Nesse sentido, reforça-se a necessidade de investigações direcionadas a reservatórios de pequena escala, com o uso de produtos de maior granularidade, como o L2_HR_PIXC (PixelCloud), visando à geração de estimativas altimétricas mais robustas e adequadas à realidade hidrológica do semiárido.

Finalmente, os resultados reforçam a necessidade de harmonização entre os sistemas de referência altimétrica utilizados nos dados orbitais e nos levantamentos in situ. A adoção de um datum vertical padronizado e compatível com referências globais, como o EGM2008 ou SIRGAS2000, constitui uma etapa fundamental para a integração eficaz das observações satelitais à infraestrutura de monitoramento hidrológico no Estado do Ceará, favorecendo sua aplicação operacional em regiões semiáridas.

REFERÊNCIAS

- CRÉTAUX, J.F.; BIANCAMARIA, S.; ARSEN, A.; BERGÉ-NGUYEN, M.; BECKER, M. (2015). “Global surveys of reservoirs and lakes from satellites and regional application to the Syrdarya river basin”. *Environmental Research Letters*, 10 (1), 015002.
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. (2025). *Portal Hidrológico*. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br>.
- DANTAS, S. P. (2020). “Dimensionamento e gestão de reservatórios: breve discussão acerca da experiência do estado do Ceará/Brasil”. *Revista Verde Grande, Geog. e Interd.*, v.2, n.1, pp. 25–36.
- DESAI, S. D.; PICOT, N.; CHEN, C.; et al. (2024). “SWOT Science Data Products User Handbook”. Jet Propulsion Laboratory, NASA., Washington, USA, JPL Publication. D-109532.
- FERNANDEZ, D.E.; FU, L.; POLLARD, B. VAZE, P. (2017). “Mission performance and error budget”. Jet Propulsion Laboratory, Nat. Aeronautics Space Administ., Washington, D.C., USA, JPL Publication JPL D-79084, 12-05, 2012. Disponível: <https://pdms.jpl.nasa.gov/>
- FUNCENE – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. (2017). *Mapeamento realizado pela Área de Meio Ambiente da FUNCENE - 1:100.000*, de 2017 e 2018.
- GRIPPA, M.; ROUZIES, C.; BIANCAMARIA, S.; BLUMSTEIN, D.; CRÉTAUX, J.; GAL, L.; ROBERT, E.; GOSSET, M. (2019). “Potential of SWOT for monitoring water volumes in Sahelian ponds and lakes”. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied EO and RS*, 12 (7), pp. 2541–2549.
- HABETS, F.; MOLÉNAT, J.; CARLUER, N.; DOUEZ, O.; LEENHARDT, D. (2018). “The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: A review.” *Science of the Total Environment*, 643 (2018), pp. 850–867, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.188.
- NASA – National Aeronautics and Space Administration. (2022). *SWOT Applications is Preparing for Launch – Spring 2022 Newsletter*. Disponível em: <https://swot.jpl.nasa.gov/>.
- POTTIER, C.; STUURMAN, C.; FJORTOFT, R.; CHEN, C.; ZAWADZKI, I.; ALGERMISSEM, S. (2024). “SWOT Product Description Document Long Name: Level 2 KaIn HR Lake Single Pass Vector Product Short - L2_HR_LakeSP”. CNES internal document. SWOT-TN-CDM-0673-CNES.