

Modelos de batimetria derivada dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2A aplicados a plataforma continental de Caiçara do Norte, Nordeste, Brasil

Satellite-derived bathymetry models from Landsat-8 e Sentinel-2A applied to Caiçara do Norte Shelf, Northeast, Brazil

Débora Rocha^{ac} , Moab Praxedes Gomes^{ad} , Paulo Victor do Nascimento Araújo^{be} 

^aUniversidade Federal do Rio Grande do Norte, ^bInstituto Federal do Rio Grande do Norte

^cdebora.rocha.105@ufrn.edu.br, ^dmoab.gomes@ufrn.br, ^epaulo.araujo@ifrn.edu.br



© 2026 The authors. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons license.

Resumo

A plataforma continental norte do Rio Grande do Norte é compartimentada em setores que variam desde a plataforma interna, mais rasa, intermediária e externa, que atinge profundidades até 70 m, e pela presença de várias feições submarinas, porém apresenta escassez de estudos batimétricos de detalhe o que limita o conhecimento sobre essa região. Este trabalho propõe a aplicação da técnica de batimetria derivada de satélite por modelos empíricos aplicados a imagens ópticas multiespectrais como suporte de mapeamento de ambientes rasos. O estudo tem como objetivo aplicar a batimetria derivada de satélite (BDS) para investigar a profundidade e a morfologia da região da Coroa das Lavadeiras, corpo arenoso raso isolado localizada ao norte da plataforma continental desse estado, próxima ao município de Caiçara do Norte (RN). A metodologia proposta baseou-se na utilização de imagens multiespectrais dos sensores Landsat-8 e Sentinel-2A, combinadas com dados de profundidade extraídos da carta náutica. Após a correção atmosférica das imagens, foram aplicados métodos empíricos baseados na razão entre bandas e no ajuste de modelos polinomiais para a estimativa da profundidade. O desempenho dos modelos foi avaliado por meio de métricas estatísticas, como coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrado médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e o erro relativo médio absoluto (MARD). Os resultados indicaram que o modelo desenvolvido com dados do sensor Landsat-8, na faixa de 2 a 30 m de profundidade e utilizando a combinação das bandas azul e verde (B1/B2), apresentou o melhor desempenho, com R^2 de 0,71 e os menores valores de erro. A aplicação final do modelo possibilitou a geração de um modelo batimétrico representativo, perfis batimétricos e modelos tridimensionais para a identificação das feições morfológicas subaquáticas, como a Coroa das Lavadeiras, as Dunas Longitudinais e as Dunas Transversais, evidenciando o potencial da BDS para o mapeamento de uma área na plataforma continental interna de Caiçara do Norte.

Palavras-chave: Dunas subaquáticas; corpo marinho raso isolado; processamento digital de imagens; mapeamento marinho; plataforma continental.

Abstract

The continental shelf in northern Rio Grande do Norte is subdivided into inner, middle, and outer shelf sectors and is extremely shallow, with depths reaching up to 70–75 m over most of its extent. Despite the presence of several submarine features, detailed bathymetric studies in this region are scarce, which limits the understanding of its morphology and hampers the acquisition of high-resolution bathymetric surveys. This study proposes the application of satellite-derived bathymetry (SDB) using empirical models applied to multispectral optical imagery as a support tool for mapping shallow-water environments. The objective of this study is to apply SDB to investigate depth and seafloor morphology and to morphologically characterize the Coroa das Lavadeiras, a shallow, isolated sandy body located north of the continental shelf of Rio Grande do Norte, near the municipality of Caiçara do Norte. The proposed methodology is based on multispectral images from the Landsat-8 OLI and Sentinel-2A sensors, combined with depth data extracted from nautical charts. After atmospheric correction, empirical methods based on band ratios and polynomial model fitting were applied to estimate water depth. Model performance was evaluated using statistical metrics, including the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and mean absolute relative deviation (MARD). The results indicate that the model developed using Landsat-8 data, within the 2–30 m depth range and employing the blue and green band combination (B1/B2), achieved the best performance, with an R^2 of 0.71 and the lowest error values. The final application of this model enabled the generation of a representative bathymetric map, bathymetric profiles, and three-dimensional models, allowing the identification of submerged morphological features such as the Coroa das Lavadeiras, longitudinal dunes, and transverse dunes, highlighting the potential of the SDB approach for mapping shallow areas of the inner continental shelf of Caiçara do Norte.

Keywords: Subaqueous dunes; isolated shallow marine body; digital image processing; marine mapping; continental shelf

1. Introdução

A plataforma continental é a zona submersa adjacente ao continente, caracterizada por variação morfológica e sedimentar, cuja largura no Brasil varia de 30 km no Nordeste a 250 km na foz do Amazonas (Harris et al. 2014, Vital et al. 2010, Gomes et al. 2020). O conhecimento de sua morfologia é fundamental para a compreensão dos processos costeiros, estabilidade da linha de costa e habitats marinhos.

Geralmente, levantamentos batimétricos são obtidos por métodos acústicos, mas avanços em sensoriamento remoto permitiram o desenvolvimento da Batimetria Derivada de Satélite (BDS), que oferece menor custo e maior cobertura espacial em águas rasas, apesar de limitações de profundidade e precisão (Freire 2017, Ashphaq 2021).

A carência de dados batimétricos de alta resolução na plataforma continental potiguar limita análises costeiras, ambientais e econômicas. Além disso, o avanço de atividades como pesca, dragagem, exploração de petróleo e projetos de energia eólica offshore aumenta a demanda por informações precisas

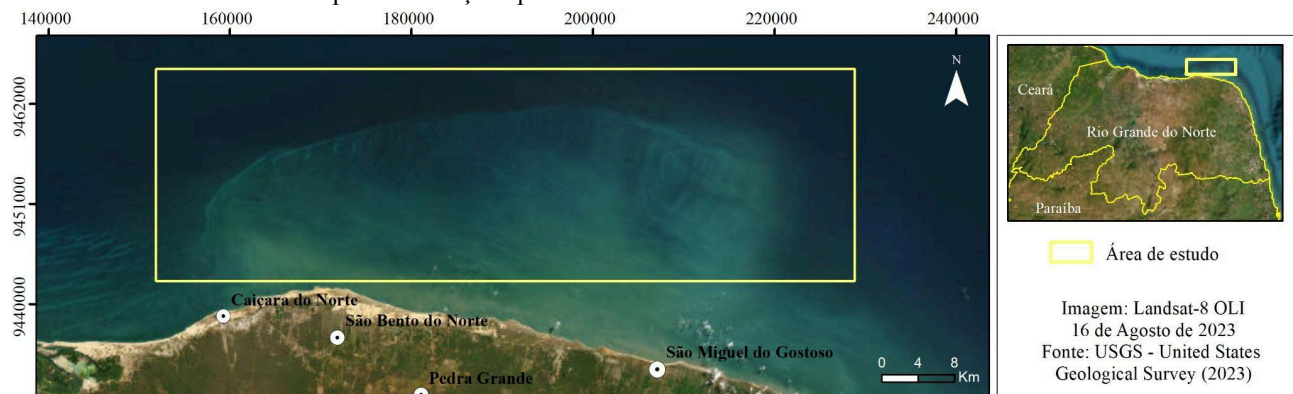


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo

2. Área de estudo

A área de estudo é caracterizada por um baixo suprimento de sedimentos, devido ao clima semiárido e uma sedimentação siliciclástica (Vital et al. 2008, 2010, Vital 2014, Gomes et al. 2015, 2016, 2020, Moreira et al. 2019). Essas características permitiram a preservação de feições reliquias e modernas na plataforma, influenciadas pelo último ciclo do nível do mar (Nascimento Silva et al. 2018, 2024). Entre as feições morfológicas submersas identificadas na plataforma destacam-se campo de dunas longitudinais e transversais à costa, alinhamentos de arenitos de praia (*beachrocks*), bancos de recifes de corais, relevo de cânion submarinos associados aos principais estuários da região (Testa & Bosence 1998, Vital et al. 2008) além de cordões arenosos (Nascimento Neto et al. 2019).

Entre as feições mais expressivas está a “Coroa das Lavadeiras”, corpo arenoso marinho raso isolado com limite ocidental orientado para direção NE, com cerca

do relevo submarino (Jagaligam et al. 2015, Araújo & Amaral 2016).

Este estudo tem como objetivo aplicar a BDS para investigar a profundidade e a morfologia da plataforma continental interna, definida como a faixa delimitada pela isóbata de 20 m de profundidade (Vital et al. 2005), localizada na região norte do estado do Rio Grande do Norte próxima a cidade de Caiçara do Norte, enfatizando feições como dunas subaquáticas e a “Coroa das Lavadeiras” (Nascimento Neto et al. 2019, Gomes et al. 2020), contribuindo com novos dados de resolução espacial mais detalhada. A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo.

Além disso, o presente estudo alinha-se ao projeto internacional Seabed 2030, que busca mapear todos os oceanos até 2030, contribuindo com dados locais dessa região costeira ao norte do Rio Grande do Norte, pois a região apresenta grande relevância socioeconômica, marcada por atividades ligadas à exploração de hidrocarbonetos, produção de sal e energia eólica, em contraste com a elevada sensibilidade ambiental e intensa dinâmica costeira (Matos et al. 2022).

de 4 m de altura e 10 km de extensão, de acordo com Gomes et al., 2012. Ocorre entre as isóbatas de 5 m e 10 m, entre a quebra da plataforma e um campo de dunas longitudinais na plataforma interna frente à cidade de Guamaré. Ela é mencionada como uma das principais feições geomorfológicas do fundo da plataforma, sendo relevante tanto para estudos batimétricos quanto para a compreensão das dinâmicas sedimentares da região (Gomes et al. 2014).

Do ponto de vista oceanográfico, a área é influenciada por ventos alísios de nordeste, ondas com alturas médias de até 3 m no inverno (Pianca et al. 2010) de intensidade moderada a alta (Vital et al. 2016), regime de maré semidiurna com amplitudes entre 1,2 e 3,3 m, além de correntes litorâneas que atingem velocidades de até 50 cm/s (Ribeiro et al. 2018). A circulação oceânica é marcada pela Corrente do Brasil (direção N-S), é a corrente de contorno oeste associada ao giro subtropical do Atlântico Sul e pela Corrente Equatorial (direção E-W) que se subdivide em ramos que modulam o transporte de massa e a dinâmica

costeira, ambas modulando a dinâmica sedimentar e a circulação costeira (Silveira et al. 2000, Damasceno et al. 2022).

3. Fundamentação teórica

A Batimetria Derivada de Satélite (BDS) consiste na estimativa de profundidades de águas rasas a partir de sensores remotos passivos ou ativos, servindo como ferramenta complementar aos levantamentos acústicos, especialmente em regiões costeiras de elevada transparência (IHO, 2024). Baseada na interação da luz com a coluna d'água e o substrato, a BDS utiliza imagens multiespectrais ou hiperespectrais para derivar profundidades relativas ou absolutas por meio de modelos empíricos, semiempíricos ou físicos (Kinzel et al. 2013, Poursanidis et al. 2019). Ressalta-se que, embora as abordagens ópticas da BDS sejam amplamente aplicadas em áreas costeiras, sua utilização não se restringe a esse ambiente, sendo condicionada principalmente às propriedades ópticas da água.

Neste trabalho, a estimativa batimétrica baseia-se em um modelo empírico de batimetria derivada de satélite, no qual a profundidade é obtida a partir de relações estatísticas entre a refletância registrada por sensores ópticos passivos e dados batimétricos de referência. Esses modelos assumem que a atenuação da luz na coluna d'água varia em função do comprimento de onda, permitindo a correlação entre razões de bandas espectrais, especialmente nas faixas do azul e do verde, e a profundidade da água (Stumpf et al. 2003). A aplicação do modelo requer calibração local com dados *in situ*, resultando em estimativas de profundidade relativas ou absolutas.

A acurácia dos modelos empíricos da BDS dependem das características dos sensores, incluindo: resolução espectral (números de bandas; o espectro do visível é essencial para penetrar a coluna d'água), resolução radiométrica (número de níveis digitais, tipicamente 12 bits, permitindo melhor sensibilidade à refletância; IHO, 2024), resolução temporal (frequência de revisita, relevante para monitorar mudanças em marés, turbidez e cobertura de nuvens; IHO, 2024) e resolução espacial (tamanho do pixel, com 1–60 m adequado para BDS; IHO, 2024). A correção atmosférica é uma etapa fundamental na aplicação da BDS óptica, pois visa minimizar os efeitos de aerossóis e do espalhamento atmosférico sobre a refletância registrada pelo sensor. Essa correção pode ser realizada por métodos empíricos simplificados como a subtração de objeto escuro (DOS) (Chavéz 1988). A correção do brilho especular da superfície da água (*sun glint*) constitui um procedimento complementar, associado à reflexão direta da radiação solar na interface ar-água. Algoritmos automatizados, como o DSF (*Dark Spectrum Fitting*) implementado no *software* ACOLITE incorporam módulos específicos para a correção atmosférica e para o tratamento do *sun glint* em um mesmo fluxo de processamento, tornando-se especialmente adequados para aplicações

em ambientes costeiros (Vanhellemont & Ruddick 2014, 2015, 2016, Vanhellemont 2019)

Aplicações em ambientes costeiros tropicais e subtropicais demonstram eficácia da BDS em águas claras e fundos homogêneos (Stumpf et al. 2003, Caballero et al. 2019).

4. Materiais e Métodos

4.1 Base de dados

As imagens utilizadas neste trabalho foram obtidas a partir dos satélites Landsat-8 OLI e Sentinel-2A, ambos amplamente empregados em aplicações de batimetria derivada de satélite (BDS), em ambientes costeiros e águas interiores. A escolha desses sensores fundamenta-se na ampla disponibilidade gratuita de dados multiespectrais, na adequada cobertura espacial e temporal e no reconhecimento, pela literatura, de seu potencial para aplicações batimétricas em águas rasas (Duan et al. 2022).

As imagens do Landsat-8, adquiridas pelo sensor OLI (*Operational Land Imager*), com resolução multiespectral de 30 m, foram adquiridas em 16 de agosto de 2023 (órbita 215/linha 063), com cobertura de nuvens de 2,5%. Foram utilizados produtos em nível de processamento L1, os quais fornecem dados de refletância de topo da atmosfera, condição necessária para a aplicação do módulo DSF no *software* ACOLITE e para a realização de correções atmosféricas específicas para ambientes aquáticos. Essa etapa é essencial para a aplicação consistente dos algoritmos empíricos de razão de bandas, com base no modelo proposto por Stumpf et al. (2003). Para o processamento, foram empregadas as bandas B1 (aerossol costeiro, 0,433 - 0,453 μm), B2 (azul, 0,450 - 0,515 μm); B3 (verde, 0,525 - 0,600 μm , obtidas gratuitamente via plataforma Earth Explorer (USGS). As bandas do azul e do verde foram priorizadas em função da menor atenuação da radiação nesses comprimentos de onda, sendo amplamente empregadas na literatura especializada em batimetria derivada de satélite (Lyzenga et al. 2006, Stumpf et al. 2003).

Complementarmente, empregaram-se imagens do Sentinel-2A, com resolução espacial de 10 a 20 m e 13 bandas espectrais. A cena selecionada corresponde à tile T24MZV, adquirida em 30 de novembro de 2024 (nível L1C – *Top of Atmosphere*), com baixa cobertura de nuvens. Foram utilizadas as bandas do visível (B1 – aerossol, B2 – azul, B3 – verde e B4 – vermelho), obtidas por meio do Copernicus Browser (ESA).

Os dados batimétricos são provenientes das cartas náuticas nº 219 e 803, disponibilizadas pelo Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil, onde foram utilizados para a calibração dos modelos empíricos de BDS. Esses dados foram convertidos para o formato shapefile, contendo pontos de profundidade distribuídos na área de estudo (Fig. 2), os quais serviram como referência para o ajuste das equações que relacionam a resposta espectral dos sensores à

profundidade. O conjunto de calibração foi composto por 200 pontos de profundidade, distribuídos entre as faixas de 1,9–10 m (118 pontos), 11–20 m (47 pontos) e 20–30 m (35 pontos).

Apesar de as cartas náuticas não apresentarem metadados completos relativos ao método e ao período de aquisição dos levantamentos hidrográficos oficiais, servem como referência secundária em estudos de batimetria derivada de satélite.

4.2 Processamento das imagens

4.2.1 Correção atmosférica

A correção atmosférica das imagens Landsat-8 e Sentinel-2A foi realizada no *software* ACOLITE, utilizando o algoritmo DSF (*Dark Spectrum Fitting*) (Vanhellemont & Ruddick 2015, 2016, 2019). O método, baseado em múltiplas bandas espectrais, ajusta automaticamente a contribuição atmosférica sem a necessidade de dados *in situ*, sendo particularmente eficiente em ambientes aquáticos (Viana-Borja et al. 2025). As imagens foram processadas com parâmetros padronizados, assegurando uniformidade entre os sensores e minimizando efeitos de aerossóis, dispersão atmosférica e sunglint, o que melhora a estimativa da refletância da superfície e a extração batimétrica.

4.2.2 Estimativa da batimetria - Método Stumpf

A batimetria foi estimada pelo método empírico proposto por Stumpf et al. (2003), que utiliza a razão entre bandas espectrais para reduzir os efeitos atmosféricos e da coluna d'água. O modelo (Eq. 1) relaciona a profundidade (z) à razão logarítmica entre as radiâncias observadas (L_{obs}) de duas bandas:

$$z = m_1 \left(\frac{\ln \ln (L_{obs}(Band_i))}{\ln \ln (L_{obs}(Band_j))} \right) - m_0 \quad (1)$$

Onde, L_{obs} é a radiância observada das bandas, m_1 e m_0 são respectivamente o ganho e o offset determinados empiricamente, i refere-se à banda azul e j refere-se à banda verde, e Z é a profundidade em metros. O processamento foi realizado no *software* ArcMap 10.8, onde, após a correção atmosférica, aplicaram-se os logaritmos das bandas e a divisão espectral por meio da ferramenta Raster Calculator. As combinações principais testadas foram B2/B3 (azul/verde) em ambos os sensores, além das alternativas B1/B2, B1/B3, B2/B4 e B3/B4.

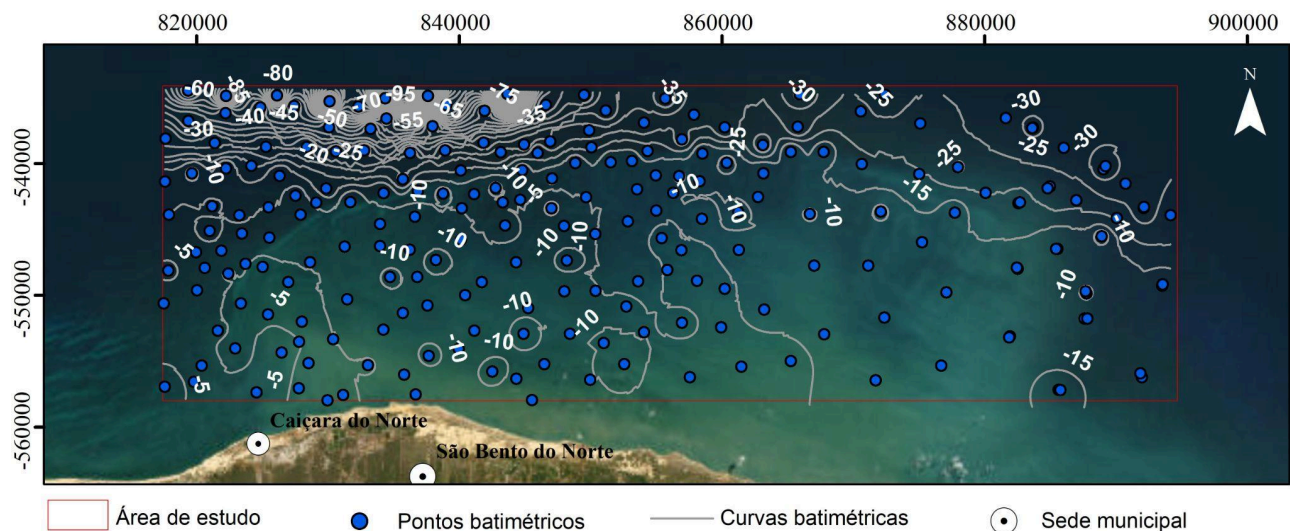


Figura 2: Mapa batimétrico contendo os pontos de profundidade distribuídos na área de estudo.

4.2.3 Avaliação estatística e análises comparativa

A acurácia da batimetria derivada foi avaliada a partir da comparação entre os valores estimados pelo método empírico de Stumpf et al. (2003) e os dados de profundidade provenientes das cartas náuticas. Para essa análise, foram aplicadas métricas estatísticas amplamente utilizadas em estudos de batimetria derivada de satélite, incluindo o coeficiente de determinação (R^2), que indica o grau de correlação entre as profundidades estimadas e observadas; o erro médio absoluto (MAE), que expressa a magnitude média dos erros; a raiz do erro quadrático médio (RMSE), que penaliza erros maiores; e o erro relativo médio absoluto (MARD), que avalia o erro em termos percentuais.

As análises foram realizadas separadamente para os sensores Landsat-8 OLI considerando limites máximos de profundidade de até 20 m, 30 m, 40 m e 50 m e Sentinel-2A MSI considerando apenas até 30 m, com o objetivo de avaliar o comportamento dos erros com o aumento da profundidade. Profundidades superiores a 50 m foram desconsideradas, em função das limitações inerentes aos métodos ópticos de BDS em águas mais profundas.

O coeficiente de determinação (R^2) foi obtido a partir de gráficos de dispersão entre os índices espectrais derivados das razões de bandas e as profundidades das cartas náuticas, permitindo avaliar a aderência dos modelos de regressão. Em conformidade com a formulação original do método de Stumpf et al.

(2003), baseada na linearização da atenuação exponencial da luz na coluna d'água por meio do logaritmo natural, o ajuste linear foi adotado como modelo de referência.

De forma complementar, ajustes polinomiais também foram testados com caráter exploratório, visando avaliar possíveis ganhos no desempenho estatístico dos modelos em diferentes faixas de profundidade. Os modelos selecionados foram aplicados na ferramenta Raster Calculator do software ArcMap 10.8 para a geração dos rasters de batimetria estimada.

Os valores obtidos foram comparados aos dados reais, resultando no cálculo das métricas MAE (Eq. 2), RMSE (Eq. 3) e MARD (Eq. 4), segundo as equações:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i - \hat{Z}_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - \hat{Z}_i)^2} \quad (3)$$

$$MARD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Z_i - \hat{Z}_i|}{Z_i} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde, Z_i = profundidade real (in situ); \hat{Z}_i = profundidade estimada (modelo); n = número total de pontos; Σ = somatório. Os cálculos foram realizados no software Excel, com geração de gráficos de dispersão, tabelas comparativas e análise da proximidade dos pontos em relação à linha 1:1, indicadora da acurácia do modelo.

4.2.4 Caracterização morfológica de fundo

A caracterização morfológica da área foi realizada em ambiente SIG no ArcGIS 10.8, utilizando o modelo final da batimetria. Foram produzidas curvas batimétricas (isóbatas a cada 5 m) pela ferramenta Contour. Perfis batimétricos transversais à linha de costa foram gerados com o módulo 3D Analyst, permitindo observar o gradiente costeiro. Para reduzir possíveis anomalias radiométricas, aplicaram-se filtros de passa-baixa 3x3 (Poursanidis et al. 2019). A representação tridimensional foi elaborada no ArcScene 10.8, com aplicação de exagero vertical de 10x, favorecendo a visualização das feições submarinas.

5. Resultados e discussões

Os resultados obtidos a partir das imagens do sensor Landsat-8 OLI evidenciam diferenças significativas no desempenho das combinações de bandas testadas, com maior coerência espacial e menor nível de ruído em comparação aos modelos gerados com o Sentinel-2A.

5.1 Imagens Landsat-8

5.1.1 Estimativa batimétrica e validação estatística

A estimativa batimétrica foi realizada a partir de três modelos empíricos aplicados às imagens do Landsat-8 OLI (B1/B2, B1/B3 e B2/B3), considerando quatro faixas distintas de profundidade: 2 a 20 m, 2 a 30 m, 2 a 40 m e 2 a 50 m, a fim de avaliar o desempenho dos modelos em diferentes limites batimétricos.

Dentre as quatro faixas de profundidade testadas, optou-se por apresentar inicialmente os gráficos referentes à faixa de 2 a 30 m (Fig. 7), por ter evidenciado melhor desempenho nas análises preliminares. Os resultados das demais faixas serão retomados mais adiante, na comparação estatística e seleção do modelo final.

Nos três modelos testados, foram avaliados ajustes lineares e polinomiais de segunda ordem. O ajuste polinomial apresentou valores ligeiramente superiores nos indicadores estatísticos em relação ao ajuste linear, embora os ganhos observados tenham sido modestos. A análise dos ajustes polinomiais evidencia que as linhas de tendência dos modelos B1/B2 (Fig. 2A) e B1/B3 (Fig. 2B) exibem concavidade voltada para baixo, enquanto no modelo B2/B3 (Fig. 2C) essa curvatura é menos pronunciada, aproximando-se de uma relação linear. Diante do caráter empírico do método e do objetivo comparativo do estudo, optou-se por apresentar e empregar operacionalmente apenas o ajuste polinomial de segunda ordem, mantendo o ajuste linear como referência conceitual testada em etapa preliminar, sem apresentação gráfica, de modo a assegurar consistência metodológica entre os modelos e explorar possíveis refinamentos estatísticos sem descaracterizar a base física do método proposto por Stumpf et al. (2003).

As curvas com concavidade voltada para baixo observadas nos três gráficos podem indicar que o índice apresenta maior sensibilidade em faixas rasas, reduzindo sua resposta em maiores profundidades, possivelmente devido à atenuação do sinal com o aumento da profundidade.

Em B1/B2 (Fig. 3A), nota-se uma maior concentração de pontos nas faixas mais rasas, isso sugere que o índice possui maior sensibilidade até cerca de 15 m. A partir dessa faixa observa-se uma dispersão maior, indicando perda da coerência espectral e aumento da variabilidade entre os valores estimados e os reais.

Nas demais combinações B1/B3 (Fig. 3B) e B2/B3 (Fig. 3C), observa-se que os pontos como um todo encontram-se mais dispersos em relação a curva de tendência principalmente em regiões mais profundas, indicando perda de correlação – maior variabilidade dos dados – portanto, menor precisão dos modelos.

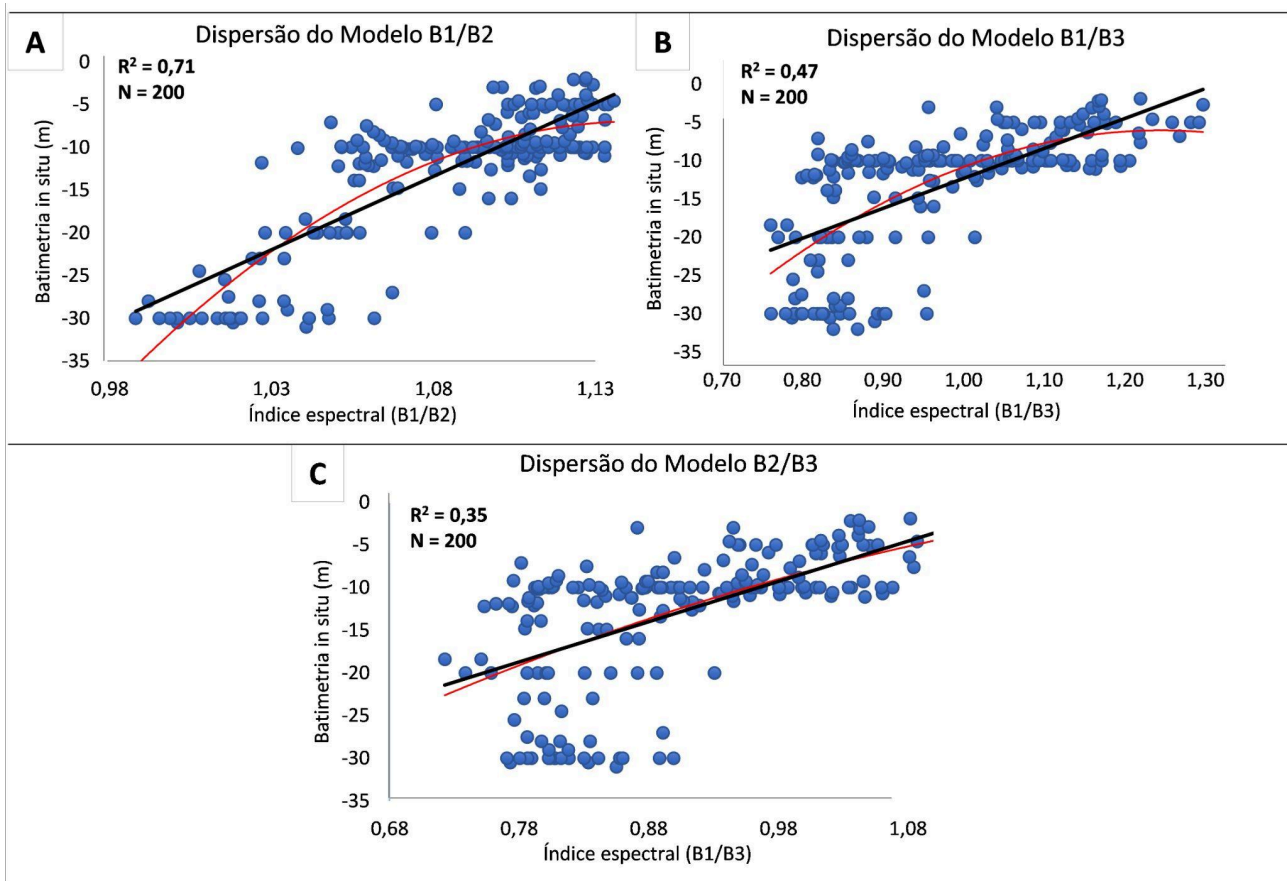


Figura 3: Gráficos de dispersão entre a batimetria da carta náutica e os índices espectrais resultado da divisão entre as bandas (A, B, C), para os três modelos testados, na profundidade de até -30 m do sensor Landsat-8. A linha em vermelho é a linha de tendência com ajuste polinomial, e a linha preta é a linha 1:1.

Nas demais combinações B1/B3 (Fig. 2B) e B2/B3 (Fig. 3C), observa-se que os pontos como um todo encontram-se mais dispersos em relação a curva de tendência principalmente em regiões mais profundas, indicando perda de correlação – maior variabilidade dos dados – portanto, menor precisão dos modelos.

Dentre as combinações avaliadas, o modelo baseado na razão B1/B2 (Fig. 3A) apresentou desempenho relativo superior em comparação às demais combinações testadas, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,71. Esse valor indica uma correlação moderada entre as profundidades estimadas e os dados de referência, refletindo maior aderência dos pontos à curva de tendência ajustada quando comparado aos outros modelos analisados.

O desempenho relativamente mais elevado da combinação B1/B2 pode ser atribuído às características espectrais das bandas envolvidas. A banda 1 (coastal/aerossol) e a banda 2 (azul) apresentam maior capacidade de penetração na coluna d'água em relação às bandas de maiores comprimentos de onda, sendo menos suscetíveis aos efeitos de atenuação luminosa, especialmente em águas rasas e intermediárias (Lyzena 1978, Stumpf et al. 2003). A resposta conjunta dessas bandas favorece a extração de informações batimétricas nessas faixas de profundidade, o que contribui para o desempenho observado do modelo.

Já as demais combinações, B1/B3 e B2/B3, apresentaram coeficientes de determinação inferiores a 0,5, evidenciando um menor poder preditivo na estimativa da profundidade. Essa limitação está diretamente relacionada à escolha das bandas espectrais, principalmente no uso da banda B3 (verde), que tende a apresentar menor penetração na coluna d'água e maior sensibilidade a ruídos ópticos, especialmente em áreas com maior turbidez (Stumpf et al. 2003). A atenuação mais acentuada da luz nessa faixa espectral reduz a acurácia das estimativas, o que pode explicar a dispersão mais elevada dos dados nesses modelos.

De modo geral, nas três combinações analisadas, observa-se uma maior concentração de pontos ao redor da curva de tendência nas regiões mais rasas, especialmente até cerca de 15 m. Nessa faixa, os índices apresentaram valores mais elevados, correspondendo às áreas de menor profundidade, onde a luz ainda consegue penetrar com mais efetividade, resultando em menor atenuação e maior estabilidade no sinal de refletância (Lyzena 1978, Stumpf et al. 2003). A partir desses limites, nota-se um aumento da dispersão vertical entre os pontos, refletindo maior variação nos erros. Esse padrão evidencia a limitação dos modelos em representar com precisão as profundidades maiores, especialmente devido à menor penetração da radiação e ao aumento de ruídos nas áreas profundas, o que compromete a consistência da batimetria derivada

nesses trechos. Na área de estudo, esse comportamento está associado principalmente à heterogeneidade composicional do fundo, marcada pela alternância entre sedimentos siliciclásticos, carbonáticos e mistos, bem como à heterogeneidade morfológica, expressa pela presença de feições como dunas subaquáticas e bancos arenosos. Condições semelhantes foram descritas por Duan et al. (2022), que apontam redução da acurácia batimétrica em ambientes com elevada variabilidade óptica da água e mistura espectral entre diferentes tipos de fundo.

Com base nesses padrões observados nos gráficos de dispersão, especialmente a concentração de pontos nas áreas rasas e o aumento da dispersão em maiores profundidades, torna-se importante avaliar também os resultados estatísticos obtidos para cada modelo testado.

A Tabela 1 apresenta os valores de coeficiente de determinação (R^2), erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE), além dos indicadores de superestimação e subestimação (MARD), calculados nas quatro faixas de profundidade analisadas. Esses dados complementam a interpretação visual dos gráficos, permitindo uma avaliação mais robusta do desempenho de cada índice batimétrico.

Tabela 1: Estatísticas de validação dos modelos empíricos de batimetria derivada em diferentes faixas de profundidade (m), do sensor Landsat-8.

Sensor	Intervalo de Profundidade (m)	Modelo	R^2	RMSE (m)	MAE (m)	MARD (%)
Landsat-8	2 a 20	B1/B2	0,50	3,2	2,6	35,8
		B1/B3	0,42	3,5	2,8	34
		B2/B3	0,39	3,6	2,8	34
	2 a 30	B1/B2	0,71	4,1	3,2	35,5
		B1/B3	0,47	5,6	4,3	41,4
		B2/B3	0,35	6,2	4,7	43,4
	2 a 40	B1/B2	0,72	4,5	3,4	35,3
		B1/B3	0,46	6,3	4,8	42,8
		B2/B3	0,34	7,0	5,3	46,8
	2 a 50	B1/B2	0,80	4,8	3,7	35,6
		B1/B3	0,50	7,7	5,5	46,1
		B2/B3	0,31	8,8	6,3	51

Como observado na Tabela 3, a combinação B1/B2 apresentou os maiores valores de R^2 em todas as faixas de profundidade, e também apresentou os menores valores de RMSE e MAE entre os demais modelos, indicando menor dispersão dos erros e maior proximidade entre os valores estimados e os reais. Em relação aos valores do MARD, observa-se uma leve estabilidade entre as faixas de profundidade, com valores oscilando entre 35,3% e 35,8%, sem indicar uma tendência clara de aumento ou redução do erro proporcional à medida que a profundidade aumenta. Isso pode sugerir que, apesar da subestimação geral das profundidades reais, como será discutido posteriormente. O erro relativo médio permaneceu estável, indicando uma certa consistência na performance do modelo, mesmo com limitações associadas às profundidades maiores.

De forma geral, as combinações B1/B3 e B2/B3 apresentaram erros maiores do que a B1/B2 em todas as faixas de profundidade. Os valores de RMSE ficaram entre 5,6 m e 8,8 m, indicando maior diferença entre a profundidade estimada e a real. O MAE, que mostra o erro médio absoluto, também foi mais alto nessas combinações, variando de 4,3 m a 6,3 m, principalmente em profundidades maiores. Já o MARD, que representa o erro relativo, ultrapassou os

50% na combinação B2/B3 em até 50 m, mostrando pouca precisão do modelo. Esses resultados estão ligados ao uso da banda B3 (verde), que tem menor penetração na coluna d'água e é mais sensível a interferências, como turbidez ou reflexos superficiais (Lyzenga 1978, Stumpf et al. 2003). Isso compromete a estimativa de profundidades maiores e explica o pior desempenho dessas combinações. Enquanto isso, a combinação B1/B2 manteve-se abaixo de 36% em todas as faixas.

Diante o exposto, com base na análise dos gráficos de dispersão na tabela 1, observou-se que a faixa de profundidade entre 2 m e 30 m apresentou os melhores desempenho, conciliando valores elevados de R^2 e erros relativamente baixos. Embora a faixa de até 40 m e 50 m tenham alcançado os maiores R^2 , 0,72 e 0,80 respectivamente, os erros associados foram mais altos. Já as faixas mais rasas, como a de até 20 m, apresentaram erros menores, porém com R^2 abaixo de 0,7, indicando menor capacidade preditiva. Com esses parâmetros, os gráficos apresentados a seguir foram gerados com base apenas na faixa de 2 a 30 m, por oferecer o melhor equilíbrio entre acurácia e representatividade da área analisada.

Testes adicionais foram realizados com subdivisões mais restritas de profundidade (por exemplo, 2–10 m e

10–20 m), com o objetivo de avaliar o comportamento dos modelos em faixas específicas.

No entanto, esses intervalos apresentaram coeficientes de determinação muito baixos (R^2 da ordem de 0,1 a 0,2), indicando fraca correlação entre os índices espectrais e as profundidades de referência. Em função do desempenho estatístico limitado e da reduzida capacidade explicativa desses modelos, optou-se por não os apresentar no corpo do trabalho,

priorizando os intervalos de profundidade mais amplos, nos quais os modelos demonstraram desempenho relativo superior e maior estabilidade estatística.

Continuando a análise, a Figura 4, apresenta os gráficos de dispersão entre a batimetria derivada dos modelos (BDS) e a batimetria da carta náutica, obtidos a partir da aplicação das equações ajustadas para cada combinação. Também são exibidos os gráficos de erro correspondentes, evidenciando a acurácia dos modelos.

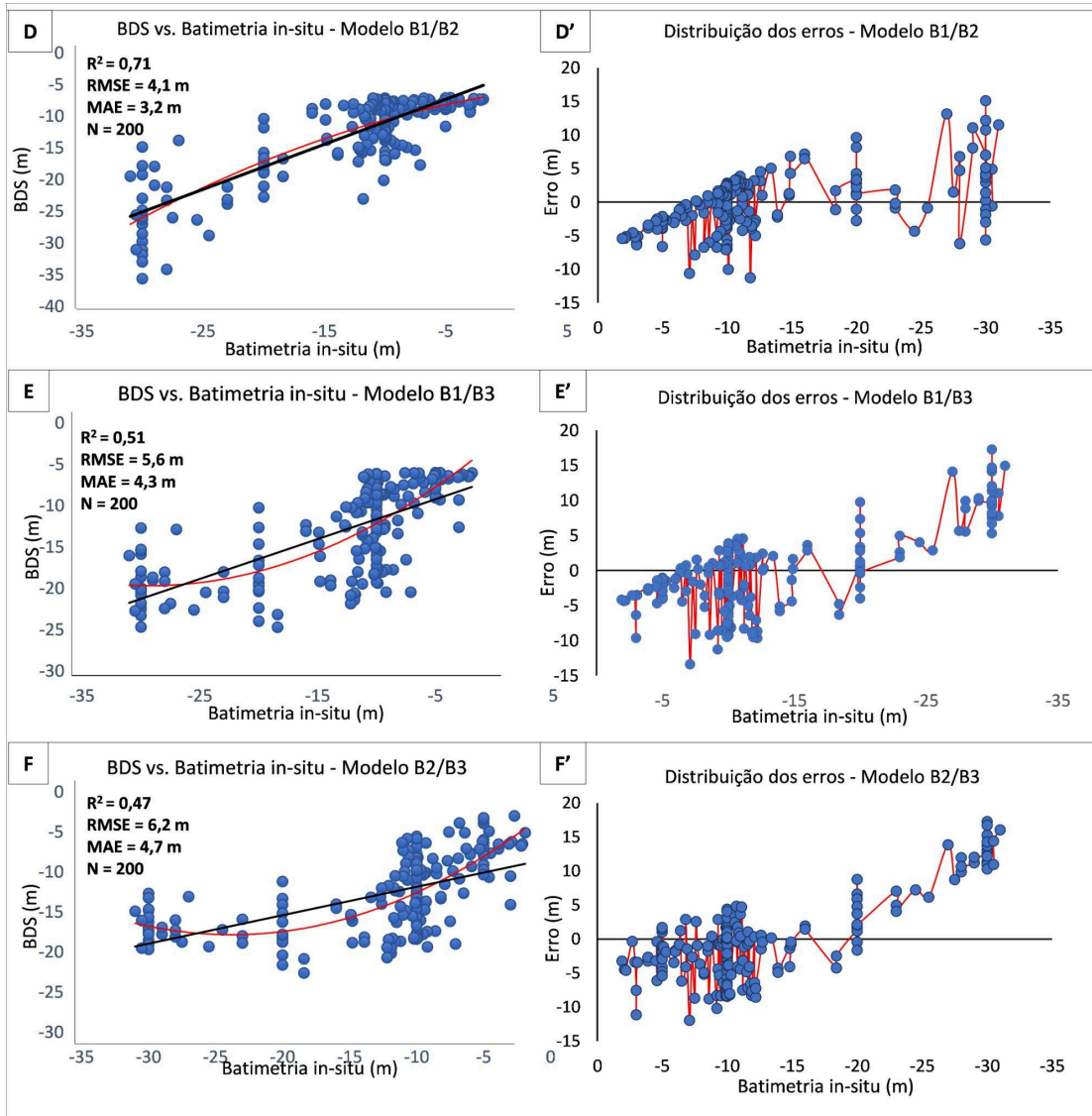


Figura 4: Gráficos de dispersão entre a batimetria empírica (BDS) e a batimetria da carta náutica (D, E, F), e respectivos gráficos de erro por ponto (D', E', F') para os três modelos testados na profundidade de até -30 m do sensor Landsat-8. A linha em vermelho é a linha de tendência com ajuste polinomial, e a linha preta é a linha 1:1.

Nos três casos, foi aplicado um ajuste polinomial de segundo grau. A combinação B1/B2 (Fig. 4D) resultou em uma curva com concavidade voltada para baixo, o que indica que os valores estimados tendem a acompanhar melhor a variação da profundidade até certo ponto, especialmente em áreas rasas a moderadas. Isso pode refletir uma maior estabilidade do modelo nessa faixa, com menor dispersão dos dados em relação à linha de tendência. Já nas combinações B1/B3 (Fig. 4E) e B2/B3 (Fig. 4F), a curvatura da tendência é voltada para cima, o que sinaliza um

comportamento de subestimação crescente conforme a profundidade aumenta. Esse padrão é reforçado pela visualização dos gráficos de erro, nos quais os valores positivos predominam em maiores profundidades — indicando que o modelo está estimando profundidades menores do que as reais.

Os gráficos de erro, por sua vez, revelam a diferença entre a batimetria derivada e a batimetria real ao longo do perfil. Valores positivos indicam subestimação (quando o modelo calcula profundidade

menor do que a real), enquanto valores negativos apontam superestimação (quando o modelo calcula profundidade maior do que a real). Essa representação é fundamental para identificar a direção do erro e sua intensidade em diferentes faixas de profundidade.

Além disso, percebe-se que o modelo B1/B2 (Fig. 3D') apresenta uma distribuição dos resíduos mais simétrica ao redor do eixo zero, o que sugere ausência de viés sistemático ao longo da profundidade, ou seja, isso indica que o modelo não apresenta uma tendência constante de superestimar ou subestimar os valores, ele demonstra equilíbrio na distribuição dos erros ao longo da profundidade. Já os modelos B1/B3 (Fig. 4E') e B2/B3 (Fig. 4F') demonstram maior assimetria nos erros, com predominância de valores positivos em maiores profundidades, evidenciando tendência à subestimação.

É possível verificar que, após a aplicação das equações empíricas, os valores de R2 aumentaram ligeiramente nos modelos B1/B3 e B2/B3, mas permaneceram abaixo dos níveis satisfatórios. Por outro lado, o modelo B1/B2 manteve o mesmo coeficiente de determinação e apresentou os menores

erros, reforçando sua melhor performance e adequação para a estimativa batimétrica da área.

Dessa forma, considerando o melhor desempenho estatístico apresentado, o modelo B1/B2 na faixa de 2 m a 30 m foi selecionado como foco principal deste trabalho. As análises e interpretações subsequentes serão focadas nesse modelo, incluindo a avaliação morfológica da área a partir do modelo final da batimetria derivada, apresentada na próxima seção.

5.1.2 Interpretação morfológica de fundo

A estimativa batimétrica foi realizada com base nas três combinações entre as bandas, conforme descrito anteriormente. Os *rasters* gerados a partir dessas combinações tiveram a aplicação de modelos ajustados com a equação polinomial e resultaram em mapas de distribuição espacial das profundidades estimadas.

A Figura 5 apresenta os mapas obtidos de cada divisão. Pode-se observar diferenças na definição das feições submersas e na suavidade dos resultados conforme a combinação utilizada.

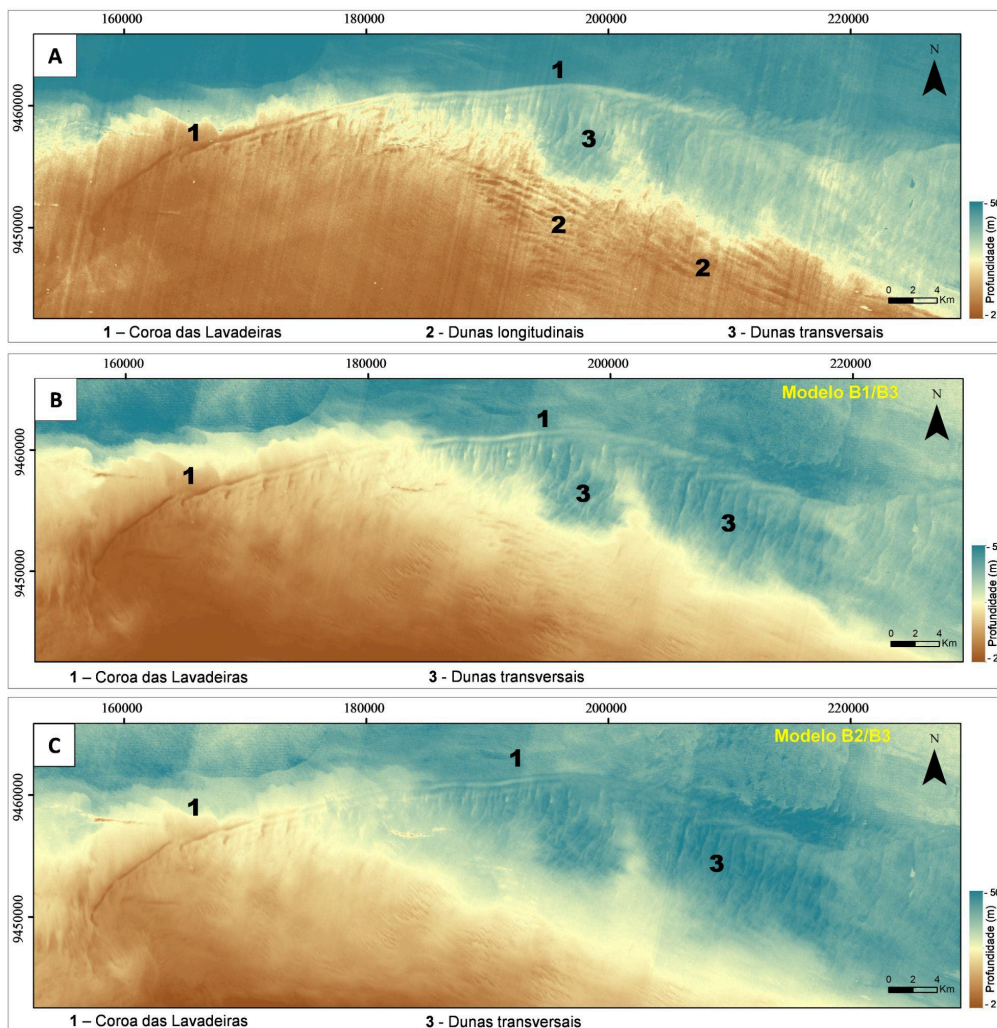


Figura 5: *Rasters* finais da batimetria de cada modelo. Em A, o resultado da divisão entre as bandas B1/B2. Em B, resultado entre as bandas B1/B3. E em C, resultado entre as bandas B2/B3.

Nota-se que, embora todas as divisões apresentem boa nitidez em geral, apenas a divisão B1/B2 (Fig. 5A) mostrou-se mais eficaz na visualização de feições morfológicas marinhas e as demais combinações não evidenciaram essas feições, somente uma parte da Coroa das Lavadeiras como demonstrado nas Figuras 5B e 5C.

A identificação dessas feições foi fundamentada tanto na análise visual dos produtos gerados quanto nas descrições geomorfológicas presentes na literatura sobre a região ou sobre ambientes similares (Vital et al. 2010, 2014, Nascimento Neto et al. 2019, Gomes et al. 2016; 2020). Dentre elas se destacam: (1) O corpo marinho raso isolado, que recebe o nome de “Coroa das Lavadeiras”; (2) Dunas submersas longitudinais, com orientação paralela a linha de costa; e (3) dunas

transversais, dispostas perpendicularmente à linha de costa (Figs. 5 e 6). Esse tipo de aplicação também foi explorado por Da Silveira et al. (2020), que utilizaram a BDS para caracterizar feições submersas em recifes de corais rasos no litoral brasileiro, demonstrando sua importância para interpretação geomorfológica em ambientes tropicais.

Dando continuidade à análise, a Figura 6 apresenta o *raster* final (Fig. 5A) obtido exclusivamente a partir da divisão B1/B2, sobre o qual foram aplicadas curvas batimétricas em intervalos de 5 m e perfis topográficos representados em: Em B (perfil A-B); em C (perfil C-D) e em D (perfil E-F).

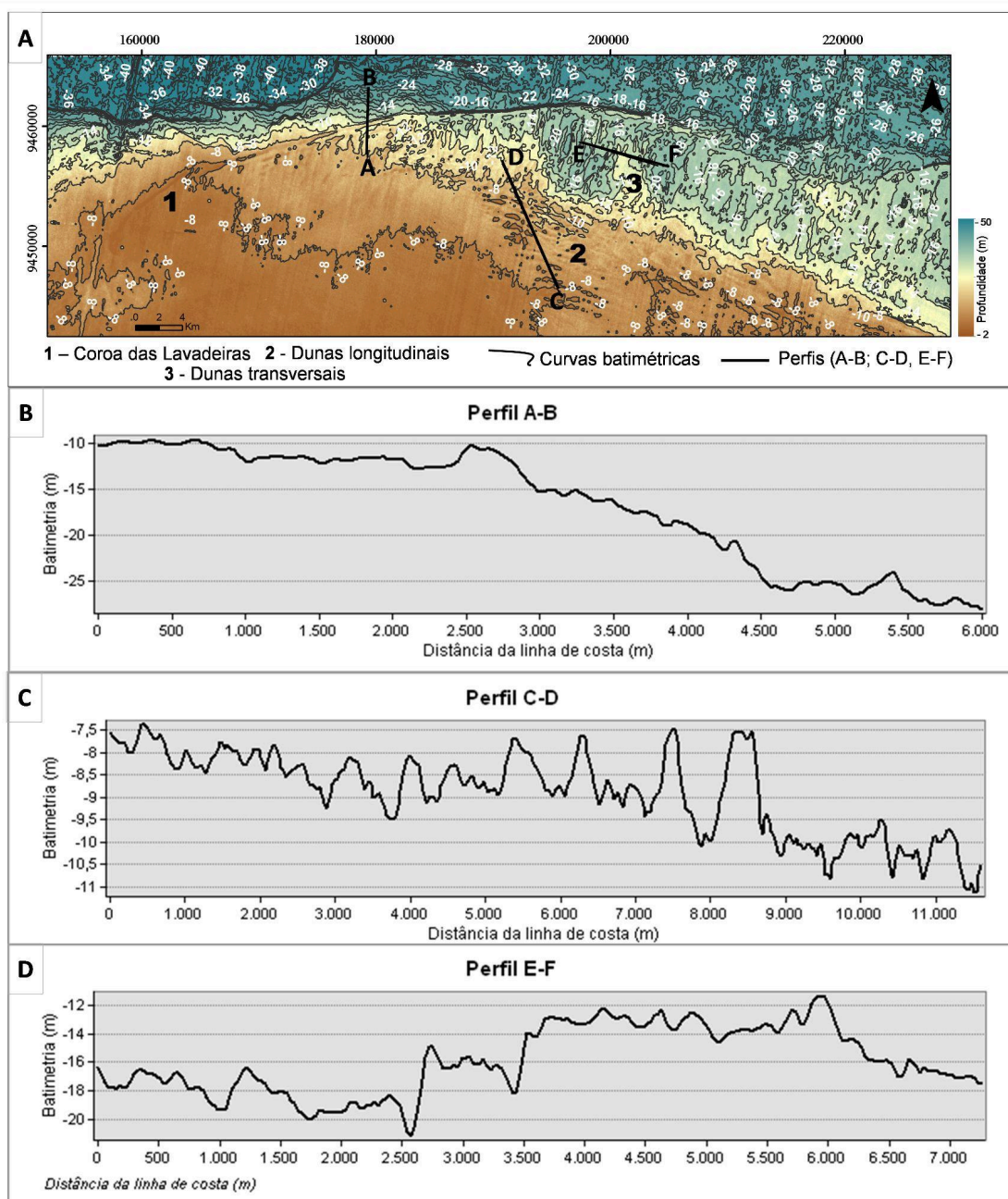


Figura 6: Modelo final da batimetria da área estudada e seus respectivos perfis.

Essa representação potencializou juntamente com as curvas batimétricas a percepção do relevo submerso de acordo com os gradientes de profundidade, reforçando a acurácia espacial da combinação B1/B2. Observa-se que o contorno da “Coroa das Lavadeiras” percorre batimetrias de 10 m, até batimetrias variando de 15 m a 20 m. E as dunas longitudinais e transversais em torno de 10 m a 15m. O gradiente de cores mais quentes representa menores profundidades e as cores mais frias maiores profundidades.

Os três perfis topográficos (Figs. 6B, 6C e 6D) foram gerados a partir do raster final da batimetria (Fig. 6A), eles estão dispostos na área em cortes perpendiculares e paralelos à linha de costa em pontos estratégicos sobre as feições de destaque. O perfil A-B (Fig. 6B) foi traçado ao lado esquerdo da imagem, atravessando a Coroa das Lavadeiras, o perfil C-D (Fig. 6C) ao centro da imagem, cruza as dunas submersas longitudinais e o perfil E-F cruzando as dunas transversais.

O perfil A-B (Fig. 6B) apresenta um pico evidente entre 2,5 e 3 km da distância da linha de costa, correspondente à crista da Coroa das Lavadeiras. Essa elevação isolada reforça a caracterização da coroa como uma estruturada arenosa elevada, contínua e isolada na área. E o perfil C-D (Fig. 6C), evidencia a presença de sucessivas variações de profundidade ao longo do trecho analisado, com destaque ondulações regulares que se estendem até aproximadamente 9 km da linha de costa. Essas ondulações estão associadas às dunas longitudinais submersas, cuja morfologia se revela por meio de alternâncias entre vales e cristas no perfil. E o perfil E-F (Fig. 6D) evidencia também ondulações irregulares associadas as dunas transversais entre vales e cristas. Em seguida, foram elaborados os modelos 3D a partir do raster final - B1/B2. Tais representações permitiram visualizar com maior clareza as principais feições morfológicas da área (Figs. 7A e 7B), reforçando as interpretações realizadas nos perfis anteriores.

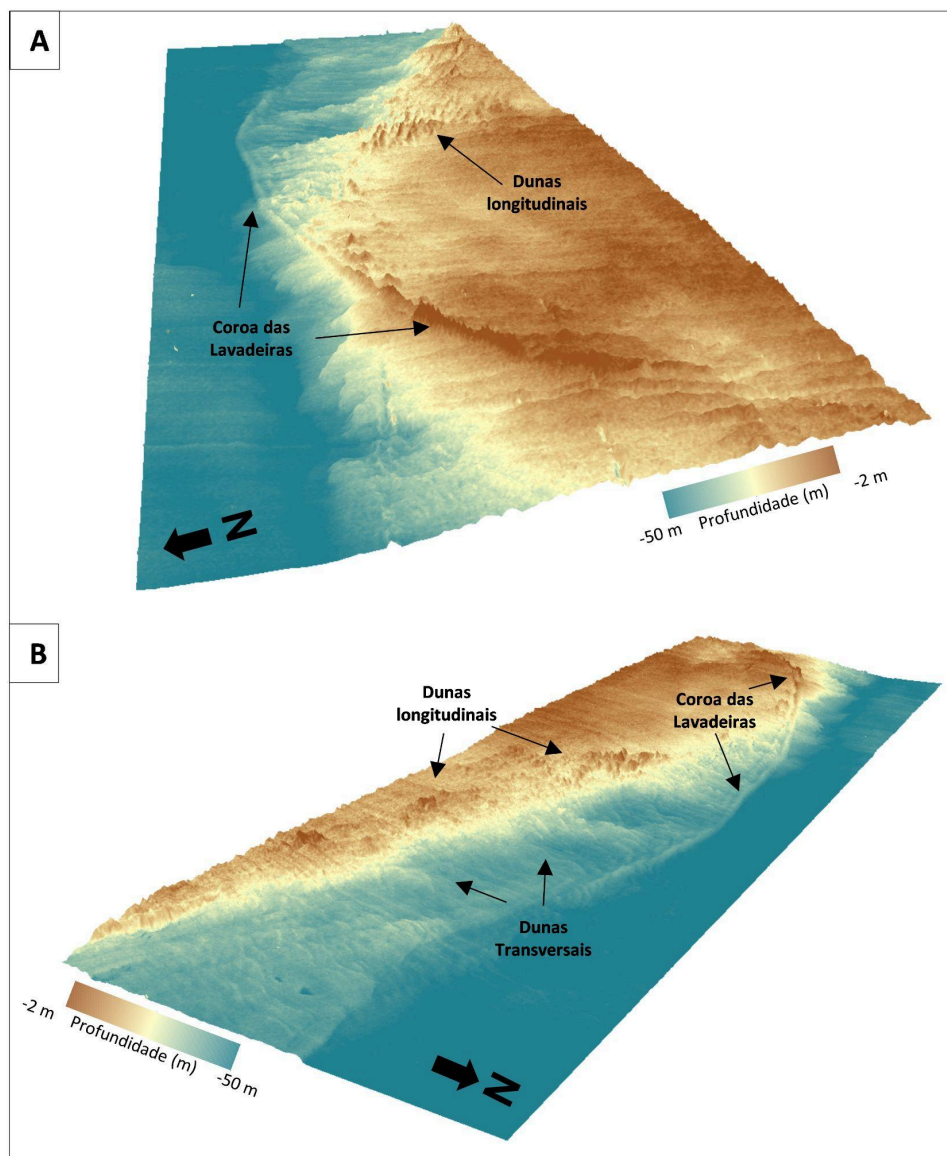


Figura 7: Modelos 3D do raster final da batimetria derivada do sensor Landsat-8 OLI da área estudada mostrando as principais feições de fundo destacadas na imagem.

5.2 Imagens Sentinel-2A MSI

5.2.1 Estimativa batimétrica e validação estatística

Nesta seção, são apresentados os resultados da estimativa batimétrica e da validação estatística obtidos a partir de dois modelos empíricos aplicados às imagens do sensor Sentinel-2A: B2/B4 e B3/B4.

Diferente do sensor Landsat-8, o Sentinel-2A não apresentou bom desempenho com as combinações utilizadas anteriormente, obtendo coeficientes de determinação (R^2) inferiores a 0,2. Por esse motivo, optou-se por incluir a banda 4 (vermelha), buscando alternativas mais satisfatórias.

A estimativa foi realizada considerando uma única faixa de profundidade, entre 2 m e 35 m, que apresentou os melhores resultados para o sensor. Outras faixas também foram testadas, mas os desempenhos permaneceram insatisfatórios, com R^2 baixos. Ainda que os resultados tenham sido inferiores ao Landsat-8, o modelo B3/B4 alcançou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,39$). Já o modelo B2/B4 ($R^2 = 0,26$), sendo por isso desconsiderado nas análises seguintes.

O gráfico de dispersão (Fig. 8) mostra a relação entre a batimetria da carta náutica e os índices espectrais resultantes da divisão B3/B4. Assim como no Landsat-8, foi adotada a equação polinomial de segundo grau para o ajuste do modelo com os dados do Sentinel-2A, visando representar de forma mais precisa a relação não linear entre os dados.

No gráfico de dispersão (Fig. 8), a curva ajustada apresenta tendência descendente, com concavidade voltada para baixo, reflexo do comportamento do modelo polinomial ajustado, que busca capturar a variação dos valores de reflectância em função da profundidade. Essa combinação apresenta um R^2 considerado moderado para o estudo. Embora não seja considerado robusto, o resultado ainda mostra uma tendência de relação entre os índices e a profundidade, podendo ser explorado de forma complementar na batimetria derivada e na caracterização do relevo.

Tabela 2: Estatísticas de validação dos modelos empíricos de batimetria derivada pela faixa de profundidade testada para o sensor Sentinel-2A.

Sensor	Intervalo de Profundidade (m)	Modelo	R^2	RMSE (m)	MAE (m)	MARD (%)
Sentinel-2A	2 a 35	B2/B4	0,26	7,0	5,2	55
		B3/B4	0,39	6,4	4,9	46

Em relação aos dados estatísticos, os menores erros, tanto absolutos quanto percentuais, foram observados na combinação B3/B4, como era o esperado. Mesmo com um desempenho moderado, os resultados obtidos ainda permanecem inferiores comparados ao sensor Landsat-8 com a combinação B1/B2 na faixa de 2 m a 30 m.

Os gráficos a seguir (Fig. 9), são resultantes da dispersão entre a batimetria derivada dos modelos (BDS) versus batimetria da carta náutica e o gráfico de

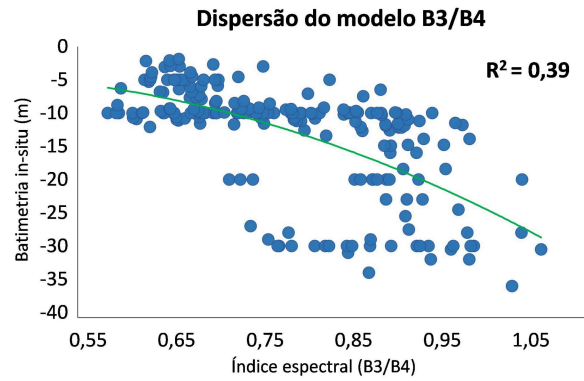


Figura 8: Gráfico de dispersão entre a batimetria da carta náutica e os índices espectrais resultante da divisão entre as bandas B3/B4, para a profundidade de até -30 m do sensor Sentinel-2A.

A tabela 2, apresenta os dados estatísticos calculados a partir do R^2 na faixa de profundidade testada. Nota-se, que a combinação B3/B4 apresentou o maior valor de R^2 , indicando maior sensibilidade à variação batimétrica na área estudada. Esse resultado pode estar relacionado à maior penetração da banda verde (B3) em águas rasas, somada à resposta espectral da banda vermelha (B4), que, embora apresente menor penetração na coluna d'água, possui maior contraste radiométrico com os dados de profundidade em determinadas condições ambientais, como fundo arenoso e baixa turbidez. A escolha da B4 também se justifica pela sua resolução espectral e estabilidade em registros ópticos no sensor Sentinel-2A, sendo frequentemente adotada em estudos de batimetria derivada (Lyzenga 1978, Stumpf et al. 2003, Jagalingam et al. 2015).

Ainda que a banda azul (B2) seja comumente mais utilizada nesse tipo de estudo por sua maior penetração na água, no presente trabalho, a combinação B2/B4 não apresentou desempenho satisfatório, provavelmente devido à maior sensibilidade da B2 a ruídos atmosféricos residuais, mesmo após a correção atmosférica. Isso pode ter comprometido a estabilidade espectral necessária para uma boa relação com os dados de profundidade na área analisada

erro correspondente, evidenciando a acurácia do modelo.

O gráfico de dispersão (Fig. 9A) apresenta uma curva polinomial com concavidade voltada para cima, resultante do ajuste de segundo grau ao modelo. Com esse ajuste, o R^2 aumentou de 0,39 para 0,43, indicando uma leve melhora na explicação da variabilidade dos dados. Observa-se uma maior concentração de pontos na faixa de profundidade entre 0 e 15 m, enquanto valores mais profundos apresentam dispersão mais acentuada,

refletindo uma menor precisão do modelo nesses intervalos.

Já o gráfico de erros (Fig. 9A') mostra uma concentração de pontos entre 0 e cerca de 20 m com algumas oscilações, evidenciando uma tendência de superestimação nessa faixa – ou seja, o modelo estimou profundidades maiores que as reais. E após 20 m

aproximadamente, revela uma inversão de comportamento, que passam a assumir valores positivos, uma tendência de subestimação crescente conforme a profundidade aumenta. Esse padrão reforça a limitação do modelo em representar com precisão as profundidades mais elevadas da área estudada.

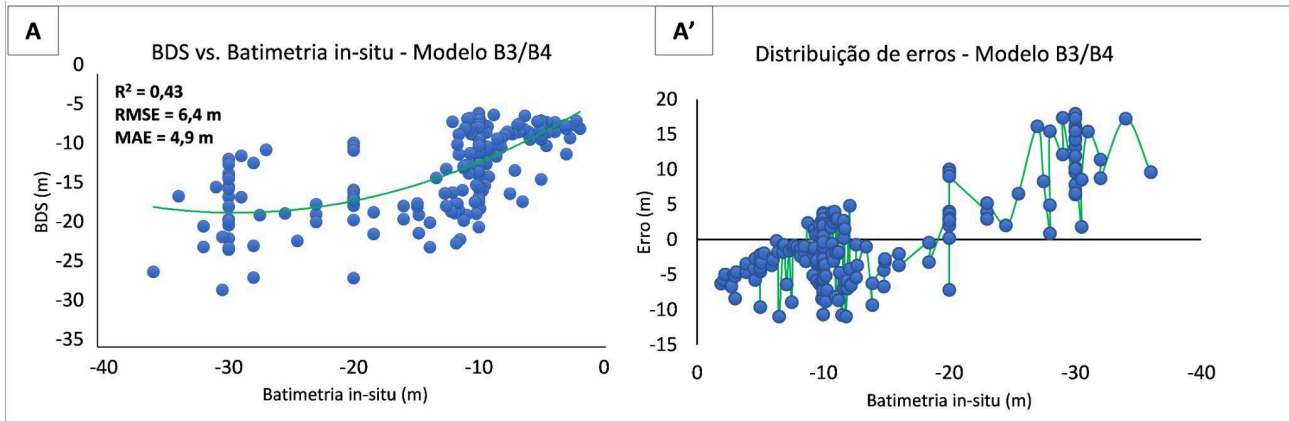


Figura 9: Gráficos de dispersão entre a batimetria empírica (BDS) e a batimetria da carta náutica (A), e o respectivo gráfico de erro por ponto (A') para o modelo testado na profundidade de até 35 m do sensor Sentinel-2A.

5.2.2 Interpretação morfológica – Sentinel-2A

Apesar do modelo gerado a partir do Sentinel-2A - B3/B4 - ter permitido a identificação visual das principais feições da área – como a Coroa das Lavadeiras, as dunas longitudinais e as dunas transversais (Fig. 10) – observou-se uma limitação significativa quanto à representação das áreas mais profundas. A análise do *raster* final evidencia que a maior parte da imagem foi classificada com valores de

batimetria rasa, apresentando um gradiente de coloração concentrado nas tonalidades terrosas e amareladas. Já os tons azulados, que indicam maiores profundidades, aparecem de forma muito reduzida, o que indica uma tendência de o modelo subestimar a batimetria real. Essa limitação pode ser visualmente interpretada a partir da escala de cores ao se comparar com a imagem do Landsat-8, que apresentou uma distribuição mais coerente com a profundidade real da área.

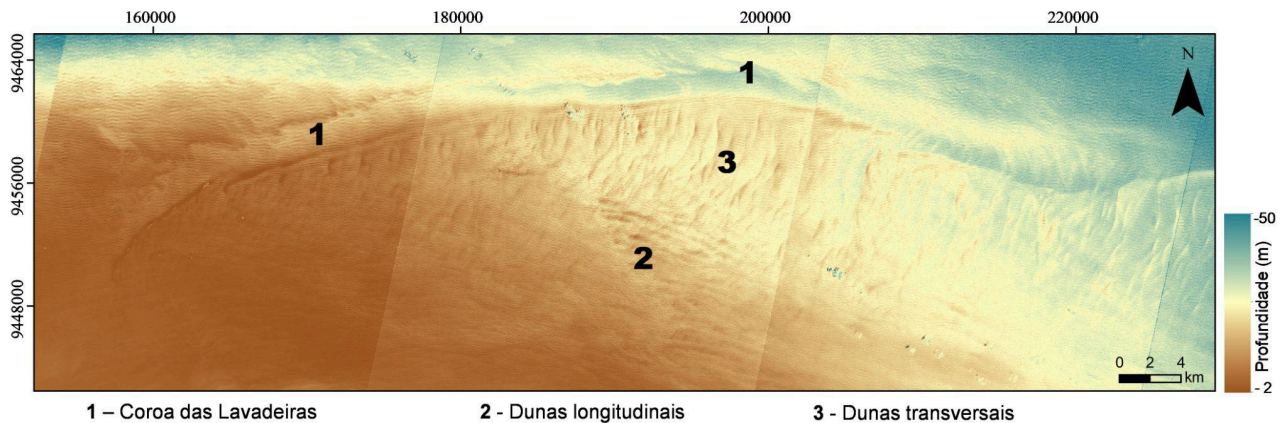


Figura 10: Raster final da batimetria obtido pelas imagens do sensor Sentinel-2A.

Além disso, foram testados perfis batimétricos nos mesmos locais utilizados no modelo do Landsat. No entanto, os resultados se mostraram pouco representativos, com linhas extremamente granudas e instáveis, sugerindo ruídos na superfície do raster. O perfil gerado apresentou bastante oscilações constantes em curtos intervalos, o que dificultou evidenciar a presença de elevações ou depressões marcantes, como a crista da Coroa das Lavadeiras, que pode ser visualizada com maior nitidez no modelo do Landsat. Esse

comportamento reforça as limitações do modelo na representação contínua da superfície subaquática, o que inviabilizou a geração de produtos derivados como perfis e modelos tridimensionais, os quais não serão apresentados aqui. Mas, ainda assim, a aplicação do modelo mostrou-se válida como exercício metodológico, evidenciando seus limites e possivelmente um melhor resultado potencial em cenários de águas rasas.

A análise dos resultados evidencia que os ruídos presentes nas imagens de satélite exerceram influência

direta na estimativa batimétrica. No caso do Landsat, os resultados mostraram desempenho mais consistente, com valores de R^2 relativamente elevados e erros estatísticos (RMSE e MAE) em níveis aceitáveis, indicando que o sensor foi capaz de captar a variação batimétrica com maior fidelidade. Ainda assim, verificaram-se interferências ligadas ao ruído da imagem, sobretudo em profundidades maiores, onde a atenuação do sinal reduz a penetração das bandas azul e verde, levando a desvios e aumento do erro. E fatores como, variações na turbidez e na heterogeneidade do fundo também podem contribuir para a dispersão em setores específicos.

O resultado das imagens do sensor Sentinel-2A MSI, observou-se maior dispersão dos valores e inversão de profundidades em alguns setores, reflexo de fatores como turbidez da coluna d'água, variação atmosférica residual após a correção, mistura espectral de diferentes tipos de fundo e limitações radiométricas do sensor. Esses ruídos resultaram em baixos valores de R^2 (inferiores a 0,50 em determinados cenários) e aumento dos erros absolutos (RMSE e MAE), indicando que parte significativa da variabilidade observada não foi explicada pelo modelo. Esses aspectos comprometeram

Tabela 3: Comparação do desempenho dos modelos de Batimetria derivada de satélite (BDS) obtidos a partir dos sensores Landsat-8 OLI e Sentinel-2A MS

Critério	Landsat-8 OLI	Sentinel-2A MSI
Acurácia geral (RMSE, MARD, MAE, R^2)	Melhor desempenho estatístico no até 30 m; RMSE e MAE menores; R^2 estável e consistente.	Acurácia inferior; maior variação dos erros; R^2 menos consistente.
Visualização das feições	Melhor definição; menos ruídos; feições contínuas e coerentes espacialmente.	Feições visíveis, mas com profundidades distorcidas
Profundidade efetiva	Confiável até ~30 m; profundidades maiores começam a perder acurácia, mas ainda apresentam alguma coerência.	Profundidade efetiva menor; perda de resposta óptica mais cedo, limitando o detalhamento morfológico.
Estabilidade dos modelos	Modelos mais estáveis; comportamento espectral das bandas consistente; menor sensibilidade ao ruído.	Modelos instáveis; maior sensibilidade à variação espectral da água e do substrato;
Ruídos e interferências	Menores ruídos após a correção; comportamento mais suave e coerente do índice batimétrico.	Muito ruído mesmo após correção; presença de pixelização, manchas e padrões não naturais.
Conclusão geral	Sensor mais adequado, apresentando melhor desempenho para BDS na área de estudo	Sensor útil, mas com resultados limitados para a área

Considerando tais limitações, diferentes estudos têm apontado alternativas metodológicas capazes de aprimorar a BDS. Entre elas, destaca-se a integração de técnicas de aprendizado de máquina, como demonstrado por Othman et al. (2024), cuja aplicação resultou em valores de R^2 superiores a 0,98 em águas muito rasas. Esses avanços evidenciam que abordagens híbridas podem ampliar a precisão da estimativa batimétrica e reduzir restrições associadas às variáveis ópticas.

De forma complementar, Mudiyanse et al. (2022) apresentaram que a aplicação de algoritmos de

o ajuste do modelo e limitaram a confiabilidade da batimetria derivada com esse sensor.

Resultados semelhantes foram relatados por Gulher & Alganci (2023), que, ao compararem imagens dos sensores Gokturk-1, Landsat-8 e Sentinel-2, observaram melhor desempenho do Sentinel em águas rasas, porém com aumento dos erros em maiores profundidades, enquanto o Landsat manteve maior estabilidade em faixas mais profundas, mesmo com o uso de algoritmo distinto de correção atmosférica (ATCOR). Assim, embora o Landsat tenha apresentado melhor desempenho geral, ambos os sensores demonstraram sensibilidade a ruídos intrínsecos do ambiente costeiro tropical, destacando a necessidade de interpretação cautelosa e do uso de dados de campo para validação.

De forma a sintetizar os resultados obtidos neste estudo e facilitar a comparação entre os sensores avaliados, a Tabela 3 apresenta um resumo do desempenho dos modelos de batimetria derivada de satélite gerados a partir das imagens Landsat-8 OLI e Sentinel-2A MSI, considerando os principais indicadores estatísticos, o nível de ruído observado e a aplicabilidade de cada sensor à área de estudo.

aprendizado de máquina, combinada à otimização das bandas do Sentinel-2, pode elevar substancialmente a acurácia em águas rasas. Apesar das diferenças metodológicas, esses resultados evidenciam o potencial de integração entre abordagens empíricas e computacionais em estudos futuros.

Resultados semelhantes foram discutidos por Wicaksono et al. (2023), que demonstraram que o emprego de sensores de maior resolução espacial e espectral, como o WorldView-2, mesmo quando associado a modelos de aprendizado de máquina, não

implica necessariamente em melhorias significativas no desempenho da batimetria derivada em ambientes opticamente complexos. Esse comportamento reforça que, em contextos como o da plataforma continental do Rio Grande do Norte, as limitações impostas pelas condições ópticas da água e pela heterogeneidade do fundo podem superar os ganhos proporcionados por avanços tecnológicos, evidenciando que o desempenho da BDS está fortemente condicionado ao ambiente de aplicação.

5. Conclusões

O presente trabalho avaliou a Batimetria Derivada de Satélite (BDS) a partir dos sensores Landsat-8 OLI e Sentinel-2A MSI na plataforma continental adjacente ao município de Caiçara do Norte, Rio Grande do Norte. Ambos os sensores permitiram a identificação visual de feições morfológicas, como a Coroa das Lavadeiras e dunas submersas. Contudo, a análise comparativa dos rasters e dos indicadores estatísticos (Tab.3) evidenciou desempenho superior do Landsat-8, que apresentou menor nível de ruído e maior estabilidade espacial. Os modelos gerados com o Sentinel-2A, embora capazes de representar as feições, exibiram maior variabilidade e ruído, o que limita sua aplicação quantitativa para a estimativa batimétrica na área de estudo. Os indicadores estatísticos obtidos apontam para uma correlação moderada entre as profundidades estimadas e os dados de referência, indicando que a BDS, nas condições analisadas, apresenta maior adequação para análises exploratórias e comparativas do que para aplicações batimétricas operacionais. Por sua vez, os melhores resultados foram obtidos com a combinação B1/B2 do Landsat-8 OLI (Fig. 4A), na faixa de -2 a -30 m, alcançando R^2 de 0,71, RMSE de 4,1 m, MAE de 3,2 m e MARD de 35,5%. Apesar da influência de fatores ambientais (turbidez, partículas em suspensão) e das limitações dos dados de validação, os índices de acurácia foram compatíveis com estudos anteriores, reforçando a aplicabilidade da técnica em áreas com relativa homogeneidade óptica.

Os produtos cartográficos gerados, mapas batimétricos, perfis topográficos e os modelos tridimensionais, evidenciam o potencial da BDS como ferramenta complementar aos levantamentos hidrográficos tradicionais. Essa metodologia apresenta potencial para aplicação em etapas preliminares de mapeamento marinho, oferecendo subsídios importantes ao processo de planejamento espacial marinho em curso no Brasil

Recomenda-se, para estudos futuros, a aplicação da técnica em outros setores da plataforma equatorial brasileira, integrando-a a dados acústicos e ambientais, bem como a exploração de outros sensores, modelos empíricos, semiempíricos e de aprendizado de máquina.

Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Tecnológico (CNPq) pela bolsa MPG (PQ.: 302375/2022-8). Por fim, expressamos

nossa gratidão aos revisores anônimos e à equipe (CAPES) pela bolsa DJNR e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e editorial da revista pela atenção e cuidado dedicados ao nosso trabalho.

Declaração de autoria

D.J.N.R.: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Validation, Visualization, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing

M.P.G.: Conceptualization, Project administration, Methodology, Resources, Writing – Review & Editing, Supervision, Validation

P.V.N.A.: Writing – Review & Editing, Writing – Review

Referências

- ARAÚJO P.V.N., AMARAL R.F. 2016. Mapping of coral reefs in the continental shelf of Brazilian Northeast through remote sensing. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v. 16, p. 5-20. DOI: <http://dx.doi.org/10.5894/rci629>
- ASHPHAQ M., SRIVASTAVA P. K., MITRA D. 2021. Review of near-shore satellite derived bathymetry: classification and account of five decades of coastal bathymetry research. *Journal of Ocean Engineering and Science*, [S.l.]. v. 6, 10-101p.
- CABALLERO I., STUMPF R.P. 2019. Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-2A and 2B satellites in South Florida coastal waters. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 226, 106277. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106277>
- CHAVEZ P. S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, v. 24, n. 3, p. 459-479, abr. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)
- DAMASCENO U.M., CINTRA M.M., GOMES M.P., VITAL H. 2022. Interactions between the North Brazilian Undercurrent (NBUC) and the Southwest Atlantic Margin. Implications for Brazilian shelf-edge systems. *Regional Studies in Marine Science*. V. 54, 102486.
- DA SILVEIRA et al. 2020. Multiresolution Satellite-Derived Bathymetry in Shallow Coral Reefs: Improving Linear Algorithms with Geographical Analysis. *Bio One Digital Library*. URL: <https://doi.org/10.2112/ICOASTRES-D-19-00029.1>
- DUAN Z., CHU S., CHENG L., JI C., LI M., SHEN W. 2022. Satellite-derived bathymetry using Landsat-8 and Sentinel-2A images: assessment of atmospheric correction algorithms and depth derivation models in shallow Waters. *Optics Express*. Vol. 30. No 3. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.444557>
- FIERN. RN tem potencial eólico duplicado e um oásis offshore e solar, mostra Atlas do Governo e FIERN. Disponível em: <https://www.fiern.org.br/rn-tem-potencial-eolico-duplicado-e-um-oasis-offshore-e-solar-mostra-atlas-governo-e-fiern>. Acesso em: 12 de jun. de 2025
- FREIRE R.R. 2017. Evaluating Satellite Derived Bathymetry in Regard to Total Propagated Uncertainty, Multi-Temporal Change Detection, and Multiple Non-Linear Estimation. Dissertação de Doutorado, University of New Hampshire, Durham. Disponível em: <https://scholars.unh.edu/dissertation/2281/>
- GODWIN B. 2021. Penetration of Visible Radiation from Sunlight through Water. University of Minnesota Sea Grant Program.
- GOMES M.P., VITAL H., BEZERRA F.H.R., CASTRO D.L., MACEDO J.W.P. 2014. The interplay between structural inheritance and morphology in the Equatorial Continental Shelf of Brazil. *Marine Geology*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.06.002>
- GOMES M. P., VITAL H., EICHLER P.P.B., GUPTA B.K.S. 2015. The investigation of a mixed carbonate-siliciclastic shelf, NE Brazil side-scan sonar imagery, underwater photography, and surface-sediment data. *Società Geologica Italiana*, Roma. DOI: <https://doi.org/10.3301/IIG.2014.08>. 9-22p.

- GOMES M.P.; VITAL H.; STATTEGGER K.; SCHWARZER K. 2016. Controle de leito rochoso na morfologia e sedimentação do Vale Inciso do Assu na plataforma equatorial brasileira. *International Journal of Sediment Research*, v. 31, n. 2, 181-193p.
- GOMES M. P. VITAL H., DROXLER A. W. 2020. Terraces, reefs, and valleys along the Brazil northeast outer shelf: deglacial sea-level archives? *Geo-Marine*. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00367-020-00666-4>
- GÜLHER E.; ALGANCI U. 2023. Satellite-Derived Bathymetry in Shallow Waters: Evaluation of Gokturk-1 Satellite and a Novel Approach. *Remote Sensing*. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15215220>
- HARRIS P.T.; MACMILLAN-LAWLER M.; RUPP J.; BAKER E.K. 2014. Geomorphology of the oceans. *Marine Geology* 352:4-24
- INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION – IHO. Guidance to Satellite-Derived Bathymetry. 2024 Bathymetric Publications. Disponível em: https://iho.int/uploads/user/pubs/bathy/B_13_Ed100_032024.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.
- JAGALINGAM P., AKSHAYA B. J., ARKAL V.H. 2015. Bathymetry Mapping Using Landsat 8 Satellite Imagery. *Procedia Engineering* 116. 8th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2015). p. 560 – 566.
- KINZEL P.J., LEGLEITER C.J., NELSON J.M. 2013. Mapping river bathymetry with a small footprint green lidar: Applications and challenges. *JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION*. Vol. 19. P. 183-204.
- LYZENGA D.R. 1978. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics* 17:379-383p.
- MOREIRA D.A. GOMES M.P. VITAL H. 2019. Sedimentação rasa da plataforma de Natal e implicações da erosão costeira, NE do Brasil. *Cartas Geo-Marinas*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00594-y>
- MATOS M.F. A., SCUDELARI A.C., AMARO V.E. 2022. Variabilidade Interanual do Potencial Energético das Ondas Oceânicas na Costa Setentrional do Rio Grande do Norte, Atlântico Equatorial Sul. *Anuário do Instituto de Geociências*. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_45_46460
- MUDIYANSELAGEA S.S.J.D., ABD-ELRAHMANA A.; WILKINSON V., LECOUSA. 2022. Satellite-derived bathymetry using machine learning and optimal Sentinel-2 imagery in South-West Florida coastal Waters. *GISCIENCE & REMOTE SENSING*. VOL. 59, NO. 1, 1143-1158 p. DOI: <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2100597>
- NASCIMENTO NETO F.C, VITAL H., ARAÚJO I.R.F., GOMES M.P. 2019. Sand Ridges Field in the North Inner Shelf of Rio Grande do Norte, Adjacent to Galinhos-Guamaré, Brazil. In *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ* (Vol. 42, Issue 2, pp. 50-58). Instituto de Geociências - UFRJ. DOI: https://doi.org/10.11137/2019_2_50_58
- OTHMAN A.A., ALI S.S., OBAID A. K., SARKAWT G.S., AL-KAKEY O., AL-SAADY Y.I., LATIF S. D., LIESENBERG V., NETO S. L. R., BREUNIG F. M., HASAN S. E. 2024. Satellite-derived shallow water depths estimation using remote sensing and artificial intelligence models, a case study: Darbandikhan Lake Upper, Kurdistan Region, Iraq. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101432>
- PIANCA C., MANZZINI P.L.F., SIEGLE E., 2010. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Braz. J. Oceanogr.* 58 (1), p53e70.
- POURSANIDIS D., TRAGANOS D., CHRYSOULAKIS N., REINARTZ P. 2019. Cubesats Allow High Spatiotemporal Estimates of Satellite-Derived Bathymetry. *Remote Sensing* 11:1299. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11111299>
- TESTA V., BOSENCE D.W.J. 1998. Sedimentação carbonato-siliciclástica em rampa tropical de alta energia voltada para o oceano, NE do Brasil. In: WRIGHT, V. P.; BURCHETTE, T. P. (Eds.). *Rampas de carbonato*, vol 149. *Geol. Soc. London spec. Pub.*, 55-71p.
- RIBEIRO F., PIMENTA F.M., VITAL H. 2018. Inner Shelf Currents Off Ponta Negra Beach, Natal, Rn, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica* 36(1):43-58. <https://doi.org/10.22564/v36i1.841>
- ROSSO T.C.A. 2007. Gestão integrada em bacias hidrográficas costeiras. In: *WORKSHOP SOBRE HIDRODINÂMICA COSTEIRA - AMIGOS DE BOUSSINESQ*, 1. Anais... Vitória: UFRJ, 2007, v. 1, p. 1-7.
- NASCIMENTO SILVA, L. L., GOMES M. P., VITAL H. 2018. The Açú Reef morphology, distribution, and inter reef sedimentation on the outer shelf of the NE Brazil equatorial margin. *Continental Shelf Research*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.03.011>
- NASCIMENTO SILVA, L. L., GOMES M. P., EICHLER P. P. B., VITAL H. 2024. Late Holocene geochemical signature of inter reef mixed sediments on the northeastern Brazilian outer shelf. *Quaternary and Environmental Geosciences*. DOI: <https://dx.doi.org/10.5380/qeg.v15i0.95563>
- SILVEIRA I. C. A., SCHIMIDT A. C. K., CAMPOS E. J. D., GODOI S.S., IKEDA Y. 2000. A Corrente do Brasil ao largo da Costa Leste Brasileira. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. p171-183.
- STUMPF R.P. HOLDERIED K. SINCLAIR M. 2003. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, v. 48, n. 1part2, p. 547-556, jan. DOI: https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.1b_part_2.0547
- VANHELLEMONT Q., RUDDICK K. 2014. Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*, v. 145, p. 105-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.009>
- VANHELLEMONT Q., RUDDICK K. 2015. Advantages of high-quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8. *Remote Sensing of Environment*, v. 161, p. 89-106, maio. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.007>
- VANHELLEMONT Q., RUDDICK K. 2016. Acolite for Sentinel-2: Aquatic Applications of MSI Imagery. [s.l.: s.n.]. Disponível em: https://odnature.naturalsciences.be/downloads/publications/2016_Vanhellemont_ESALP.pdf. Acesso em: 30 abr. 2025.
- VANHELLEMONT Q. 2019. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. *Remote Sensing of Environment*. 225:175-192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010>
- VIANA-BORJA S.P., GONZÁLEZ-VILLANUEVA R., ALEJO I., STUMPF R.P., NAVARRO G., CABALLERO I. 2025. Satellite-derived bathymetry using Sentinel-2 in mesotidal coasts. *Coastal Engineering* 195:104644
- VITAL H., STATTEGGER K., AMARO V. E., FRAZÃO E. P., TABOSA W. F., SILVEIRA I. M. 2008. Plataforma moderna siliciclástica-carbonatada de alta energia: plataforma continental adjacente ao norte do estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. In: HAMPSON, G.; STEEL, R.; BURGESS, P.; DALRYMPLE, R. (Eds.). *Avanços recentes em modelos de estratigrafia marinha rasa siliciclástica*. Edição especial 90 da SEP, pp. 175-188. DOI: <https://doi.org/10.2110/pec.08.90.0177>
- VITAL H., GOMES M. P., TABOSA W. F., FRAZÃO E. P., SANTOS C. L. A., PLÁCIDO JÚNIOR J.S. 2010. Caracterização da Plataforma Continental Brasileira adjacente ao Estado do Rio Grande do Norte, NE do Brasil. *Braz J Oceanogr.*, v. 58, spe1, 43-54p.
- WICAKSONO, P.; HARAHAP, S. T.; 2023. Hendriana, R. Satellite-derived bathymetry from WorldView-2 based on linear and machine learning regression in the optically complex shallow water of the coral reef ecosystem of Kemujan island. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101432>