



SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROGRAFIA 2024



“A Hidrografia no contexto da Economia do Mar Brasileiro”

AVANÇOS E APLICAÇÕES DA BATIMETRIA DERIVADA DE SATÉLITE

A batimetria derivada de satélite, também conhecida como *Satellite-Derived Bathymetry* (SDB) surgiu como uma ferramenta essencial para mapear a topografia submersa de maneira eficiente e econômica. Desde o início da exploração espacial, a capacidade de utilizar satélites para medir a profundidade da água evoluiu significativamente, iniciando com métodos simples de interpretação de imagens até as sofisticadas técnicas de sensoriamento remoto utilizadas atualmente.

Nos anos 80, os primeiros esforços para mapear a batimetria com imagens de satélite baseavam-se em modelos empíricos. Esses modelos correlacionavam a reflectância espectral da água com a profundidade, utilizando principalmente imagens multiespectrais. Métodos como o modelo de Stumpf utilizam a razão de bandas específicas para estimar a profundidade da água, especialmente em águas claras e rasas. O Sentinel-2, Landsat 7, 8 e 9, PlanetScope, dentre outros, com suas bandas multiespectrais, são frequentemente usados nesses métodos, empregando principalmente as bandas azul (B2), verde (B3) e infravermelho para calcular a profundidade com precisão de cerca de 1 metro em águas pouco turvas, e com profundidades de até 10 metros (Evagorou et al., 2022).

Com o avanço da tecnologia, métodos físicos começaram a ser desenvolvidos, modelando a propagação da luz na coluna d'água. Esses métodos empregam princípios de transferência radiativa para calcular a profundidade da água, proporcionando maior precisão em diversas condições de água. As imagens hiperespectrais, como as fornecidas pelo sensor PRISMA, são particularmente eficazes nesses métodos devido ao seu detalhamento espectral (Wang et al., 2023). A inversão da batimetria utilizando essas imagens envolve a análise de múltiplas bandas espectrais para identificar as propriedades da coluna d'água e do fundo marinho, ajustando modelos físicos complexos para calcular a profundidade. Os métodos físicos baseiam-se na interação da luz com a água e o fundo marinho. A equação de radiância no topo da atmosfera (L_{TOA}) é uma das principais equações usadas nesses métodos e pode ser expressa como (Equação 1):

$$L_{TOA}(\lambda) = Lr(\lambda) + t(\lambda)[Lw(\lambda) + Lb(\lambda)e^{-k(\lambda)H}] \quad (1)$$

Onde:

$L_{TOA}(\lambda)$ - radiância medida pelo satélite na banda λ .

$Lr(\lambda)$ - radiância refletida pela atmosfera.

$t(\lambda)$ - fator de transmissão atmosférica.

$Lw(\lambda)$ - radiância da coluna d'água.

$Lb(\lambda)$ - radiância refletida pelo fundo.

$k(\lambda)$ - coeficiente de atenuação da luz na água.

H - profundidade da água.

Já a inversão da batimetria utilizando essas imagens envolve a análise de múltiplas bandas espectrais para identificar as propriedades da coluna d'água e do fundo marinho, ajustando modelos físicos complexos para calcular a profundidade. Por exemplo, a reflectância da água ($R_w(\lambda)$) pode ser modelada como (Equação 2):

$$R_w(\lambda) = \frac{A(\lambda)e^{-k_d(\lambda)H}}{1 - \rho(\lambda)e^{-k_d(\lambda)H}} \quad (2)$$

Onde:

$A(\lambda)$ - fator de escala dependente das propriedades ópticas da água.

$k_d(\lambda)$ - coeficiente de atenuação difusa.

$\rho(\lambda)$ - reflectância do fundo.



SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROGRAFIA 2024



"A Hidrografia no contexto da Economia do Mar Brasileiro"

Esse método, quando aplicado corretamente, pode fornecer precisões ainda melhores que os métodos empíricos, com incertezas inferiores a 1 metro para águas de até 12 metros de profundidade (Kim et al., 2024).

A cinemática de ondas é outra técnica inovadora utilizada para derivar a batimetria a partir de imagens de satélite. Este método analisa a propagação e a interação das ondas com o fundo marinho para estimar a profundidade. Imagens de alta resolução temporal, como as do sensor WorldView-2, são essenciais para capturar as dinâmicas das ondas e melhorar a precisão batimétrica. A técnica envolve a detecção e rastreamento de padrões de ondas na superfície do mar, correlacionando essas observações com a profundidade subjacente. A relação entre a velocidade de fase das ondas (c) e a profundidade da água (h) é dada pela equação da cinemática de ondas em águas rasas (Equação 3):

$$c = \sqrt{gh} \quad (3)$$

Onde:

c - velocidade de fase da onda.

g - aceleração devido à gravidade.

h - profundidade da água.

Além disso, o sistema ICESAT-2, lançado em 2018, revolucionou a obtenção de dados batimétricos com o *Advanced Terrain Laser Altimeter System* (ATLAS). O ICESAT-2 utiliza um altímetro laser para medir a elevação do terreno e a profundidade da água com alta precisão. O sistema ATLAS é capaz de detectar a refletância do fundo do mar em águas claras, proporcionando dados de elevação precisos com o sensor ATL03. A predição da profundidade com o ICESAT-2 envolve a análise dos pulsos de laser verde (~532 nm) refletidos de volta para o satélite. Esses dados são então ajustados para refração na interface ar-água e compensados por efeitos atmosféricos para calcular a profundidade (Coveney et al., 2021)

Destaca-se que os métodos de batimetria derivada de satélite continuam a evoluir. Inovações em *machine learning* e *deep learning* estão aprimorando a precisão e a aplicabilidade dos dados batimétricos. Modelos baseados em aprendizado de máquina, como redes neurais convolucionais (CNN - *Convolutional Neural Network*), estão começando a integrar informações físicas de transferência radiativa para melhorar a estimativa de profundidade em águas complexas. A combinação de dados de satélites multiespectrais, hiperespectrais e ICESAT-2 promete um futuro onde a batimetria de alta resolução se torne acessível e aplicável em escala global, facilitando a gestão costeira, a navegação segura, a conservação ambiental e até monitoramento de regiões onde serão instaladas usinas eólicas *offshore* no Brasil, atendendo às crescentes demandas por dados atualizados em áreas marinhas e costeiras.

Referências

- Coveney et al. ICESat-2 Marine Bathymetry: Extraction, Refraction Adjustment and Vertical Accuracy as a Function of Depth in Mid-Latitude Temperate Contexts. *Remote Sensing*, 2021.
- Evagorou et al. Evaluation of Satellite-Derived Bathymetry from High and Medium-Resolution Sensors Using Empirical Methods. *Remote Sensing*, 2022.
- Kim et al. Physics-Based Satellite-Derived Bathymetry (SDB) Using Landsat OLI Images. *Remote Sensing*, v. 16, n. 5, p. 843, 2024.
- Wang et al. Bathymetry Inversion Using Attention-Based Band Optimization Model for Hyperspectral or Multispectral Satellite Imagery." *Water*, 2023.

Palavras-chave: Batimetria Derivada de Satélite; Sensoriamento Remoto; ICESAT-2; Machine Learning.