SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROGRAFIA 2025

"Desafios da Hidrografia na Transformação Digital"

ANÁLISE DA ACURÁCIA DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO (MDTS) EM COMPARAÇÃO COM DADOS BATIMÉTRICOS COLETADOS POR HIDROACÚSTICA NO TALUDE SUL DO BRASIL

Gisele,G. C.[1]; Stefan, W.;[1*]; Tiago, G. [2*];Elaine, G.[1] ; Marcelo,P.[1*]*

[1] Universidade Federal do Rio Grande (FURG); [2] Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS)

**giseleguedes.g@gmail.com ; *Stefanweigert@gmail.com;*
**gandratiagobr@gmail.com; *elainegoulart@gmail.com; *marcelopinho@gmail.com*

A compreensão da fisiografia do assoalho marinho sempre foi limitada pela dificuldade de obtenção de informações e dados, principalmente devido ao elevado custo operacional. Sensores ópticos e eletromagnéticos usados para mapear, observar e entender a topografia terrestre não penetram mais do que dezenas de metros nos oceanos, sendo o acesso às regiões profundas limitado pelas condições físicas do ambiente, uma vez que a luz é praticamente extinta a partir dos 200 metros de profundidade. O emprego de tecnologias avançadas para aprimorar técnicas de medições, garantir a confiabilidade dos dados e uma melhor representação do fundo marinho, como por exemplo, Modelos Digitais de Terreno (MDTs) batimétricos ou dados de sondagem esparsos.

Os MDTs são uma representação matemática computacional comumente usados para mapeamento topográfico tanto em áreas terrestres como no ambiente marinho, criando mapas topográficos do terreno, sendo amplamente aplicados em projetos de engenharia para o planejamento de projetos de construção e projeção de sistemas de drenagem, por exemplo. Em ambientes marinhos, fornecem informações sobre a elevação, declive e outras características topográficas do terreno batimétrico de uma região, em regiões costeiras e oceânicas distais, incluindo alguns recursos como linhas de quebra ou fraturas.

Por se tratar de um desafio global, descrever a topografia marinha em regiões de pouca densidade de dados batimétricos abrange inúmeras tentativas de uma representação que melhor se aproxime da realidade marinha em forma de MDTs batimétricos. As iniciativas podem ser em escala global, escala regional ou local, favorecendo a sobreposição dessas informações e proporcionando diferentes MDTs.

Nesse estudo foi analisada a acurácia de MDTs batimétricos, especificamente a Carta Batimétrica Geral dos Oceanos (GEBCO, do inglês *General Bathymetric Chart of the Oceans*) e o modelo da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), comparando-os com dados de batimetria coletados por método hidroacústico nas frequências nominais de 18 e 38 kHz. A área de estudo foi a região do talude continental do Sul do Brasil, entre o Cabo de Santa Marta Grande (SC) e a Barra do Chuí (RS), sendo caracterizada por feições morfológicas complexas, como o Complexo de Megadeslizamento do Chuí (Reis, 2015), exigindo dados confiáveis para representar com melhor acurácia a topografia submersa.

As sondagens foram realizadas durante a primeira etapa do cruzeiro de pesquisa Talude XIV (Projeto Talude III), com uma ecossonda científica SIMRAD EK60 operando nas frequências de 18 e 38 kHz, totalizando 25 transectos em ziguezague e cerca de 40 mil registros válidos. O processamento inicial ocorreu no software Echoview 13.0, onde foram gerados os arquivos com as coordenadas geográficas e valores de profundidade, data e hora. Após processamento e filtragem, as diferenças entre os MDTs e os dados hidroacústicos foram calculadas para avaliar a acurácia dos modelos.

Os MDTs batimétricos foram preparados no RStudio, devido à sua capacidade de manipulação e processamento de dados espaciais. Os modelos utilizados foram o GEBCO (2024) e o modelo da DHN, ambos no formato GeoTIFF e com diferentes resoluções espaciais. O recorte do GEBCO foi realizado na plataforma de download, enquanto o modelo da DHN foi recortado no RStudio para abranger a mesma área de estudo. Para garantir compatibilidade, o MDT DHN foi reprojetado para o sistema de coordenadas WGS 84, utilizando o método do vizinho mais próximo, adequado para a preservação dos valores originais do raster. Após esses ajustes, as diferenças batimétricas entre os modelos foram calculadas, gerando uma camada em formato raster para visualização e quantificação das diferenças.

Neste estudo as frequências de 18 e 38 kHz foram utilizadas como dados de controle, ou seja, correspondente aos dados medidos *in situ* e comparados e integrados aos dados modelados para comparação e análise conseguinte. Desta forma, após gerar as planilhas, os transectos foram analisados individualmente para retirada de *spikes* e identificação de possíveis erros, aqui definidos conforme estabelecido pela norma S-44 da IHO, durante a aquisição dos dados *in situ*. Para tanto, utilizou-se a ferramenta Excel do Pacote Office da Microsoft.

Os dados tabulares foram então convertidos em objetos espaciais, adotando o Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) WGS 84 (EPSG: 4326). Na próxima etapa, os dados hidroacústicos foram integrados aos MDTs GEBCO e DHN. Isso envolveu a extração de valores de profundidade dos modelos para as localizações amostradas pelas frequências de 18 e 38 kHz.

A metodologia incluiu análises qualitativas e quantitativas, usando histogramas, regressão linear e o Diagrama de Taylor para comparar as incertezas entre os modelos e os dados coletados nas duas frequências. Métricas como erro absoluto médio (MAE) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) foram calculadas para cada comparação. Essas métricas auxiliam na quantificação da acurácia e na identificação da amplitude das diferenças entre os métodos.

Os erros estatísticos (MAE e RMSE) evidenciaram incertezas relevantes entre as diferentes fontes analisadas. O MDT da DHN apresentou o maior RMSE em relação à frequência de 38 kHz (45 m), por outro lado, o MDT GEBCO demonstrou menor afastamento quando comparado à frequência de 18 kHz, o que sugere uma maior compatibilidade com o dado de controle. A menor ocorreu entre as próprias frequências acústicas (RMSE de 14 m e MAE de 3 m), como esperado, pois foram adquiridas sob as mesmas condições operacionais. A amplitude dos erros ocorreu entre 38kHz e DHN (984m), enquanto a menor foi entre GEBCO e DHN (572m), indicando que, apesar das altas correlações ($R > 0,99$), há regiões com diferenças pontuais expressivas, sobretudo envolvendo a frequência de 38kHz.

Ressalta-se, que os próprios dados acústicos estão sujeitos a incertezas inerentes, decorrentes da resolução do feixe sonar, da densidade de amostragem e das condições ambientais durante a coleta. Além disso, sonares de baixa frequência, como os de 18 kHz, possuem maior capacidade de penetração em sedimentos inconsolidados, o que permite o registro de ecos provenientes de camadas mais profundas, próximas à interface sólido-substrato, podendo influenciar na estimativa final da profundidade. Outro fator é a variabilidade temporal do fundo marinho, que pode resultar de processos sedimentares, hidrodinâmicos ou biológicos, afetando a correspondência entre dados adquiridos em momentos distintos.

Comparando com Florentino (2023), que avaliou quatro MDTs na margem continental brasileira, observa-se padrão semelhante nos erros, embora sua escala envolva maiores profundidades. O menor RMSE desta pesquisa foi entre 18 kHz e GEBCO (349 m), enquanto Florentino encontrou 108 m no GEBCO2020. No geral, os RMSEs desta análise foram menores (até 45 m), reforçando a maior precisão de dados hidroacústicos coletados diretamente em campo frente a modelos globais interpolados, como o ETOPO1, que alcançou 175 m.

A distribuição espacial dos erros mostrou que as regiões com maiores incertezas coincidiram entre os quatro conjuntos analisados, com destaque para a área entre 33°S de latitude e 050°W de longitude, correspondente ao transecto TR04 do cruzeiro Talude XIV, onde está localizada a feição do Megadeslizamento do Chuí, caracterizada pela região acidentada e altas taxas de erosão. Essa área apresentou a maior concentração de erros, principalmente na relação entre a frequência de 38kHz e o modelo DHN, reforçando as limitações deste modelo em representar a variabilidade topográfica. Embora o modelo GEBCO tenha apresentado menores erros: os valores de MAE e RMSE confirmam que as maiores discrepâncias ocorrem entre 38kHz e o modelo GEBCO, com RMSE de 40 m e MAE de 23 m e entre a frequência de 18kHz, com RMSE de 38 m e MAE de 22 m. Ele também mostrou afastamentos significativos em regiões pontuais, evidenciando a influência das características locais na acurácia dos MDTs.

As frequências hidroacústicas demonstraram eficácia na aquisição de dados, com a frequência de 38 kHz apresentando bom desempenho em profundidades de até 1500 metros. Já a frequência de 18 kHz mostrou-se eficiente e homogênea ao longo de toda a área de estudo, na região do Talude, entre o Cabo de Santa Marta Grande e o Chuí, alcançando profundidades próximas de 2000 metros. Esses resultados evidenciam o potencial dessas frequências na aquisição de dados batimétricos em grandes profundidades, contribuindo para o refinamento e maior precisão dos MDTs. Conclui-se que a frequência de 18 kHz, menos sensível a ruídos causados pelo aumento da profundidade local, oferecendo dados mais consistentes para validação de MDTs. O GEBCO, devido à sua maior resolução espacial, demonstrou maior compatibilidade com os dados hidroacústicos sendo mais preciso para estudos em áreas de talude e regiões profundas, enquanto o modelo DHN, atribuída à menor densidade de pontos pode ter contribuído para um viés de *shoal biased*, isto é, uma tendência sistemática a representar profundidades menores do que as reais em áreas mais profundas.

Por fim, a frequência de 18 kHz mostrou-se mais consistente para validação dos modelos, ao oferecer uma base menos afetada por ruídos e variações abruptas. Conforme a IHO S-44 (Ed. 6.2.0), a cobertura esperada para levantamentos de Ordem 2 com ecobatímetros monofeixe é de cerca de 5%. Considerando os transdutores SIMRAD ES60 usados (feixes de 7° e 11°), estimou-se cobertura de 4,5% (38 kHz) e 7,1% (18 kHz), indicando que a frequência de 18 kHz proporcionou maior abrangência e detalhamento do fundo mesmo com baixa densidade amostral.

Os resultados confirmam que, embora altamente correlacionados, os MDTs apresentam limitações em regiões de relevo acidentado. O modelo da DHN mostrou maior discrepância em relação aos dados de controle, enquanto o GEBCO teve melhor ajuste à frequência de 18 kHz. Isso reforça a necessidade de avaliações regionais para aprimorar os processos de interpolação batimétrica.

Palavras-chave: Batimetria; MDT; GEBCO; DHN; acurácia; talude continental.