



EXTENSÃO DE MODELAGEM MATEMÁTICA PARA EMPREGO DE SATELLITE DERIVED BATHYMETRY NA IDENTIFICAÇÃO DE POTENCIAIS RISCOS À NAVEGAÇÃO EM ÁREAS NÃO HIDROGRAFADAS

*Capitão de Fragata Ricardo Ramos Freire;¹
Capitão de Fragata Anderson Barbosa da
Cruz Peçanha²*

RESUMO

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um modelo matemático básico para emprego de técnica baseada no processamento de dados eletromagnéticos adquiridos por sensores orbitais, para identificação de potenciais áreas rasas em regiões não hidrografadas.

Palavras-chave: Satellite Derived Bathymetry; Radiometria; Ótica oceânica e ajustamento não linear.

ABSTRACT

This article presents the development of a basic mathematical model of a technique based on the processing of electromagnetic data collected by orbital sensors to identify potential shallow areas in non-hydrographic regions.

¹ Oficial do Corpo de Engenheiros da Marinha, Mestrado em Engenharia da Computação (Geomática) na Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Ph.D em Engenharia Oceânica pela University of New Hampshire – UNH. Superintendente de Segurança da Navegação do Centro de Hidrografia da Marinha – CHM;

² Oficial do Corpo da Armada, Hidrógrafo, Mestrado em Ciências da Terra pela University of New Hampshire – UNH. Encarregado da Divisão de Análise do Centro de Hidrografia da Marinha – CHM.



Keywords: Satellite Derived Bathymetry, Radiometry, Ocean optics and non-linear adjustment.

1. INTRODUÇÃO

Em 1969, foi publicado um trabalho de 80 páginas sobre técnicas de sensoriamento remoto para localização e medição de feições em áreas rasas (Polcyn e Rollin, 1969). No ano seguinte, um trabalho mais avançado discorreu sobre medições de profundidade por meio do processamento de imagens satelitais (Polcyn et al. 1970). Cumpre ressaltar que tais estudos foram anteriores ao lançamento da missão Landsat 1 (ERTS-1), ocorrido em 23 de julho de 1972. Imediatamente após o lançamento desse satélite, um novo artigo (Polcyn e Lyzenga, 1973) apresentou os cálculos de estimativas de profundidades (Figura 1) a partir de uma imagem adquirida em 10 de outubro de 1972.

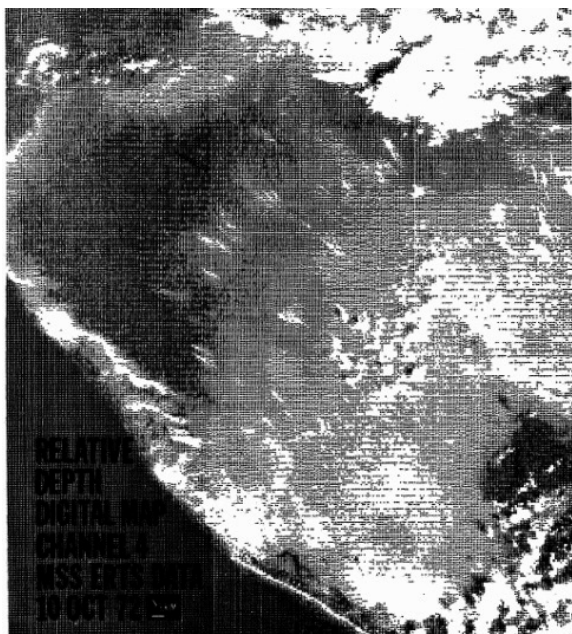


Figura 1 – Mapa de profundidades relativas baseado no canal azul do ERTS-1 (Polcyn e Lyzenga, 1973)

Nas cinco décadas subsequentes, vários avanços na modelagem física do comportamento da luz na água, bem como na resolução temporal, espacial e radiométrica das imagens orbitais, potencializaram avanços na

qualificação das estimativas do Satellite Derived Bathymetry (SDB). Em 2017, ocorreu a 1ª Sessão da Assembléia da Organização Hidrográfica Internacional (OHI) quando, por meio da decisão 21, foi resolvido que o SDB seria uma das técnicas de coleta de dados batimétricos a ser encorajada nos Serviços Hidrográficos.

Assim como o Airborne LiDAR Bathymetry (ALB), o SDB se vale do comportamento das ondas eletromagnéticas ao longo da coluna d'água. Diferente dos pulsos acústicos, baseados em ondas mecânicas, empregados nos Multibeam Echosounders (MBES) e Singlebeam Echosounders (SBES), a profundidade de extinção atrelada ao emprego do SDB (assim como ALB) confere limitação para áreas mais rasas. O emprego de MBES em águas rasas (abaixo de 30m) acaba apresentando mais ruído no sinal. Ao truncar os feixes externos no planejamento, por meio do estreitamento do ângulo de varredura, busca-se melhorar a relação sinal-ruído (SNR), mas eleva-se a quantidade de linhas necessárias para se garantir o recobrimento desejado. O emprego de SDB, nessa faixa de profundidade, aumenta a velocidade de coleta, elimina riscos de colisão do transdutor do ecobatímetro, com o fundo ou com estruturas, por ser técnica de sensoriamento remoto orbital. Além disso, reduz significativamente o custo operacional do levantamento – dependendo da escala de compilação, existe a possibilidade de empregar cenas distribuídas, gratuitamente, na internet, e extirpar custos relacionados à embarcação, pessoal, equipamentos, etc. Ressalta-se que o SDB não é, nem se propõe a ser, um substituto do MBES. A densidade superior de pontos do MBES, associada à menor incerteza de seus dados, quando comparados ao SDB, confere a essa última técnica uma grande relevância em atividades de reconhecimento pré-levantamento ou de levantamento de oportunidade, quando



não há a possibilidade de realização de esforço logístico necessário para a aquisição de dados acústicos. Outra possibilidade é o emprego do SDB em áreas, cujo acesso de embarcações seja negado ou perigoso, pelas mais variadas razões.

2. SDB

De acordo com o comportamento da luz na coluna d’água deriva das Equações de Maxwell, abordada por Mobley (1994 e 2014) e Barbosa et al (2019), seja a equação de transferência radiativa representada pela integro-diferencial abaixo (Equação 1):

(Equação. 1)

$$\cos\theta \frac{\partial L}{\partial z} = -cL + \omega_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \beta L d\theta' d\phi' + S$$

onde:

- θ é o ângulo de incidência do feixe;
 - L é a distribuição de radiância;
 - c é o coeficiente de atenuação do feixe;
 - ω_0 é o albedo;
 - β é a função de espalhamento de volume normalizada pelo coeficiente de espalhamento; e
 - s é a fonte de energia.
- Assumindo que o espalhamento seja desprezível, tem-se:

(Equação. 2)

$$\cos\theta \frac{\partial L}{\partial z} = -cL + S$$

Reordenando, tem-se:

(Equação. 3)

$$\frac{\partial L}{\partial z} + \frac{c}{\cos\theta} L = \frac{S}{\cos\theta}$$

Para resolver a equação diferencial ordinária, aplica-se o artifício: $e^{\frac{c}{\cos\theta} z}$

(Equação. 4)

$$e^{\frac{c}{\cos\theta} z} \frac{\partial L}{\partial z} + \frac{c}{\cos\theta} L e^{\frac{c}{\cos\theta} z} = \frac{S}{\cos\theta} e^{\frac{c}{\cos\theta} z}$$

O lado esquerdo da Eq. 4 é resultado de uma derivação, explicitada abaixo:

(Equação. 5)

$$\frac{\partial L e^{\frac{c}{\cos\theta} z}}{\partial z} = \frac{S}{\cos\theta} e^{\frac{c}{\cos\theta} z}$$

Integrando a Eq. 5 ao longo da coluna d’água, tem-se:

(Equação. 6)

$$L e^{\frac{c}{\cos\theta} z} \Big|_0^z = \int_0^z \frac{S}{\cos\theta} e^{\frac{c}{\cos\theta} dz}$$

(Equação. 7)

$$L e^{\frac{c}{\cos\theta} z} - L(0) = \frac{S}{c} \left(e^{\frac{c}{\cos\theta} z} - 1 \right)$$

(Equação. 8)

$$L e^{\frac{c}{\cos\theta} z} - L(0) = \frac{S}{c} \left(e^{\frac{c}{\cos\theta} z} - 1 \right)$$

(Equação. 9)

$$L = L(0) e^{-\frac{c}{\cos\theta} z} + \frac{S}{c} \left(1 - e^{-\frac{c}{\cos\theta} z} \right)$$

(Equação. 10)

$$L = \left(L(0) - \frac{S}{c} \right) e^{\frac{-\alpha}{\cos\theta}} + \frac{S}{c}$$

A Eq. 10 pode ser reescrita conforme apresentada em Pe'eri et al (2014), que foi uma extensão de Philpot (1989):

(Equação. 11)

$$L_{obs} = (L_f - L_{ca}) e^{-2Kz} + L_{ca}$$

onde:

- L_{obs} é o registro da radiância observada na banda espectral de interesse;
- L_f é a contribuição do fundo para L_{obs} ;
- L_{ca} é a contribuição da coluna d'água para L_{obs} ;
- K é o coeficiente de atenuação difusa; e
- Z é a profundidade.

Uma rápida análise da Eq. 11 demonstra que as condições de contorno são respeitadas:

- quando $z \rightarrow \infty$, não há retorno do fundo, ou seja, $L_{obs} \rightarrow L_{ca}$, também conhecida como profundidade de extinção; e
- quando $z \rightarrow 0$, estamos margeado a lâmina d'água, ou seja $L_{obs} \rightarrow L_f$.

Para estimar a profundidade, há a possibilidade de emprego de diferentes técnicas, conforme já categorizado por Philpot et al (2004). Para esse trabalho, foi escolhida uma abordagem semelhante a Stumpf et al (2003), Dierssen et al (2003) e Freire (2017), por meio do emprego da técnica de otimização, baseada na combinação de canais espectrais. Para estimar profundidades da Eq. 11, tem-se para dois canais arbitrários 1 e 2:

(Equação. 12)

$$L_{obs} = (L_f - L_{ca}) e^{-2Kz} + L_{ca}$$

(Equação. 13)

$$L_{obs1} = (L_{f1} - L_{ca1}) e^{-2K1z} + L_{ca1}$$

(Equação. 14)

$$\frac{L_{obs2} - L_{ca2}}{L_{obs1} - L_{ca1}} \frac{L_{f1} - L_{ca1}}{L_{f2} - L_{ca2}} = e^{2[K1 - K2]z}$$

(Equação. 15)

$$z = \frac{1}{2(K1 - K2)} \ln \left(\frac{L_{obs2} - L_{ca2}}{L_{obs1} - L_{ca1}} \right) + \frac{1}{2(K1 - K2)} \ln \left(\frac{L_{f1} - L_{ca1}}{L_{f2} - L_{ca2}} \right)$$

(Equação. 16)

$$L_{obs2} = (L_{f2} - L_{ca2}) e^{-2K2z} + L_{ca2}$$

Empregando a Eq. 16, é possível montar um sistema de equações com os valores das radiâncias dos canais e as profundidades de calibração obtidas de levantamentos hidrográficos (LH) anteriores. Recomenda-se o emprego de otimização com norma L2 para calcular as variáveis $m_0, m_1, m_2, e m_3$. Com esses parâmetros, é possível estimar a batimetria. Vale dizer que as etapas preliminares de calibração radiométrica como separação terra/água, filtragem das imagens, atenuação de reflexão especular do sol, influência de nuvens e avaliação de turbidez não serão objeto deste artigo, mas podem ser encontradas em Pe'eri et al (2014) e Freire (2017). Cumpre observar que os dados empregados nesse artigo já possuem correções geométricas, radiométricas (reflectância TOA) e ortorretificação nativas da European Space Agency (ESA, 2018).

3. ÁREA TESTE

Em recente demanda recebida pela DHN, foi apresentada a necessidade de realização de LH na área do Lago de Palmas, TO. Trata-se de uma região onde a DHN ainda não havia realizado coleta de dados batimétricos, haja vista a mesma não ser contemplada pelo



III Plano Cartográfico Náutico Brasileiro, vigente no momento da redação desse artigo.

Como qualquer LH, foi realizada a pesquisa sobre dados pretéritos na região. No Banco de Dados Geográficos do Exército (BDGEx, 2022), foi identificada a Carta Matricial de Porto Nacional (Figura 2 – SC.22-Z-B), escala 1:250.000, na projeção UTM, datum horizontal SAD-69 e vertical de Imbituba. Nessa carta, há a representação do Rio Tocantins (o traçado), se estendendo entre os pares de coordenadas (11° S, 49° 30' W) e (10° S, 48° W), no sistema geodésico horizontal supracitado. A cidade de Palmas ainda não existia na representação da carta, assim como o traçado do rio não contemplava o processo de inundação da região em razão da construção da Usina Hidrelétrica Luis Eduardo Magalhães (UHE Lajeado).

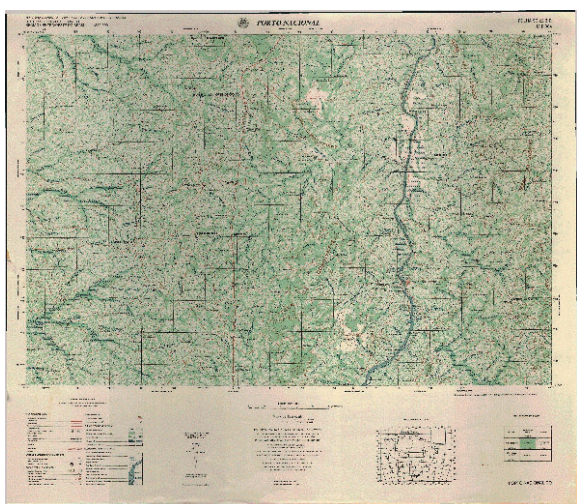


Figura 2 – Carta de Porto Nacional (BDGEx, 2022)

Em paralelo ao planejamento para a realização do LH na área, foi avaliada a aplicabilidade de SDB para a região. Foi obtido um conjunto de imagens Sentinel 2A, referentes ao dia 19 de setembro de 2021, no sítio Earth Explorer, mantido pelo United States Geological Survey (USGS, 2022). Essa cena foi escolhida em razão da baixíssima cobertura de nuvens e por abranger toda a área de interesse.



Figura 3 – Imagem de satélite gerada por composição de bandas na área do Lago de Palmas, TO (USGS, 2022)

4. METODOLOGIA

Para desenvolvimento desse estudo, foi empregada a estação de trabalho com processador Intel i7-6700 3,4 GHz, 16 GB de memória DDR-4 SDRAM 2133 MHz e placa de vídeo 8 GB GDDR5. Foi utilizado o QGIS 3.24 para o processamento e apresentação dos dados e o Mathcad Prime 3.1 para o processamento complementar.

A modelagem matemática desenvolvida no item 2 desse artigo depende de pontos de calibração para o emprego da otimização sobre o conjunto de equações não lineares. Como essa não era a realidade disponível para o estudo, buscou-se viabilizar a identificação de potenciais baixos fundos na área, mesmo na ausência de quaisquer dados de batimetria oficial. Apesar de haver diversos métodos para a separação da interface terra/água, mascarando a primeira, foi aplicado nesse estudo o Normalized Difference Water Index (NDWI), apresentado por Gao (1996).

A transformada logarítmica da razão entre os canais espectrais é altamente

correlacionada à realidade batimétrica. Nesse estudo, o resultado da transformada será chamado de Superfície Quase-Batimétrica (SQB), para fins de simplificação. Os elementos não lineares poderiam ser considerados como um ajuste fino ao modelo. Complementarmente, a informação obtida pela equipe de reconhecimento atestou que a profundidade média na área de interesse era de 8m e, assim, optou-se por essa simplificação.

Ao analisar a SQB, a maior dificuldade é que a mesma, apesar de correlacionada à batimetria, apresenta-se fora de escala. O desafio recaiu sobre como estabelecer um critério para identificar a faixa de valores que representariam riscos à navegação. A SQB apresentou amplitude de 0 a 0,32 (adimensional).

Para identificar o fator de corte, buscou-se analisar o comportamento das frequências dos valores de interesse da SQB por meio de construção de histograma.

5. RESULTADOS

A partir de um total de 120 milhões de pixels da imagem, 5,8 milhões foram elegíveis para construção da SQB. Para mapear quais valores corresponderiam à faixa de risco à navegação, buscou-se identificar quais pixels teriam contato, ao menos, de um de seus lados (desconsiderando contatos somente de vértices) com pixels das áreas excluídas pelo NDWI. O código para essa análise foi construído no Mathcad Prime 3.1. Essa varredura resultou em quase 120 mil pixels. Ao construir um histograma desse subconjunto, verificou-se que as frequências dos valores não se enquadravam na função de distribuição normal. Assim, optou-se por realizar a identificação do valor de corte com base no resultado do histograma, chegando-se a 0,183. Com base nesse valor, a SQB foi rerepresentada, com as áreas em vermelho correspondendo àquelas, cujos valores eram inferiores ao corte (Figura 4).

A equipe de reconhecimento trouxe a notícia que o talvegue da região seria o curso do rio anterior à construção da barragem e à inundação das áreas adjacentes. Para verificar se a resposta da SQB estaria adequada a essa realidade, essa foi sobreposta, com 50% de transparência, à Carta Matricial de Porto Nacional (Figura 4).

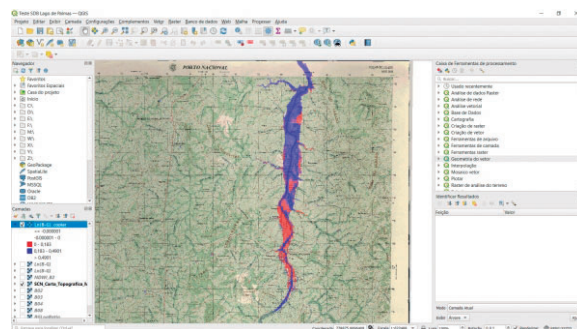


Figura 4 – SQB com as áreas vermelhas indicando potenciais riscos à navegação

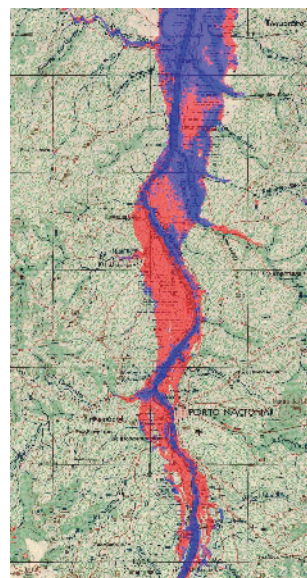


Figura 5 – Ampliação em 400% da Figura 4

6. CONCLUSÃO

Após a comparação da SQB com a Carta Matricial de Porto Nacional, ficou evidente que a superfície gerada preservava o curso pretérito do rio, ou seja, o talvegue apontado



pela equipe de reconhecimento. Outra constatação foi a de que a navegação entre Palmas e Porto Nacional é bem mais restrita do que aquela entre Palmas e a UHE Lajeado, o que também foi confirmado pela SQB.

Como o estudo conduzido não possuía pontos de controle, gerou-se a oportunidade de empregar os futuros pontos derivados de LH realizados na área, para transformar a SQB em SDB, melhorando, assim, a capacidade de detecção dos perigos à navegação. Como foi admitido um fundo com comportamento Lambertiano e que a contribuição dos parâmetros não lineares da coluna d'água seriam negligenciáveis, outro aspecto a ser avaliado seria a subdivisão da área do Lago de Palmas, buscando uma explicação

de modelo mais aderente à potencial variabilidade da coluna d'água e do fundo. Além desses, o emprego de séries temporais de análise beneficiaria o isolamento de sinais derivados da turbidez, algo que também foi apartado do escopo desse estudo.

Diante da ausência de dados para a calibração e dos resultados alcançados, conclui-se que o estudo conduzido produziu o resultado satisfatório na identificação de potenciais riscos à navegação. Tal metodologia poderia ser empregada em casos análogos futuros (áreas de interesse do PLADEPO) ou, com pontos de controle, para acelerar o reconhecimento de potenciais riscos em áreas cuja dinâmica suplante a capacidade de revista dos meios com sensores acústicos.

7. REFERÊNCIAS

BARBOSA, C. C. F., NOVO, E. M. L. M., MARTINS, V. S. (2019). *Introdução ao Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos*. INPE.

European Space Agency (ESA). (2018). USGS EROS Archive – Sentinel-2, doi: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2>. Visitado em 28/03/2022.

Exército Brasileiro (EB). (2022). *Banco de Dados Geográficos do Exército (BDGEx)*, doi: <https://bdgex.eb.mil.br/bdgexapp>. Visitado em 28/03/2022.

FREIRE, R. R. (2017). *Evaluating Satellite Derived Bathymetry in Regard to Total Propagated Uncertainty, Multi-Temporal Change Detection, and Multiple Non-Linear Estimation*. Tese de Ph.D. University of New Hampshire.

GAO, B. C. (1996). NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sens. Environ.* 58: 257–266.

International Hydrographic Organization (IHO). (2017). *1st Session of the IHO Assembly, Report of Proceedings* (Volume I), Monaco, pp. 54.

MOBLEY, C. D. (1994). *Light and water: radiative transfer in natural waters*. Academic Press, Inc.

MOBLEY, C. D. (1994). *Invariant Imbedding Theory for the Vector Radiative Transfer Equation*. Sequoia Scientific, Inc.



PE'ERI, S., PARRISH, C. E., AZUIKE, C., ALEXANDER, L. AND ARMSTRONG, A (2014), *Satellite Remote Sensing as a Reconnaissance Tool for Assessing Nautical Chart Adequacy and Completeness*, *Marine Geodesy*, 37(3): 293-314.

PHILPOT, W. D. (1989). *Bathymetric mapping with passive, multispectral imagery*. *Appl. Optics* 28:1569–1578.

PHILPOT, W.D., DAVIS, C.O., BISSETT, W.P., MOBLEY, C., KOHLER, D.D.R., LEE, Z.P., SNYDER, W., STEWARD, R.G., GOULD, R. AND ARNONE, R. (2004). *Bottom characterization from hyperspectral image data*. *Oceanography*, 17(2): 76-85.

POLCYN, F.C., AND ROLLIN, R.A. (1969). *Remote Sensing Techniques for the Location and Measurement of Shallow Water Features*. *Willow Run Laboratories Report 8973-10-P*, University of Michigan.

POLCYN, F.C., BROWN, W.L., AND SATTINGER, I.J. (1970). *The Measurement of Water Depth by Remote Sensing Techniques*. *Willow Run Laboratories Report 8973-26-F*, University of Michigan.

POLCYN, F. C. AND LYZENGA, D. R. (1973), *Calculations of water depth from ERTS-MSS data*, in *Proceedings, Symposium on Significant Results from ERTS-1*, NASA Spec. Publ. SP-327.

United States Geological Survey (USGS). (2022). *USGS EarthExplorer*, doi: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Visitado em 28/03/2022.

