

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N^o 68/5: 863-881
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MODELO DE INCERTEZA PARA SONDADORES DE FEIXE SIMPLES

Uncertainty Model for Single Beam Echo Sounders

**Ítalo Oliveira Ferreira¹, Dalto Domingos Rodrigues¹, Arthur Ayres Neto²
& Cristina Sameiro Monteiro³**

¹Universidade Federal de Viçosa - UFV

Departamento de Engenharia Civil

Av. Peter Henry Rolfs, s/n^o - Campus Universitário - Cep: 36570-900 - Viçosa/MG - Brasil

italo.ferreira@ufv.br; dalto@ufv.br

²Universidade Federal de Fluminense - UFF

Departamento de Geologia

Av. General Milton Tavares de Souza, s/n^o - Campus da Praia Vermelha - Cep: 24210-346 - Niterói/RJ - Brasil

aayres@id.uff.br.br

³ Instituto Hidrográfico - IH

Divisão de Hidrografia da Marinha de Portugal

Rua das trinas, 49 - Cep:1249-093 - Lisboa - Portugal

cristina.monteiro@hidrografico.pt

Recebido em 8 de Fevereiro, 2016/ Aceito em 14 de Abril, 2016

Received on February 8, 2016/ Accepted on April 14, 2016

RESUMO

A determinação do relevo submerso é tarefa árdua, porém necessária em diversas áreas do conhecimento. Independentemente dos processos e instrumentos utilizados no levantamento hidrográfico, as observações de posição e profundidade conterão incertezas. Este artigo objetiva realizar uma análise teórica dos principais fatores que compõem o modelo de incertezas de uma sondagem batimétrica através de sistemas de feixe simples, apresentando, ao final, uma aplicação prática da metodologia proposta para o sistema monofeixe montado a bordo da embarcação EAM-01 do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa. Os resultados mostraram que a metodologia apresentada pode ser utilizada para avaliar, a priori, se o sistema de sondagem é capaz de atingir as exigências do projeto. Com a aplicação prática da metodologia pode-se constatar que o sistema monofeixe montado a bordo da embarcação cumpre os requisitos da Norma para Execução de Levantamentos Hidrográficos da Marinha do Brasil (NORMAM-25).

Palavras chaves: Batimetria, Levantamento Hidrográfico, Modelo de Incertezas, Medição de Profundidade.

ABSTRACT

The determination of underwater terrain morphology is a hard work, but necessary in several areas of the knowledge. Independent of the processes and Instruments used in hydrographic survey, the measurements of position and depth contain uncertainties. This paper aims to perform a theoretical analysis of the main factors that comprise the uncertainties model of a bathymetric survey using single beam echo sounders, exhibiting in the end a practical application of the proposed methodology for the single beam echo sounder mounted aboard the boat EAM-01 of the Civil Engineering

department of the Federal University of Viçosa. The results showed that this methodology can be used to assess a priori whether the system is able to meet the requirements of the project. As a practical application it can be verified that the single beam echo sounder system mounted aboard the boat is in compliance with the requirements of the Standard for Execution of Hydrographic Surveys of the Brazilian Navy.

Keywords: Bathymetry, Hydrographic Survey, Uncertainty Model, Depth Measurement.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do relevo submerso é de essencial importância em diversas áreas. Algumas destas podem ser destacadas: o estabelecimento e manutenção de hidrovias (navegação marítima ou fluvial), obras civis (pontes, portos, píeres), a locação de cabos e dutos, a prospecção de recursos minerais, monitoramento de assoreamento de reservatórios (abastecimento ou geração de energia), dentre outros.

As profundidades dos corpos aquáticos utilizadas na construção dos Modelos Digitais de Elevação das superfícies submersas (Modelo Batimétrico ou Modelo Digital de Profundidade) são obtidas através de levantamentos batimétricos (IHO, 2005; FERREIRA *et al.*, 2013).

À primeira vista o levantamento batimétrico pode parecer semelhante ao levantamento topográfico, porém, essa semelhança se limita a representação por linhas de igual cota e ao tratamento computacional das superfícies. Os procedimentos seguidos no planejamento, coleta e análise dos dados são diferentes dos usados na topografia terrestre. Na batimetria, a superfície a ser mapeada é dividida em uma malha de linhas equidistantes que são percorridas pela plataforma de sondagem permitindo a coleta de dados de profundidade e posição (FERREIRA *et al.*, 2015).

Para medição da profundidade são utilizados tradicionalmente sistemas acústicos, como ecobatímetros monofeixe (*SBES - Single Beam Echo Sounders*) e multifeixe (*MBES - Multibeam Echo Sounders*) e sondadores interferométricos (IHO, 2005). Sistemas baseados em ondas eletromagnéticas, apesar da difícil penetração em meios aquáticos, também são utilizados, tais como os sistemas laser aerotransportados (GUENTHER *et al.*, 1996; PASTOL, 2011; ELLMER *et al.*, 2014) e a determinação da profundidade derivada de imagens orbitais (GAO, 2009; CHENG *et al.*, 2015; FERREIRA *et al.*, [s.d.]). Outras formas

de determinação da profundidade são discutidas, por exemplo, em IHO (2005) e USACE (2013).

O MBES é um dos sistemas mais efetivos para medição da profundidade, pois proporciona uma busca total do fundo submerso devido à elevada taxa de medição, com o consequente aumento da resolução e da capacidade de detecção de objetos (IHO, 2005; USACE, 2013; MALEIKA, 2015). No entanto, sistemas multifeixe ainda possuem um custo de aquisição elevado, o processamento dos dados é mais complexo e carecem de profissionais devidamente capacitados para operação. Embora eles forneçam maior detalhe e seu uso seja mandatório em alguns casos, como por exemplo, em pesquisas para fins de navegação em áreas restritas (IHO, 2008; DHN, 2014), os SBES ainda são largamente utilizados, principalmente em águas rasas, onde o MBES perde a eficiência, e em pesquisas onde seja necessário estimar a camada de lama fluída depositada no fundo submerso. Estes equipamentos, ao contrário do MBES, emitem apenas um pulso acústico (*ping*), determinando assim uma única profundidade por ciclo. As profundidades são georreferenciadas, preferencialmente, através de sistemas diferenciais de posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) (FERREIRA *et al.*, 2015).

No Brasil o uso do SBES é regulamentado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2013) e pela Marinha do Brasil (DHN, 2014). Esta última, seguindo recomendações da *International Hydrographic Organization* (IHO), ainda permite o uso dos sistemas monofeixe em casos específicos, como em levantamentos de Ordem 1b e 2, conforme especificado na Publicação Especial S-44, 5ª edição (IHO, 2008). Outras organizações como *World Meteorological Organization* (WMO, 2003), *U.S. Geological Survey* (SEKELLICK & BANKS, 2010; ATHEARN *et al.*, 2010) e *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 2013) ainda valem-se desta tecnologia para levantamentos batimétricos de reservatórios e águas interiores.

Independentemente dos equipamentos utilizados, em levantamentos hidrográficos, assim como nos levantamentos fotogramétricos, geodésicos ou topográficos, as observações conterão erros. Os erros podem ser divididos em grosseiros, sistemáticos e aleatórios.

Os erros grosseiros (*blunders*) são aqueles provocados por falhas ocasionais dos instrumentos e/ou do observador, devem ser detectados através de técnicas estatísticas ou geoestatísticas e eliminados. Os efeitos sistemáticos são devido às deficiências na compensação dos erros fixos ou de desvios nas medições, e devem ser modelados, determinados e eliminados (ou ao menos minimizados) durante a calibração do sistema ou inseridos no modelo matemático. Por fim, restam ainda os efeitos aleatórios ou flutuações probabilísticas. Estes efeitos são uma das principais causas do valor verdadeiro de uma observação nunca ser conhecido.

É comum na literatura o uso do termo *outlier* como sinônimo de erro grosseiro, no entanto, é importante destacar que *outlier* é uma observação que, estatisticamente, se diferencia do conjunto de dados ao qual pertence, ou seja, é um valor atípico ou inconsistente, sendo assim, podem ser causados por erros grosseiros, por efeitos sistemáticos ou, simplesmente, por efeitos aleatórios (ARTILHEIRO, 1998; SANTOS *et al.*, 2016). Segundo Artilheiro (1998), qualquer observação que seja maior, em valor absoluto, que o valor esperado, é suspeita de ser um erro grosseiro, sendo assim, todo erro grosseiro é configurado como outlier e, neste caso, passível de ser detectado por técnicas de detecção de outliers. Em levantamentos hidrográficos, spikes são tratados como outliers.

Segundo Monico *et al.* (2009), nas ciências geodésicas e cartográficas corriqueiramente encontra-se os termos acurácia e precisão interpretados de forma equivocada. Mikhail & Ackermann (1976) apresentam acurácia como sendo o grau de proximidade de uma estimativa com seu valor de referência, enquanto precisão expressa o grau de consistência da grandeza medida com sua média, estando está ligada diretamente com a dispersão da distribuição das observações. Ainda segundo os mesmos autores, a acurácia incorpora efeitos aleatórios e sistemáticos e a precisão está associada apenas

com efeitos aleatórios. Em suma, pode-se concluir que, matematicamente, o termo acurácia por si só envolve a medida de precisão. É também comum o emprego do termo exatidão, tomado, na maioria das vezes, como sinônimo de acurácia (ANDRADE, 2003; INMETRO, 2012b). Entretanto, Rodrigues (2008) faz uma distinção entre os termos acurácia e exatidão, definindo exatidão como sendo o grau de aderência de uma estimativa em relação ao seu valor verdadeiro, enquanto acurácia é quantificada em relação a um valor de referência, tal como definido.

Em levantamentos hidrográficos frequentemente termos como: erro, exatidão, precisão (quantificada pelo desvio padrão), desvio padrão, repetibilidade, acurácia, etc. são utilizados indevidamente ou confundidos com a incerteza estimada ou resultante de uma profundidade observada.

O termo “erro” é tradicionalmente definido como sendo a diferença entre o valor observado e o valor real (valor exato). Neste sentido, o termo “erro” está intimamente ligado à expressão exatidão, ou seja, uma observação é dita exata quando está isenta de erros, ou ainda, uma observação será mais exata quanto menor for a magnitude dos possíveis erros cometidos (IHO, 2008; INMETRO, 2012a, b).

No entanto, o termo “erro” é cientificamente vago, pois é sabido que as observações podem estar contaminadas por erros grosseiros, efeitos sistemáticos e aleatórios, sendo assim, mesmo se o valor verdadeiro de uma observação for conhecido, o que nas ciências hidrográficas é improvável, devido as flutuações probabilísticas, a magnitude da diferença entre a observação e o valor verdadeiro seria uma junção de possíveis erros grosseiros, efeitos sistemáticos e aleatórios. Além do mais, o “erro” é um termo pejorativo, ligado a falhas, enganos e negligências, sendo então, um indutor de conclusões equivocadas. Logo, o uso deste termo deve ser evitado. Do mesmo modo, é um equívoco usar o termo exatidão em levantamentos hidrográficos quando se tratar de controle de qualidade.

A coleta de dados redundantes nos levantamentos hidrográficos não é tão simples como no mapeamento terrestre, sendo assim, termos como precisão, desvio padrão e repetibilidade também devem ser evitados. Por fim, o uso do termo acurácia fica limitado à

complexidade de definir valores de referência em ambientes submersos.

Devido ao exposto e seguindo as recomendações de IHO (2008), INMETRO (2012a, b), neste texto, dar-se-á preferência ao termo Incerteza. De acordo com INMETRO (2012a, b), Incerteza é um “*parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando*”.

As profundidades observadas pelos SBES derivam do intervalo de tempo entre a saída e a chegada de um mesmo pulso acústico ao transdutor. A metade deste tempo multiplicado pela velocidade de propagação do som na água produzirá uma estimativa da profundidade local, denominada sondagem. Às sondagens devem ser acrescidas diversas correções para que seja possível a obtenção da profundidade corrigida, conforme será discutido neste texto (IHO, 2008; USACE, 2013; FERREIRA *et al.*, 2015). O termo Profundidade Reduzida é comumente utilizado na comunidade hidrográfica e pode ser entendido como a profundidade corrigida referenciada a um Nível de Redução (NR), ou seja, corrigida também dos efeitos de maré.

De acordo com USACE (2013) a incerteza de medição da profundidade possui muitas fontes em potencial. Estas incluem: o método de medição, a velocidade de propagação do som na água, a largura do feixe acústico emitido pelo transdutor (beamwidth), o tipo e formato de fundo, os movimentos da plataforma de sondagem (*roll-pitch-heave-heading*) e a profundidade de imersão do transdutor (*draft*). Todos esses fatores compõem o modelo de incertezas de medição da profundidade reduzida.

A velocidade de propagação da onda sonora, a forma e o tipo de fundo e a velocidade e movimentos da plataforma de sondagem são os maiores fatores que contribuem com a incerteza na medição da profundidade.

Hare *et al.* (2011) evidencia que em uma sondagem batimétrica existem fontes de incerteza que contribuem apenas com a incerteza vertical, fontes de incerteza que contribuem apenas com a incerteza horizontal e aquelas que contribuem com ambas.

Conforme sumarizado por IHO (2008), incertezas individuais associadas com a posição horizontal de um feixe incluem:

- a) Incertezas de posicionamento do sistema;
- b) Incertezas de alcance e de feixe;
- c) Incertezas associadas com o modelo de trajetória do raio acústico (incluindo o perfil da velocidade do som) e o ângulo de direção do feixe;
- d) Incertezas na determinação do rumo/proa (*heading*) da embarcação;
- e) Incertezas de direção do sistema resultantes do desalinhamento do transdutor;
- f) Incertezas devido a localização dos sensores, como, por exemplo, o *heave* induzido.
- g) Incertezas nas medições realizadas pelo sensor de movimentos da embarcação como, por exemplo, *roll*, *pitch* e *heave*;
- h) Incertezas na medição dos afastamentos (*offsets*) dos diversos sensores a bordo; e
- i) Incertezas associadas a sincronização do tempo / latência.

Fatores que podem contribuir com a incerteza vertical incluem:

- a) Incertezas associados à redução ao datum vertical (quando aplicável);
- b) Incertezas do sistema de posicionamento vertical;
- c) Incertezas associadas a medição de marés, incluindo erros cotidianos (quando aplicável);
- d) Incertezas instrumentais;
- e) Incertezas associadas a determinação do perfil de velocidade do som;
- f) Incertezas elipsoidais / Incertezas de modelo de separação do datum vertical (quando aplicável);
- g) Incertezas associadas aos movimentos da embarcação como, por exemplo, *roll*, *pitch* e, principalmente, *heave*.
- h) Incertezas devido a medição do *draft*;
- i) Incertezas associadas aos movimentos de *settlement* e *squat* da embarcação;
- j) Incertezas associadas a inclinação e variação de relevo submerso; e
- k) Incertezas associadas a sincronização do tempo / latência.

Todos estes elementos podem ser combinados através da aplicação da lei de propagação de covariâncias, desde que todos os pressupostos sejam atendidos, para fornecer uma estimativa da IPT (Incerteza Propagada Total, do Inglês *TPU - Total Propagated Uncertainty*) do sistema de sondagem.

A IPT calculada na dimensão vertical consiste na IVT (Incerteza Vertical Total, do

Inglês *TVU - Total Vertical Uncertainty*) e quando calculada no plano horizontal origina a IHT (Incerteza Horizontal Total, do Inglês *THU - Total Horizontal Uncertainty*). Note que a IVT e a IHT podem ser estimadas a partir de uma propagação de covariâncias considerando apenas as fontes de incerteza que as afetam individualmente.

Apesar da IPT ser mencionada como um único numeral, a IHT é uma quantidade bidimensional (IHO, 2008). Uma metodologia para estimação da IPT para sistemas multifeixe foi documentada por Hare (1995). A mesma metodologia pode ser aplicada para quantificação da IPT de sistemas monofeixe considerando o caso especial de uma sonda multifeixe operando somente com feixe nadiral (central) (HARE *et al.*, 2011).

Diante do exposto, o presente trabalho busca efetuar uma análise teórica dos principais fatores que compõem o modelo de incertezas da profundidade reduzida para sistemas de feixe simples, propondo metodologias para quantificar, reduzir ou corrigir os impactos destes na estimativa da profundidade e conseqüentemente do modelo batimétrico. Ao final é apresentada uma aplicação da metodologia proposta para o sistema monofeixe montado a bordo da embarcação EAM-01 do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, confrontando os resultados com a Norma para execução de levantamentos hidrográficos da Marinha do Brasil (NORMAM-25).

2. PRINCIPAIS FONTES DE INCERTEZA DA PROFUNDIDADE REDUZIDA

Adiante será apresentada uma análise teórica das principais fontes de incerteza presentes em um levantamento hidrográfico realizado com um ecobatímetro monofeixe, com ênfase naqueles relacionados à medição da profundidade reduzida.

2.1 Incerteza devido à velocidade de propagação do som e à medição do tempo

Conforme exposto, o SBES mede a profundidade de forma indireta. Na verdade, ele funciona como um relógio medindo o intervalo de tempo entre a saída e a chegada de um mesmo *ping* ao transdutor. Neste sentido, se a velocidade de propagação do som ao longo da

trajetória do sinal na água não for determinada de forma acurada, ocorrerá à introdução de efeitos sistemáticos nos dados (FERREIRA *et al.*, 2015).

Porém, determinar a velocidade do som é talvez o fator mais crítico numa sondagem batimétrica, devido a sua variação local (à superfície) e ao longo da coluna d'água (USACE, 2013). A temperatura, a salinidade e a pressão são os principais fatores que contribuem para a sua variação, sendo que a primeira tem a maior contribuição, principalmente em rios e reservatórios (IHO, 2005; USACE, 2013). Estima-se que uma variação de 1°C na temperatura traduz-se, aproximadamente, numa variação de 4,5 m/s na velocidade (IHO, 2005). Enquanto que uma incerteza de 1 m/s na estimativa da velocidade do som resultará em uma incerteza de 1 cm em uma sondagem de 15 m.

A magnitude da incerteza na medição da profundidade devido à variação da velocidade de propagação do som é, de acordo com IHO (2005), dependente da:

- a) Incerteza na determinação da velocidade de propagação do som;
- b) Variação temporal da velocidade de propagação do som, e
- c) Variação espacial da velocidade de propagação do som.

As variações temporal e espacial são a maior fonte externa de incertezas nas medidas de profundidade (USACE, 2013). Para SBES operando em águas rasas é aceitável o uso de uma velocidade média de propagação do som para toda a área (IHO, 2005; USACE, 2013), visto que, teoricamente, o feixe central (ao nadir da embarcação) não sofre refração. Usualmente, obtém-se a velocidade média através de uma placa de aferição (*bar-check*) conforme descrito em IHO (2005) e, neste caso, ajusta-se uma média harmônica das velocidades observadas ao longo da coluna d'água. Esta média é então utilizada em todo o projeto. No entanto, este método pode comprometer a sondagem, sendo recomendado o uso de perfiladores de som (SVP, CTD ou XBT) para medição do perfil de velocidade do som ao longo da coluna d'água (LINZ, 2010).

A incerteza devido à medição do intervalo de tempo é função dos algoritmos utilizados na detecção do eco. Para feixes acústicos próximos

ao nadir, como no caso dos SBES, utiliza-se a detecção em amplitude. Os métodos mais comuns de detecção em amplitude são, conforme a Fig. 1: A) Frente de onda do sinal refletido (primeiro retorno); B) Centro de gravidade do sinal refletido e C) Máxima amplitude do sinal refletido (DUNNEWOLD, 1998).

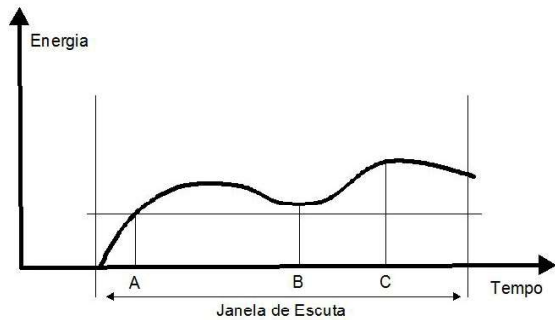


Fig. 1 - Métodos de detecção de fundo em amplitude. Frente de onda do sinal refletido (A); Centro de gravidade do sinal refletido (B) e Máxima amplitude do sinal refletido (C). Fonte: Adaptado de Dunnewold (1998).

O método de detecção utilizado bem como os parâmetros de configuração (ganho, potência, duração do pulso, etc.) variam de acordo com equipamento e fabricante. É função do pesquisador/hidrografo efetuar a escolha e a correta configuração do equipamento visando obter as melhores estimativas para a profundidade. Segundo IHO (2005), a incerteza devido à medição do tempo nos sondadores acústicos atuais é desprezível.

Outra correção necessária é a latência entre os diversos sensores do sistema de sondagem (HARE, 1995; DUNNEWOLD, 1998; IHO, 2005; USACE, 2013). A latência é a diferença entre os tempos de processamento das observações (posição, atitude, profundidade) e a saída destes dados para o sistema de aquisição automática que efetua a sincronização. Este atraso gera incertezas na posição da profundidade que se caracterizam como incertezas verticais por vezes impossíveis de quantificar. Conforme afirma Godin (1998), a latência causa alterações na posição das feições submersas no sentido de deslocamento da plataforma de sondagem.

Na Fig. 2, tomando a velocidade da plataforma de sondagem como sendo de 5 m/s e a latência entre o SBES e o receptor GNSS

1 s, a defasagem entre o registro da posição planimétrica e o registro da sondagem será de 5 m ao longo do trajeto.

Deste modo, recomenda-se compensar a latência através de calibrações. Pacotes comerciais para aquisição e processamento de dados possuem rotinas para quantificação da latência do sistema, usualmente, chamados de testes de latência.

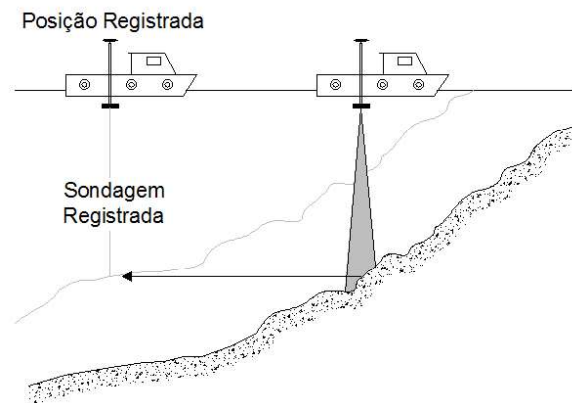


Fig. 2 - Incerteza posicional e vertical provenientes de problemas de latência entre o SBES e o sistema de posicionamento GNSS. Fonte: Adaptado de Lindberg (2011).

2.2. Incerteza devido à forma e ao tipo de fundo

Os algoritmos de detecção de fundo também influenciam as incertezas devidas a forma do fundo. Se na detecção de fundo, por exemplo, for utilizado o primeiro retorno, ter-se-á o problema descrito na Fig. 3, onde a profundidade registrada pelo SBES difere da profundidade real (ao nadir).

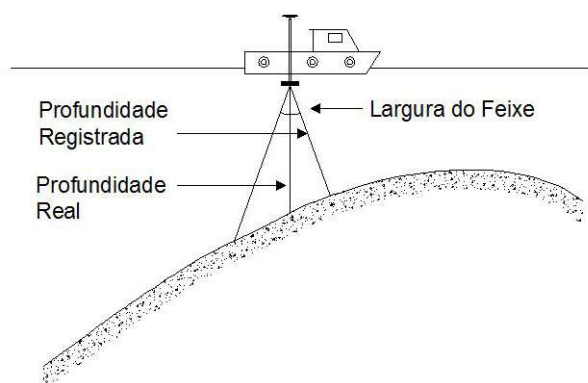


Fig. 3 - Incerteza devido à inclinação do fundo submerso.

Observando a Fig. 3, verifica-se que a incerteza devido a forma de fundo é função da inclinação do relevo submerso e da largura do feixe acústico emitido pelo transdutor do SBES. O conceito de largura do feixe (*beamwidth*), exposto na Fig. 3, em algumas literaturas é confundido com termo ângulo do feixe (*beam angle*). A largura do feixe pode ser definida como uma medida angular entre as direções nas quais a potência acústica é a metade da potência máxima do lóbulo, ou seja, direções definidas por pontos de -3dB. O ângulo do feixe é o ângulo que a direção de -3dB forma com o eixo acústico ou, simplesmente, a metade da largura do feixe (ver Fig. 10).

Se uma área com inclinação de fundo de 15° for sondada por um transdutor com *beamwidth* de 10° (típico de um SBES), uma profundidade ao nadir de 12,00 m, será registrada como 11,77 m, ou seja, uma incerteza de aproximadamente 2%, para um solo submerso com inclinação de 30° essa incerteza sobe para cerca de 5%.

Nos locais de relevo submerso acidentado nota-se um efeito similar (Fig. 4).

IHO (2005) apresenta equações para o cálculo da incerteza devido ao formato de fundo em função da largura do feixe e da inclinação do relevo submerso. Porém, a inclinação de fundo na maioria das vezes é desconhecida, sendo assim, as incertezas devido ao formato de fundo tornam-se difíceis de quantificar, sendo apropriado o uso de transdutores com feixe estreito. Estes possuem maior diretividade com conseqüente diminuição de lóbulos secundários (ou laterais), o que resulta

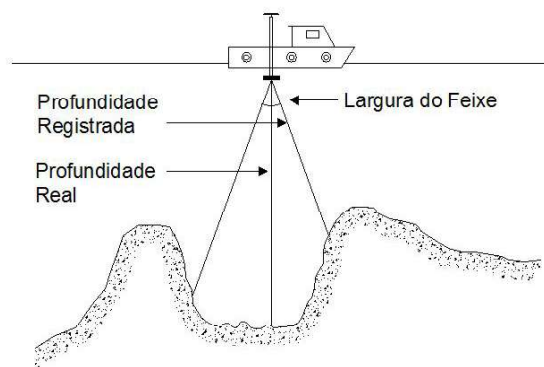


Fig. 4 - Incerteza devido à mudança abrupta do relevo submerso.

em melhores estimativas de profundidade, principalmente em águas rasas, conforme será apresentado adiante.

A Fig. 5 mostra um exemplo de falso registro de fundo devido à largura do feixe emitido pelo transdutor e ao relevo irregular do fundo submerso. Pode-se notar que o ecograma registra o fundo, em teoria, com o relevo mais suave do que o real. Quanto maior for a largura do feixe, mais suavizado será o registro do relevo submerso. A presença de hipérbolas matemáticas no ecograma é um indicativo da ocorrência deste problema.

O pacote comercial *Hypack*, produzido pela *Coastal Oceanographics*, por exemplo, possui uma ferramenta chamada **sounding migration** para correção das profundidades eivadas das incertezas supracitadas. Foram realizados testes com a ferramenta e, a priori, obtiveram-se bons resultados para sondagens realizadas em taludes com inclinação regular.

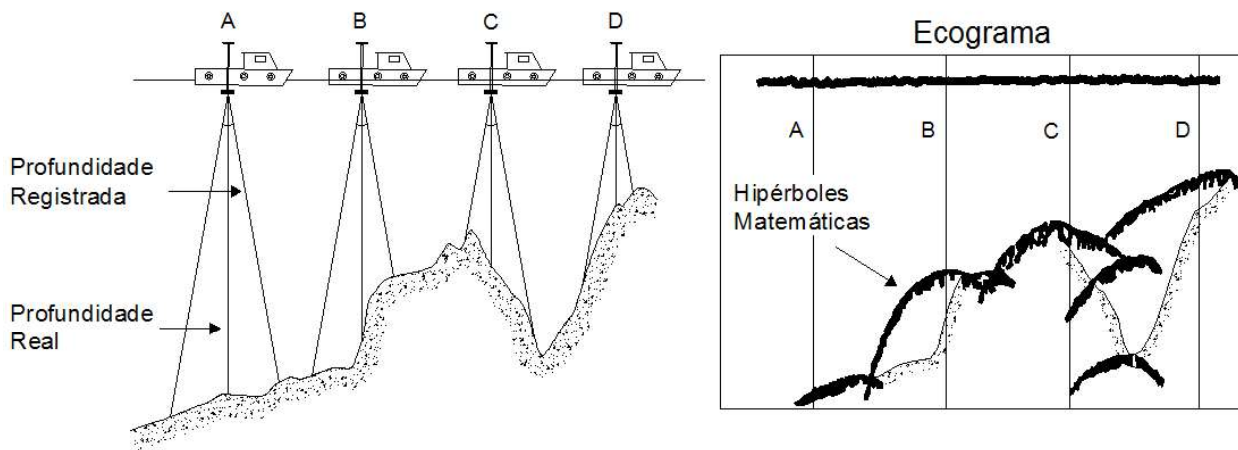


Fig. 5 - Ecograma formado por hipérbolas devido à largura do feixe e as irregularidades de fundo. À esquerda, sondagem realizada em um fundo irregular e, à direita, ecograma registrado falseando o fundo real. Fonte: Adaptado de Jong *et al.* (2010).

No entanto, o algoritmo não apresentou um bom comportamento para variações acentuadas de relevo, conforme pode-se observar na Fig. 6.

Nota-se que a ferramenta, na área estudada, pode falsear o relevo submerso. Nestes casos, é recomendável uma análise rigorosa do ecograma com processamento manual. A filtragem automática dos dados também deve ser utilizada

com cautela, sendo seu uso, na maioria das vezes, limitado a relevos planos.

Todavia, naqueles levantamentos hidrográficos onde seja necessário capturar os detalhes de fundo o uso de um ecobatímetro com feixe estreito é preferível (USACE, 2013). A Fig. 7 faz uma comparação entre medições com um transdutor de feixe estreito e um transdutor com feixe um pouco mais largo.

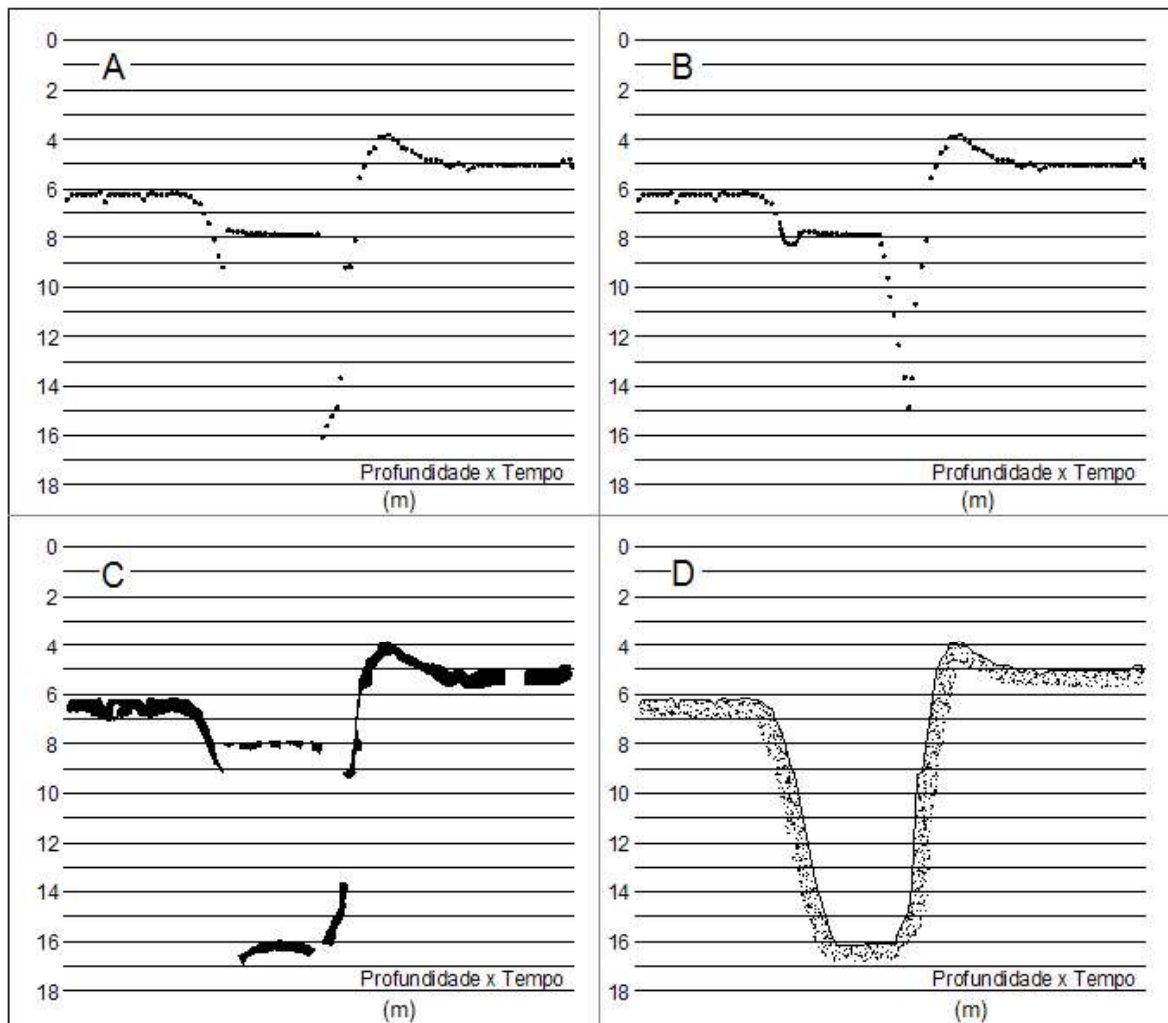


Fig. 6 - Sondagem bruta – digitalizada de forma automática pelo *software* de coleta de dados (A); Sondagem corrigida pela ferramenta *sounding migration* (B); Ecograma analógico (C) e Processamento manual baseado no ecograma (D).

Entretanto, o uso de feixes estreitos fica limitado à frequência e ao tamanho do transdutor, além de ser necessária uma estabilização do feixe para correta medição da profundidade na vertical do centro acústico do transdutor. A largura do feixe (γ), em graus decimais, para um transdutor em forma de pistão circular, de diâmetro D e comprimento de onda λ_{co} , é dada, aproximadamente, por:

$$\gamma = \frac{60 \lambda_{co}}{D} \quad (1)$$

Assim, o feixe será mais estreito quanto maior a frequência e quanto maior a dimensão do transdutor (IHO, 2005; USACE, 2013). Por exemplo, um transdutor circular com 15 kHz com um feixe de 30° possui cerca de 20 cm de

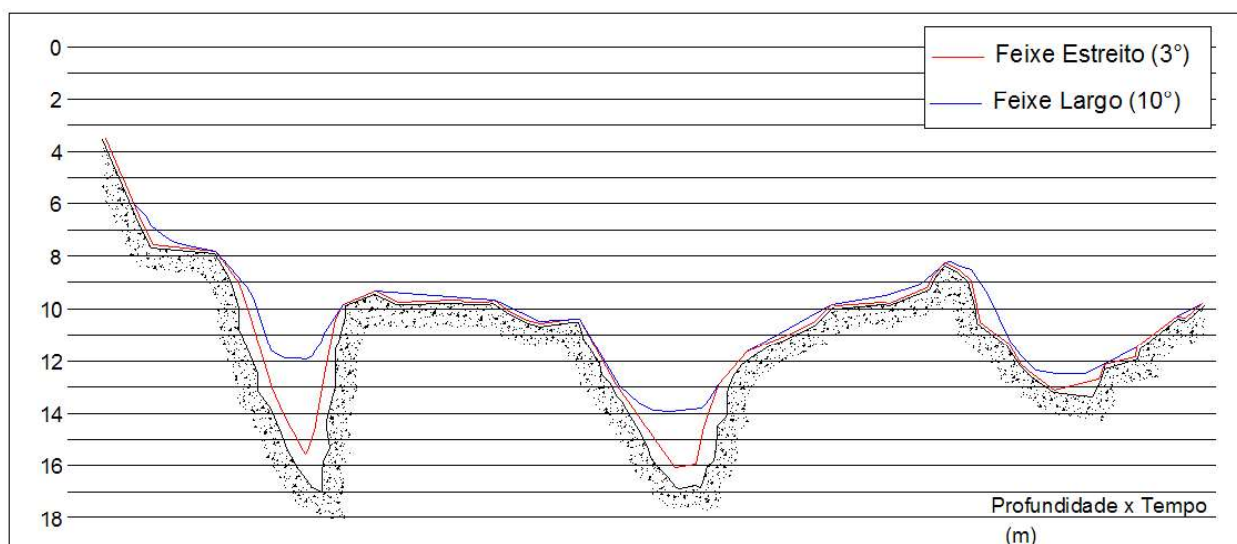


Fig. 7 - Perfil digitalizado com base em uma sondagem realizada com transdutor de feixe estreito (em vermelho) e com transdutor de feixe largo (em azul). Fonte: Adaptado de IHO (2005).

diâmetro. O mesmo transdutor construído com um feixe 1° teria um diâmetro de 6 m. Além disso, transdutores maiores exigem embarcações maiores e possuem elevado custo de fabricação.

Até o momento a onda acústica foi ilustrada como uma quantidade bidimensional, entretanto, é necessário enfatizar que, para transdutores em forma de pistão circular, o feixe acústico possui a forma geométrica tridimensional, aproximadamente de um cone (Fig. 8), limitado por um ângulo sólido expresso em esteroradianos (*beamwidth* definido para um nível de -3 dB), concluindo-se então que, a medição da profundidade é efetuada em qualquer direção dentro deste cone (IHO, 2005; JONG *et al.*, 2010; LURTON & LAMARCHE, 2015). Mais especificadamente, uma onda sonora é composta por um lóbulo principal, que define a diretividade e a largura do feixe do transdutor, e por lóbulos secundários, que apresentam efeitos indesejáveis conforme será apresentado adiante (Fig. 10).

Conforme é mostrado na Fig. 8, a ensonificação de fundo ou pegada do eco (*footprint*) é proporcional à profundidade, verificando-se que as incertezas devido à largura do feixe aumentam em áreas mais profundas. Este conceito, muitas vezes, confunde-se com o termo resolução horizontal, que, nas ciências cartográficas, é tratado como sendo de cunho mais abrangente. De forma análoga têm-se o termo resolução vertical.

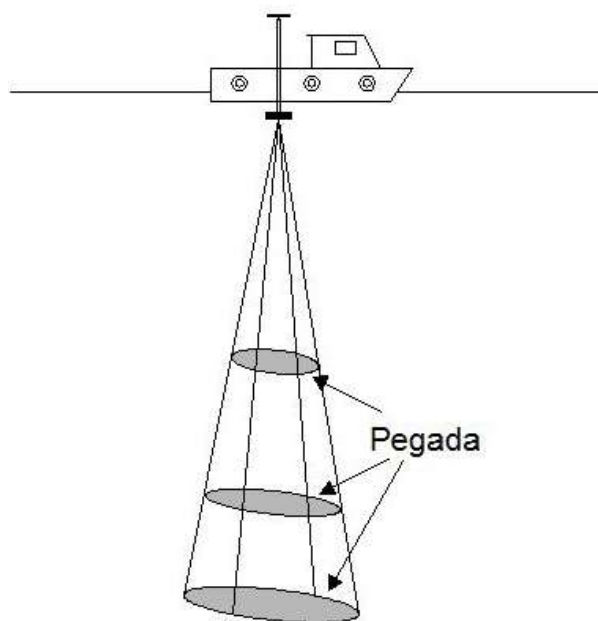


Fig. 8 - Área submersa coberta por um feixe acústico em diferentes profundidades.

A resolução vertical de uma onda sonora pode contribuir tanto com a incerteza de medição, já discutido, quanto com a capacidade de detecção do eco e é função de fatores como: duração do pulso, largura do feixe de transmissão, frequência da onda sonora e tipo de fundo. Esta definição está intimamente ligada com os conceitos apresentados nas Figuras 3, 4, 5, 6 e 7.

Teoricamente, dois pulsos serão distinguíveis à medida que a separação, em

tempo, entre eles, seja maior ou igual a metade da duração do pulso, também em tempo (SOUZA, 2006). Em outras palavras, tomando um ângulo de incidência normal (SBES), dois objetos separados por uma distância menor que a metade do comprimento de pulso do feixe acústico serão registrados no ecograma como um único objeto. Por exemplo, considerando um pulso acústico com frequência de 15 kHz e duração de 1ms, em uma área com velocidade de propagação do som de 1500 m/s, o comprimento de onda e o comprimento do pulso serão, respectivamente, 0,10 m e 1,50 m, assim, a resolução vertical da onda acústica será de 0,75 m.

Este conceito é esclarecido na Fig. 9, onde um objeto separado do solo submerso por uma distância menor que 0,75 m é identificado no ecograma como parte do fundo, prejudicando a análise.

Quando se efetua pesquisas em águas muito rasas surge o problema da detecção por lóbulos secundários que ocasionam ecos laterais e conseqüente incerteza no posicionamento e na medição da profundidade, conforme descrito na Fig. 10. Nota-se que o efeito gerado pelos ecos laterais é semelhante aos efeitos advindos de uma sondagem utilizando transdutores com feixe largo.

Ecos laterais devem ser eliminados no processamento através da interpretação do ecograma, tarefa esta que requer conhecimento de acústica submarina (hidroacústica) por parte do pesquisador/hidrógrafo. É evidente que

transdutores com maior diretividade (menor largura do feixe de transmissão) possuem menor influência de lóbulos laterais.

Conforme discutido, o uso de ecogramas no processamento dos dados de profundidade é essencial e a incerteza na leitura do ecograma irá se propagar de forma direta para a observação de profundidade. Para ecogramas digitais, comum nos sondadores atuais, essa incerteza é desprezível. Entretanto, quando a análise é realizada por meio de ecogramas analógicos, pode ocorrer incertezas que afetem a profundidade reduzida. Considerando um registro realizado em um papel com largura de 20,0 cm e escala de 0 - 20 m (1/100), uma variação de 0,5 mm na leitura do ecograma irá produzir uma incerteza de 5,0 cm no registro da profundidade.

Durante a interpretação do ecograma é importante analisar, além dos ecos laterais, os ecos falsos (*spikes*) e múltiplos. Os *spikes* são causados, principalmente, por material em suspensão, mas podem ser causados também por peixes, bolhas de ar, mudanças abruptas de temperatura, presença de plânctons, dentre outros. São detectados, geralmente, por sondadores operando em altas frequências que são mais sensíveis devido ao menor comprimento de onda.

São caracterizados no ecograma como profundidades anômalas que se dispersam muito das profundidades vizinhas (isto é, *outliers*). Se houver certa consistência desses spikes deve-se, na dúvida, refazer a sondagem para validar o possível eco falso.

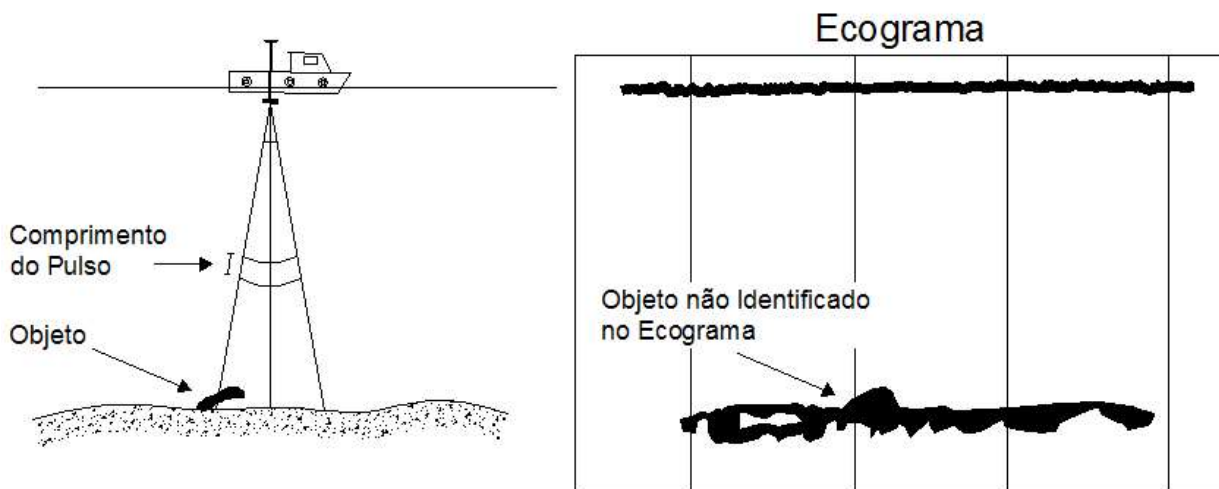


Fig. 9 - Influência da resolução do pulso acústico na análise do ecograma.

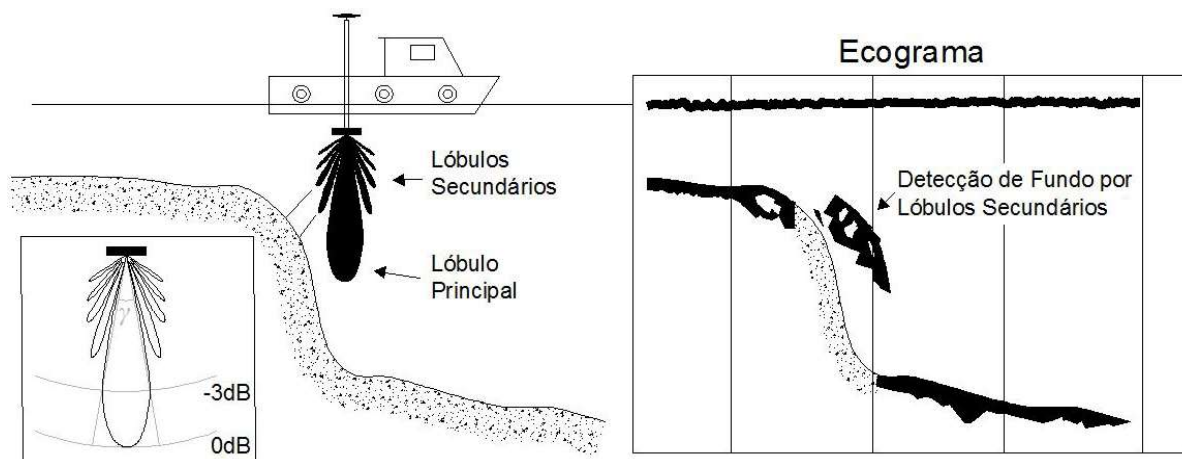


Fig. 10 - Feixe acústico formado pelo lóbulo principal e lóbulos secundários e ecograma mostrando a detecção de fundo por lóbulos secundários. Em destaque, à esquerda, largura do feixe (γ) definida a um nível de -3dB.

A Fig. 11 ilustra um ecograma digital do ecobatímetro *Hydrobox* e o perfil de fundo digitalizado de forma automática pelo sistema de aquisição de dados. Analisando o ecograma, pode-se perceber que as profundidades anômalas (*spikes*) digitalizadas de forma automática são realmente ecos falsos, sendo assim, devem ser eliminadas durante o processamento dos dados.

Configurações equivocadas de ganho e potência também podem causar ecos falsos, mas causam principalmente ecos múltiplos, que são ecos recebidos após o primeiro retorno do fundo, devido a reflexões múltiplas entre o fundo e a superfície (IHO, 2005; USACE, 2013). Estas reflexões são, na maioria das vezes, fáceis de identificar por serem registadas como múltiplos da profundidade local.

No entanto, durante o levantamento podem-se evitar ecos falsos e ecos múltiplos através

de simples configurações no equipamento. O conhecimento do tipo de fundo neste caso é peça fundamental.

Fundos de lama, por exemplo, absorvem uma parte considerável da energia da onda sonora, sendo necessário ajustar a potência e/ou o ganho em níveis mais altos. Fundos consolidados, ao contrário, refletem muito bem o som e, neste caso, um ajuste equivocado da potência e/ou ganho pode gerar ecos múltiplos que, ocasionalmente, se convertem em interpretações errôneas da profundidade (IHO, 2005; JONG *et al.*, 2010; USACE, 2013).

Níveis mais altos de potência e ganho resultam, respectivamente, em níveis mais altos de reverberação, conduzindo a um mau registro, e em uma amplificação dos ruídos, sendo sempre recomendável que estes sejam mantidos em níveis mínimos, mas que garantam a detecção de fundo.

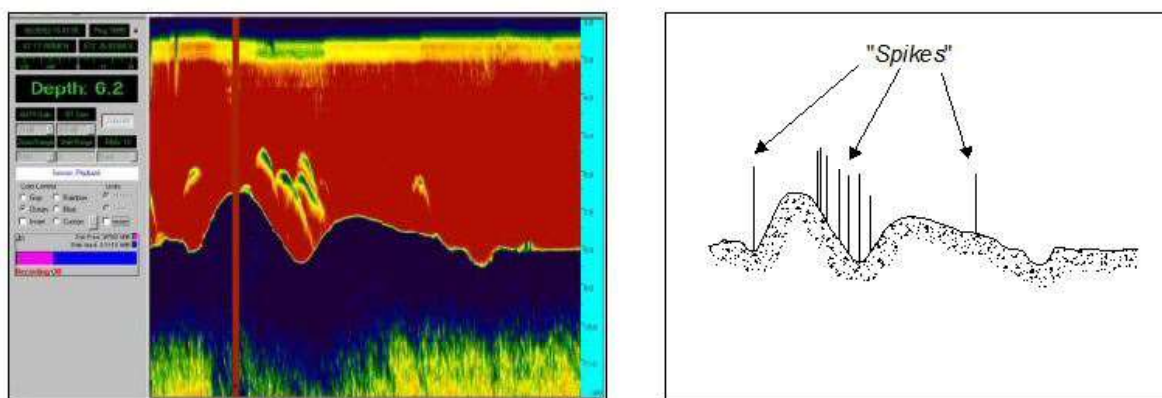


Fig. 11 - Ecograma digital proveniente do ecobatímetro modelo *Hydrobox* da fabricante *SyQwest, Inc.*, à esquerda, e perfil de fundo digitalizado de forma automática pelo software de coleta de dados, à direita.

Outro fator a ser considerado na interpretação do ecograma são os sedimentos não consolidados (IHO, 2005; USACE, 2013). O fundo submerso é coberto por camadas de sedimentos e o uso de um transdutor de baixa frequência pode levar a uma interpretação equivocada da espessura da coluna d'água. Isso se deve ao fato das baixas frequências penetrarem nos sedimentos não consolidados do leito submerso, conforme descrito na Fig. 12 (SOUZA, 2006; FERREIRA et al., 2015). Além do mais, transdutores de maior frequência (100 kHz a 1000 kHz) fornecem uma melhor resolução na medição da profundidade (USACE, 2013).

No entanto, transdutores de baixa frequência ainda são utilizados, por exemplo, em pesquisas de pós-dragagem, onde haja sedimentos em suspensão que impeçam a detecção de fundo, ou em levantamentos de áreas restritas, onde coluna de lama fluída é, na maioria das vezes, utilizada para navegação (IHO, 2005; USACE, 2013). Levantamentos em águas profundas também requerem transdutores de baixa frequência.

De acordo com USACE (2013) é sempre recomendável utilizar um SBES dupla frequência visando separar de forma mais acurada sedimentos consolidados de sedimentos não consolidados, principalmente, em águas rasas.

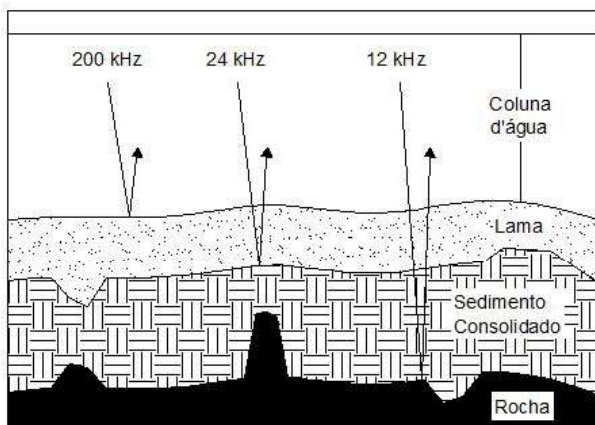


Fig. 12 - Camadas de fundo detectadas por diferentes frequências acústicas.

2.3. Incerteza devido aos movimentos da embarcação

Nos levantamentos hidrográficos realizados com um SBES, incertezas na medição da profundidade são introduzidas devido aos

movimentos de *roll* (balanço), *pitch* (caturro) e *heave* (arfagem) (IHO, 2005; USACE, 2013). Sendo assim, as profundidades observadas devem ser compensadas dos valores de rotação em torno do eixo longitudinal da plataforma de sondagem (*roll* - Φ), dos valores de rotação em torno do eixo transversal da plataforma de sondagem (*pitch* - θ) e do movimento vertical da plataforma de sondagem (*heave*).

Considerando o caso ideal de um fundo plano, um desvio em *roll* ou *pitch* de 1° conduziria a uma incerteza vertical de aproximadamente 2 mm em uma profundidade local de 10 m. Conforme exposto na Fig. 13, movimentos de *roll* e *pitch* da plataforma de sondagem, implicarão em uma inclinação da antena GNSS, causando também incertezas no posicionamento planimétrico.

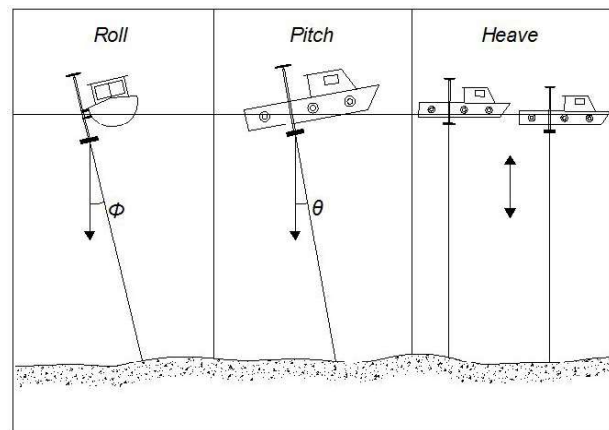


Fig. 13 - Incerteza na medição da profundidade devido aos movimentos de Roll, Pitch e Heave da plataforma de sondagem.

De acordo com IHO (2005) o *roll* e o *pitch* afetam a medição da profundidade somente quando a sua magnitude é superior a metade da largura do feixe acústico emitido pelo transdutor. Operando em águas calmas (como no caso de reservatórios) a compensação destes efeitos pode ser negligenciada (USACE, 2013; FERREIRA et al., 2015). Entretanto, quando se utilizam transdutores com feixe estreito o conhecimento dos ângulos de *roll* e de *pitch* são necessários para a estabilização do feixe, permitindo a correta medição da profundidade na vertical do transdutor.

Estas rotações podem ser determinadas através de sensores inerciais (*IMU - Inertial Measurement Unit*). Os sensores inerciais

aplicam as leis de movimento de Newton e são compostos por giroscópios e acelerômetros. Os acelerômetros são usados para medir as acelerações do centro de massa da embarcação, fornecendo assim as forças que agem sobre o mesmo. Os giroscópios são empregados para determinar as rotações em torno deste centro de massa e, por conseguinte, permitem analisar a situação de equilíbrio da embarcação (KÜCHLER *et al.*, 2011; FERREIRA *et al.*, 2015). Quando se utilizarem sensores inerciais, a instalação deve ser efetuada próximo ao centro de massa da plataforma de sondagem.

O *heave* é causado pela ação de ondas sobre a plataforma de sondagem e pode ser medido através de sensores inerciais, assim como o *roll* e *pitch*, ou simplesmente por compensadores de onda. Este efeito dificilmente causará incertezas na medição de profundidade em ambientes lênticos, porém seu uso é sempre recomendável. Quando for utilizado um compensador de ondas, este deve ser fixado na vertical do transdutor para medir o *heave* de forma efetiva (HARE, 1995; IHO, 2005). Analisando a Fig. 13, percebe-se que o efeito *heave* propaga-se para a profundidade de forma direta.

2.4. Incerteza devido à disposição dos equipamentos a bordo

Um sistema de sondagem é composto por diversos equipamentos, como por exemplo, ecobatímetros, receptores GNSS e sensores inerciais. Para que as informações coletadas pelos diversos sensores possam ser sincronizadas, é necessário o conhecimento da posição destes sistemas em relação a um ponto de referência do sistema de coordenadas da embarcação. Incertezas no posicionamento destes sensores irão introduzir incertezas horizontais e verticais na medição da profundidade reduzida (CLARKE, 2003).

É comum em pequenas embarcações de sondagem monofeixe a instalação de todos os sensores (transdutor, compensador de ondas e antena GNSS) alinhados na vertical do transdutor, sem afastamentos horizontais (*offsets*). Esse alinhamento possibilita a simplificação do modelo matemático de correção das incertezas de posicionamento da antena GNSS em relação ao transdutor, permite a medição do efeito *heave* de forma efetiva e evita a introdução de

efeitos sistemáticos derivados da medição de afastamentos (FERREIRA *et al.*, 2015). Deve-se atentar que qualquer desalinhamento entre a antena GNSS e o transdutor irá gerar incertezas no posicionamento da sondagem.

Quando um sistema inercial é utilizado para medição do *roll*, *pitch* e *heave*, a instalação deste ocorre, preferencialmente, no centro de massa da plataforma de sondagem. Nestes casos, poderão ser gerados afastamentos (*offsets*) entre o sistema inercial e os demais sistemas a bordo. Devido a essa configuração, por exemplo, o efeito *heave* observado pelo sistema inercial não condiz com o *heave* efetivamente sofrido pelo transdutor, devendo-se este efeito ser transferido para a posição do transdutor através do *heave* induzido e, diante disso, qualquer incerteza na medição dos afastamentos irá se propagar para a determinação do efeito *heave* (HARE, 1995; IHO, 2005).

Em todos os casos, quando não for possível a instalação de todos os equipamentos alinhados na vertical do transdutor, devem-se medir os afastamentos com a menor incerteza possível, preferencialmente, por topografia clássica, empregando ajustamento de observações e com a plataforma de sondagem em doca seca. Todavia, principalmente para grandes embarcações, pode não ser possível o emprego desta metodologia. Neste sentido, Clarke (2003) propôs uma metodologia para detecção dos alinhamentos entre os sensores com a embarcação em movimento (alinhamento dinâmico). Contudo, algumas falhas são apontadas, especialmente, a que a metodologia proposta não possibilita o alinhamento dos sensores em relação ao sistema de referência da embarcação.

2.5. Incerteza devido ao *draft*, demais variações dinâmicas da embarcação e ao estabelecimento do nível de redução

Para a obtenção das profundidades com o SBES é necessário somar o valor das sondagens à profundidade de imersão do transdutor (*draft*). O *draft* deve ser medido com alto rigor, pois qualquer incerteza na sua medição propagar-se-á de forma direta para a profundidade. Mesmo assim, devido à variação dinâmica do calado, poderá ser necessário atualizar a altura de imersão do transdutor durante o levantamento. Variações dinâmicas de calado ocorrem,

principalmente, devido às mudanças de cargas a bordo (IHO, 2005; USACE, 2013).

Recomenda-se medir o *draft* com a embarcação carregada e efetuar um monitoramento durante o levantamento, visando compensar qualquer alteração. De acordo com USACE (2013) um aumento na velocidade da plataforma de sondagem poderá aumentar as incertezas devido ao calado dinâmico, conduzindo a uma incerteza na medição da profundidade devido ao assentamento (*settlement*) e a variação dinâmica do caimento (*squat*).

Estes efeitos, por vezes, são difíceis de quantificar, recomendando-se operar a plataforma de sondagem em baixas velocidades, o que reduzirá estes e também aqueles devidos aos movimentos da embarcação (*roll, pitch e heave*). A velocidade da embarcação também tem influência na densidade de pontos coletados, devendo-se esta, juntamente com a taxa de medição de profundidade, ser considerada no planejamento da sondagem. Conforme citado, a velocidade da embarcação também tem relação com os efeitos devido a latência.

A variação do nível da água durante o levantamento introduzirá incertezas na medição da profundidade na mesma magnitude de sua variação. Idealmente, deve-se utilizar marégrafos distribuídos pela área sondada visando-se realizar o zoneamento de maré (DHN, 2014).

O monitoramento do nível d'água em ambientes onde não existam variações bruscas pode ser realizada em apenas dois momentos, no início e no fim do levantamento hidrográfico (Ferreira et al., 2015). Esse registro pode ser realizado a partir de medições da altura da lâmina d'água em réguas linimétricas instaladas nas proximidades da área sondada.

As medições de profundidade, após sofrer todas as correções apresentadas, devem ser reduzidas para o *Datum* vertical, visando-se obter as profundidades reduzidas. Deste modo, é preferível que as réguas ou marégrafos utilizados no monitoramento das variações do nível d'água sejam niveladas em relação ao NR (Nível de Redução - *Datum* vertical). Para coordenar os pontos de apoio (marcas de nivelamento), para posterior utilização das réguas ou marégrafos, recomenda-se a utilização do nivelamento geométrico de precisão.

3. CÁLCULO DA IPT DA PROFUNDIDADE REDUZIDA

Se todas as fontes de incertezas individuais apresentadas forem devidamente avaliadas ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \dots$), pode-se combiná-las através da lei de propagação de incertezas para calcular a Incerteza Propagada Total (IPT) da profundidade reduzida que o sistema em questão operando na área considerada pode alcançar (IHO, 2005; HARE et al., 2011). Considerando a não correlação entre os contribuintes e uma distribuição aproximadamente normal, a IPT da profundidade reduzida é dada pela Equação 2 (IHO, 2005; LINZ, 2010; FERREIRA et al., 2015):

$$IPT = \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots} \quad (2)$$

Conforme exposto, a IVT e a IHT podem ser estimadas a partir de uma propagação de covariâncias considerando apenas as fontes de incerteza que as afetam individualmente e, neste caso, pode-se calcular a IPT através da Equação 3:

$$IPT = \pm \sqrt{IHT^2 + IVT^2} \quad (3)$$

Segundo IHO (2008), uma maneira mais conservadora de calcular a IPT é através de uma soma aritmética entre a IHT e a IVT, no entanto, isso irá superestimar significativamente a incerteza total, ou seja, subestimar a qualidade do levantamento.

4. EXEMPLO DE CÁLCULO DA IPT DA PROFUNDIDADE REDUZIDA

A seguir apresentam-se os resultados da estimativa de incerteza da profundidade reduzida do sistema de sondagem monofeixe montado a bordo da embarcação EAM-01 do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa. Os valores apresentados são baseados nas estimativas apresentadas neste texto, nas precisões nominais dos equipamentos, em Calder & Mayer (2003), IHO (2005) e em LINZ (2010).

O sistema de sondagem monofeixe em questão é composto por:

a) Ecobatímetro modelo *Hydrobox DC* com transdutor de 33/210 kHz da marca *SyQwest, Inc.*, com *beamwidth* de 8° para a frequência de 210 kHz e 23° para a frequência de 33 kHz. Este ecobatímetro possui precisão nominal de 2,5 cm para profundidades menores que 40 m; 5,0 cm para profundidades entre 40 e 200 m e 10,0 cm para profundidades maiores que 200 m.

b) Sensor de movimentos modelo *DMS-05* da marca *Teledyne TSS*. Este equipamento possui precisão nominal na medição do *Heave* de 5,0 cm ou 5% da profundidade (o que for maior) e 0,05° (3') nas observações de *Roll* e *Pitch*.

c) SVP (*sound velocity profiler*) modelo *Digibar S* da marca *Teledyne Odom Hydrographic*. Este equipamento possui precisão nominal 0,2 m/s.

Para o georreferenciamento das sondagens é utilizado um sistema RTK modelo *Triumph I* da marca *JAVAD GNSS* com precisão nominal de 1,0 cm + 1ppm nas observações de latitude e longitude geodésicas.

Este sistema de sondagem é, na maioria das vezes, utilizado em reservatórios e barragens (ambientes lânticos) com a plataforma de sondagem operando em baixas velocidades (cerca de 2 m/s). Nestes casos, efeitos advindos dos movimentos da embarcação são reduzidos, principalmente os referentes às rotações (*roll* e *pitch*).

No monitoramento da variação do nível da água (maré) são utilizadas réguas linimétricas em modelo de alumínio, fibra de vidro ou PVC onde realizam-se leituras com precisões 1,0 cm. Estas são geralmente niveladas em relação ao NR (nível de redução) através de nivelamento geométrico de precisão. Para este estudo considera-se a incerteza no estabelecimento do NR como sendo de 5,0 cm.

A Tabela 1 resume as fontes de incerteza vertical da profundidade reduzida consideradas neste estudo. Verifica-se que a incerteza devido às variações da velocidade de propagação do som depende da profundidade observada.

A IVT poderá ser computada através da Equação 2 considerando apenas as fontes de incerteza vertical analisadas neste estudo, conforme Tabela 1. Tais incertezas remetem um nível de confiança de 68% ou 1σ. Entretanto, as normativas, em sua maioria, exigem que as incertezas sejam apresentadas ao nível de confiança de 95% ou 1,96σ.

Tabela 1: Fontes de incerteza vertical da profundidade reduzida a um nível de confiança de 68%

Fonte de incerteza	Estimativa de Incerteza Vertical (m) (68% ou 1σ)
Ecobatímetro (engloba o efeito da medição de tempo)	0,025
Velocidade do som (V _{médio} = 1500 m/s)	
Forma e Tipo de fundo	0,00
Resolução do ecograma (E: 1/100)	0,05
<i>Roll</i> e <i>Pitch</i>	0,00
<i>Heave</i>	0,05
Medição do <i>draft</i>	0,01
Variações dinâmicas do calado	0,10
Variações do nível d'água durante a sondagem	0,01
Estabelecimento do NR	0,05

Sendo assim, a Fig. 14 ilustra a IVT estimada da profundidade reduzida ao nível de confiança de 95% que o sistema considerado neste estudo pode alcançar. Pode-se perceber que para profundidades menores que 40 m a IVT é sempre menor que 30 cm, com variações menores que o milímetro.

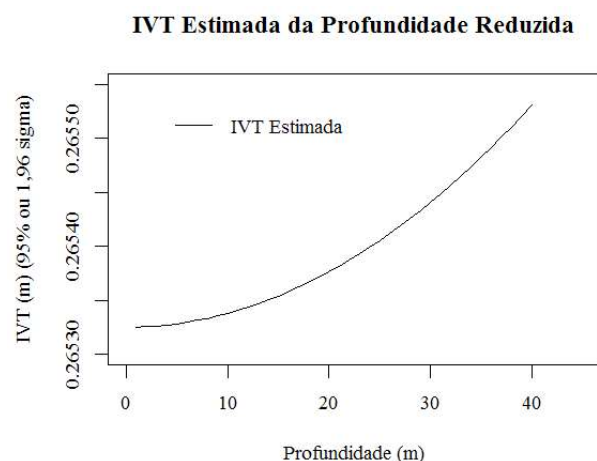


Fig. 14 - Estimativa da IVT da profundidade reduzida ao nível de confiança de 95%.

Confrontando os valores da IVT do sistema de sondagem em questão com as exigências de incerteza vertical para levantamentos hidrográficos da Marinha do Brasil, publicados

na NORMAM-25 (DHN, 2008), em consonância com a Publicação Especial S-44 (IHO, 2008), pode-se verificar que o sistema é capaz de alcançar os requisitos de levantamentos hidrográficos de Ordem 1a, 1b e 2 (Fig. 15). Analisando a Fig. 15, pode-se concluir ainda, que para profundidades maiores que 12 m, o sistema também é capaz de cumprir as exigências de um levantamento hidrográfico de Ordem Especial. Entretanto, evidencia-se que as Ordens Especial e 1a exigem a cobertura total do fundo submerso e, deste modo, não podem ser executadas por sistemas monofeixe, salve se o levantamento for complementado com um levantamento com sonar lateral, para garantir a detecção (posição e profundidade) de todos objetos com aresta superior a 1m (IHO, 2008).

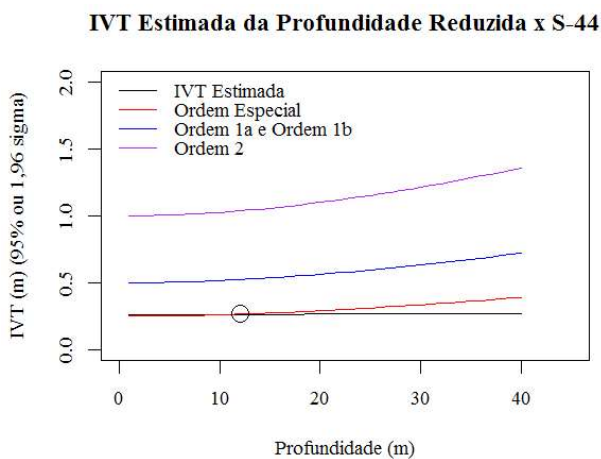


Fig. 15. Comparativo entre a IVT estimada do sistema de sondagem e os valores da máxima incerteza admissível recomendados na Publicação Especial S-44 ao nível de confiança de 95%.

De forma análoga, para o cálculo da IHT avaliam-se apenas as fontes de incerteza planimétrica. Conforme discutido, estas incertezas, em sua maioria, foram consideradas na modelagem da IVT, minimizadas ou desconsideradas por não se aplicarem a sondagens monofeixe. Sendo assim, neste estudo, considerou-se como incerteza planimétrica apenas a precisão nominal do sistema de posicionamento RTK, dada pela Equação 4:

$$IHT = \sigma_p = \sqrt{\sigma_\phi^2 + \sigma_\lambda^2} = 1cm + 1ppm \quad (4)$$

De acordo com Leick (1995), σ_p é conhecido como *Mean Position Error* e é o raio de um círculo que define um nível de confiança de 64 a 77%. De acordo com o mesmo autor, $2 \cdot \sigma_p$ remete a um nível de confiança de 95 a 98% na estimativa da posição (ϕ, λ).

A IHT estimada do sistema de sondagem apresentado neste estudo é capaz de cumprir todos os requisitos de incerteza horizontal para levantamentos hidrográficos da Marinha do Brasil (DHN, 2014).

Conforme apresentado na Equação 4, a IHT depende da distância de linha base, ou seja, a incerteza horizontal irá variar de acordo com a distância entre a antena RTK da plataforma de sondagem (*rover*) e a base RTK. Limitando a execução do levantamento hidrográfico a um raio de, no máximo, 10 km ($2 \cdot \sigma_p = 4$ cm), a IHT máxima do sistema de sondagem será de 4 cm (nível de confiança de ~ 95%). Computadas as componentes vertical e horizontal da incerteza total, pode-se estimar a IPT através da Equação 3.

A Fig. 16 ilustra a IPT estimada do sistema de sondagem ao nível de confiança de, aproximadamente, 95% que o sistema considerado, nas condições apresentadas, pode atingir.

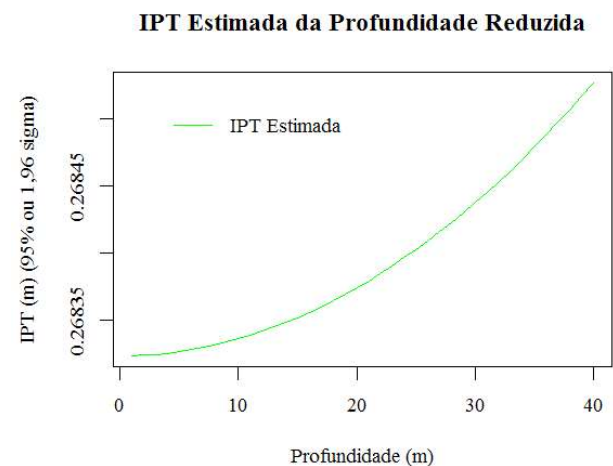


Fig. 16. Estimativa da IPT da profundidade reduzida ao nível de confiança de 95%.

Comparando a IVT e a IPT (Fig. 17), percebe-se que a última é ligeiramente maior que a primeira, constatando que a IHT tem pouca influência sobre a incerteza propagada total do sistema de sondagem considerado neste estudo.

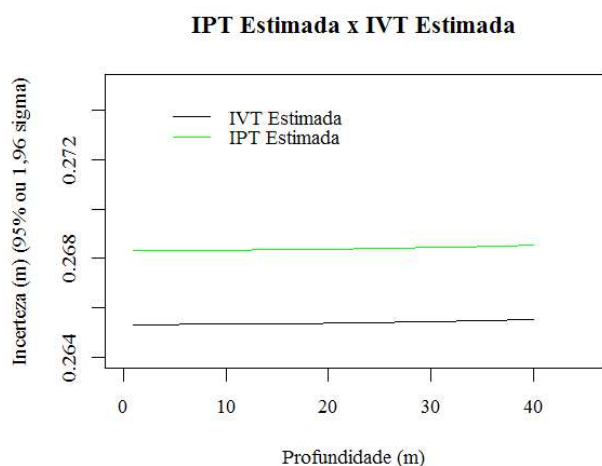


Fig. 17. Comparativo entre a IPT e a IVT estimada do sistema de sondagem ao nível de confiança de 95%.

4. CONCLUSÕES

Percebe-se que a IPT calculada pela Equação 2, apesar de considerar as fontes de incerteza obtidas em todas as etapas de um levantamento hidrográfico, sejam elas sistemáticas ou aleatórias, estabelece uma estimativa da incerteza do levantamento baseada nos possíveis desvios não correlacionados do sistema de sondagem (IHO, 2005; LINZ, 2010; FERREIRA *et al.*, 2015). Entretanto, deve-se considerar que as incertezas utilizadas na computação da IPT pela equação 2 são, em sua maioria, resultantes de testes de laboratório, que não consideram as reais condições de operação.

A Equação 2, na verdade, apenas demonstra a capacidade do sistema de levantamento, não leva em consideração a aleatoriedade de medidas obtidas naturalmente, como é o caso das sondagens. Além disso, conforme afirma IHO (2014), simplesmente fazer uso de um equipamento teoricamente capaz de fazer face à incerteza requerida, não é necessariamente o bastante. Sendo assim, é preferível que o cálculo da IPT seja baseado em observações redundantes.

Porém, a coleta de dados redundantes em ambientes submersos não é tão simples como no mapeamento terrestre, onde é possível efetuar inúmeras observações repetidas para um posterior ajustamento de observações além de fixar pontos de controle. Em um levantamento hidrográfico até mesmo a detecção de outliers torna-se uma tarefa árdua, principalmente,

devido à superfície de fundo submerso não ser visível (USACE, 2013; FERREIRA *et al.*, 2015). Portanto, estimar a precisão de um levantamento hidrográfico, que somente pode ser obtida através de suposições estatísticas, torna-se impraticável.

Assim, a metodologia apresentada pode ser utilizada para avaliar, a priori, se determinado ecobatímetro de feixe simples, bem como a disposição de equipamentos montados a bordo, é capaz de atingir as exigências do projeto. Pode-se verificar, no planejamento, se o sistema de sondagem é capaz de fazer face às incertezas requeridas pelo projeto em questão ou se existe a necessidade de substituir o sistema ou parte dele, tal como recomenda a Publicação Especial S-44, 5ª edição (IHO, 2008).

Através da aplicação da metodologia proposta pode-se constatar que o sistema monofeixe montado a bordo da embarcação EAM-01 cumpre os requisitos da Norma para execução de levantamentos hidrográficos da Marinha do Brasil (NORMAM-25), sendo capaz de executar levantamentos até mesmo de ordem Especial.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA – Agência Nacional de Águas. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. Brasília: ANA, SGH, 40 p., 2013.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. 2ª ed. SBEE, 274 p., 2003.
- ARTILHEIRO, F. M. F. **Analysis and Procedures of Multibeam Data Cleaning for Bathymetric Charting**. M. Eng. report, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report n. 192, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 186 p., 1998
- ATHEARN, N.; TAKEKAWA, J.; JAFFE, B.; HATTENBACH, B. **Mapping elevations of tidal wetlands restoration sites in San Francisco Bay: comparing accuracy of aerial Lidar with a singlebeam echosounder**. Journal of Coastal Research, v. 26, n. 2, p. 312-319, 2010.
- CALDER, B. R. & MAYER, L. A. **Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data**. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, v. 4, n. 6, 2003.
- CHENG, L.; MA, L.; CAI, W.; TONG, L.;

- LI, M.; DU, P. **Integration of Hyperspectral Imagery and Sparse Sonar Data for Shallow Water Bathymetry Mapping**. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, v. 53, n. 6, p. 3235-3249, 2015.
- CLARKE, J. E. H. **A reassessment of vessel coordinate systems: what is it that we are really aligning?.** In: US Hydrographic Conference. 2003
- DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação. **NORMAM 25: Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos**. Marinha do Brasil, Brasil, 52 p., 2014.
- DUNNEWOLD, J. **Dynamic calibration of multibeam systems**. The Netherlands: Delft University Press, 82 p., 1998.
- ELLMER, W.; ANDERSEN, R. C.; FLATMAN, A.; MONONEN, J.; OLSSON, U.; ÖIÄS, H. **Feasibility of Laser Bathymetry for Hydrographic Surveys on the Baltic Sea**. The International Hydrographic Review, n. 12, p. 33-50, 2014.
- FERREIRA, Í. O.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R.; **Coleta, processamento e análise de dados batimétricos**. 1ª ed. Saarbrücken: Novas Edições Acadêmicas, v. 1, 100 p., 2015.
- FERREIRA, Í. O.; SANTOS, G. R.; RODRIGUES, D. D. **Estudo sobre a utilização adequada da krigagem na representação computacional de superfícies batimétricas**. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, v. 65, n. 5, p. 831-842, 2013.
- FERREIRA, I. O.; ZANETTI, J.; GRIPP, J. S.; MEDEIROS, N. G. **Viabilidade do uso de imagens do sistema Rapideye na determinação da batimetria de águas rasas**. Revista Brasileira de cartografia, Rio de Janeiro, v. -, n. -, p. -, [s.d.].
- GAO, J. **Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations**. Physical Geography, v. 33, n. 1, p. 103-116, 2009.
- GODIN, A. **The Calibration of Shallow Water Multibeam EchoSounding Systems**. M. Eng. report, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report n. 190, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 182 p., 1998.
- GUENTHER, G. C.; THOMAS, R. W. L.; LAROCQUE, P. E. **Design considerations for achieving high accuracy with the Shoals bathymetric Lidar system**. In: CIS Selected Papers: Laser Remote Sensing of Natural Waters-From Theory to Practice. International Society for Optics and Photonics, p. 54-71, 1996.
- HARE, R. **Depth and position error budgets for multibeam echosounding**. The International Hydrographic Review, v. 72, n. 2, p. 37-69, 1995.
- HARE, R.; EAKINS, B.; AMANTE, C. **Modelling bathymetric uncertainty**. The International Hydrographic Review, n. 6, p. 31-42, 2011.
- IHO – International Hydrographic Organization. **C-13: IHO Manual on Hydrography**. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 540 p., 2005.
- IHO – International Hydrographic Organization. **S-44: IHO Standards for Hydrographic Surveys**. Special Publication n. 44 - 5th. Mônaco: International Hydrographic Bureau, 36 p., 2008.
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia Normalização, Qualidade e Tecnologia. **Avaliação de dados de medição: guia para a expressão de incerteza de medição (GUM 2008)**. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 141 p., 2012a
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia Normalização, Qualidade e Tecnologia. **Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais de termos associados (VIM 2012)**. Duque de Caxias, RJ : INMETRO, 94 p., 2012b.
- JONG, C.D.; LACHAPPELLE, G.; SKONE, S.; ELEMA, I.A. **Hydrography**. 2ª ed. Delft University Press: VSSD, 354p., 2010.
- KÜCHLER, S.; EBERHARTER, J. K.; LANGER, K.; SCHNEIDER, K.; SAWODNY, O. **Heave Motion Estimation of a Vessel Using Acceleration Measurements**. In: IFAC World Congress, v. 18, n. Part 1, p. 14742-14747, 2011.
- LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, 560 p., 1995.
- LINDBERG, J. **Single Beam Latency Calibration in HYPACK**. Hypack Newsletter. Mar - 2011.
- LINZ – Land Information New Zealand. **Contract Specifications for Hydrographic Surveys**. New Zealand Hydrographic Authority. V. 1.2, 111p., 2010.
- LURTON, X. & LAMARCHE, G. **Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars: Guidelines and Recommendations**. Geohab

Backscatter Working Group, 200 p., 2015.

MALEIKA, W. **The influence of the grid resolution on the accuracy of the digital terrain model used in seabed modeling.** Marine Geophysical Research, v. 36, n. 1, p. 35-44, 2015.

MIKHAIL, E. & ACKERMAN, F. **Observations and Least Squares.** University Press of America, 497 p., 1976.

MONICO, J. F. M.; DAL POZ, A. P.; GALO, M.; SANTOS, M.C.; OLIVEIRA, L. C. **Acurácia e Precisão: Revendo os conceitos de forma acurada.** Boletim de Ciências Geodésicas, v. 15, n. 3, p. 469-483, 2009.

PASTOL, Y. **Use of Airborne LIDAR Bathymetry for Coastal Hydrographic Surveying: The French Experience.** Journal of Coastal Research. n. 62, p. 6-18. 2011.

RODRIGUES, D. D. **Topografia: Planimetria para Engenheiros Agrimensores e Cartógrafos.** Apostila. Universidade Federal de Viçosa. 2008.

SANTOS, A. P.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, N. T.; GRIPP JUNIOR, J. **Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais utilizando**

técnicas de estatística espacial: proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira. Boletim de Ciências Geodésicas. v. -, n. -, p. -, 2016.

SEKELLICK, A.J. & BANKS, W.S.L. **Water volume and sediment accumulation in Lake Linganore, Frederick County, Maryland.** U.S. Geological Survey, Scientific Investigations Report 2010–5174, 14 p, 2010.

SOUZA, L. A. P. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas.** São Paulo, 2006. 311 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **Hydrographic Surveying.** Engineer Manual n. 1110-2-1003. Department of the Army. Washington, D. C. 2013.

WMO – World Meteorological Organization. **Manual on Sediment Management and Measurement.** Operational Hydrology Report n. 47. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2003.