

Avaliação da qualidade de informações batimétricas recuperadas de sísmica rasa em áreas de assentamento de plataformas autoelevatórias

Helder Barros Gama Vieira¹
Cláudio David dos Reis Vila Flor¹
Orlando Demétrio Zaloti Junior¹

¹ Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS
Unidade de Operações de Exploração e Produção da Bahia – E&P-NNE/UO-BA
Gerência de Geodésia – UO-BA/EXP/GDS
Av. Antônio Carlos Magalhães 1113, sala 302 – Salvador (BA)
{claudiovilafior, heldergama, orlandozaloti}@petrobras.com.br

Abstract. This paper analyses a recovery method of bathymetric information from shallow seismic surveys. The context of issue is positioning of jack-up rigs that needs a set of hydrographic surveys to improve security in the activity to leave the structure supported by the resistance of the sea floor and its morphology, using the following methods: bathymetry, sonography and shallow seismic. During a shallow seismic, among each surface mapped using a sub-bottom profiling system, the first one refers to the sea floor reflector that consists of the same traditional bathymetry acquired by a single-beam echo-sounder. The goal is to get depth values of the tow-sensor, or profiler, and sum them with the height values extracted from acoustical distance measurements from the sub-bottom profiler to the seabed below the transducer vertically. Considering the dynamic length of a jack-up rig leg and the main focus over the seabed morphology, the aim of this work is analysis of uncertainty due to different references used to measure acoustic distances and to control 2D positions of the sensors. The methodology includes general information about the acoustic sensors and jack-up platforms, measurement references including offsets, tidal height estimation using prevision data, surface interpolation and statistical computations. In the outcome, statistical analysis besides of some considerations, indicates that it is possible to use bathymetric data from shallow seismic surveys and explains others further procedures to get valuable results quite easily.

Palavras-chave: bathymetry, shallow seismic, statistical analysis, batimetria, sísmica rasa, análise estatística

1. Introdução

Este artigo analisa um método de recuperação de informações de batimetria a partir de levantamentos de sísmica rasa obtidos com um perfilador de subsuperfície (*sub-bottom profiler*).

O contexto do trabalho são estudos de fundo marinho em águas rasas precedentes às atividades de assentamento de plataformas autoelevatórias (PA) da Petrobras, que se caracterizam pelo conjunto de levantamentos hidrográficos necessários ao conhecimento prévio da morfologia do fundo e da subsuperfície, da batimetria, da litologia superficial e de obstáculos naturais ou artificiais.

O conhecimento prévio das condições do fundo marinho é essencial, pois a operação de assentamento de uma PA envolve o posicionamento de uma estrutura da ordem de 10.000 toneladas apoiada normalmente em três ou quatro pernas retráteis.

Com este intuito, um perfilador de subsuperfície típico é utilizado para adquirir informações sismoacústicas de poucas dezenas de metros abaixo do fundo do mar, constando entre elas a profundidade relativa do próprio leito marinho, foco deste trabalho.

A análise a que se propõe este artigo consiste na comparação entre a superfície batimétrica gerada a partir de levantamentos convencionais com ecobatímetros monofeixe e a respectiva gerada a partir das profundidades recuperadas do refletor de fundo marinho em levantamentos por sísmica rasa.

São descritas as etapas necessárias à aquisição batimétrica monofeixe e a análise estatística da qualidade relativa da batimetria recuperada de um perfilador de subsuperfície.

2. Metodologia de Trabalho

A metodologia se divide na aquisição dos dados, no ajuste das medidas ao nível de redução de Marinha - NR, na interpolação de superfícies e na análise estatística.

2.1. Aquisição dos dados

A aquisição dos dados batimétricos a que se refere este artigo é realizada com um ecobatímetro monofeixe e um perfilador de subsuperfície, através de seções paralelas de 25 metros regularmente espaçadas, com pontos de profundidade adquiridos ou digitalizados a cada 5m ou aproximadamente a cada 2 segundos.

2.1.1. Ecobatímetro monofeixe

De Parkinson (2001), o ecobatímetro monofeixe consiste em um transdutor que emite pulsos acústicos em alta frequência, na vertical, na forma de um cone estreito, que se propagam na água e são refletidos por superfícies normais à direção vertical de propagação.

Em geral, a intensidade do sinal refletido depende da refletividade da interface e a maior intensidade registrada é inerente ao fundo marinho verticalmente abaixo do transdutor.

Este tipo de sensor normalmente é fixado no casco de uma embarcação, cuja precisão é impactada pelos movimentos de rolagem (*roll*), arfagem (*pitch*) e de afundamento (*heave*) da embarcação. Com isto, são desejáveis boas condições de mar.

A aquisição é realizada considerando a posição relativa dos sensores (antena GNSS e transdutor) e a própria embarcação. Essas medidas relativas, ou *offsets*, influenciam diretamente na qualidade da batimetria.

Além das seções paralelas, são realizadas algumas seções transversais para verificação da qualidade do modelo de redução da maré, posteriormente.

A resolução vertical de um ecobatímetro monofeixe típico, com frequência de operação de 33kHz ou 210kHz, é de aproximadamente 0,12% (12cm para cada 100m de profundidade) da coluna d'água (Parkinson, 2001), porém a precisão é adicionalmente resultante do controle dos movimentos da embarcação e do conhecimento da velocidade do som na água na área do levantamento.

2.1.2. Perfilador de subsuperfície

Os perfiladores de subsuperfície, ou *sub-bottom profilers*, operam normalmente numa faixa entre 1 e 20 kHz, correspondendo à faixa de frequência mais alta dos levantamentos sísmicos, um pouco inferior aos sonares de varredura lateral e aos ecobatímetros (Parkinson, 2001).

Como menciona o mesmo autor, os *sub-bottoms* funcionam de forma similar aos ecobatímetros, com a diferença de trabalharem com frequências menores em potência de saída superior. Desta forma, a penetração na subsuperfície é maior, mas a resolução pode ser comprometida.

Porém, os sistemas de perfilagem mais modernos, denominados “chirp profiling systems”, transmitem bandas de frequências acústicas seletivas através da coluna d'água em altas potências, mantendo assim a alta resolução. A seleção deve visar a frequência acústica e o comprimento do pulso que retornem a melhor relação penetração-resolução.

O *sub-bottom* utilizado é guiado na forma de um sensor rebocado, que consiste em uma vantagem em relação aos sensores fixados na embarcação, pois os movimentos causados pelas ondulações são minimizados. A desvantagem, no entanto, é a imprecisão devida à variação das medidas de *offsets* em relação à antena GNSS e à superfície da água.

A forma mais simples de minimizar a variação do *offset* horizontal lateral (*starboard*) são as condições de mar favoráveis, com poucas ondas e correntes calmas. Para os *offsets*

horizontal a ré (*layback*) e vertical em relação à superfície da água, a variação pode ser controlada com uma velocidade de navegação e comprimento de cabo constantes.

O conhecimento do *offset* vertical e sua variação, inerente à profundidade do sensor, é crucial para a recuperação de informações batimétricas em levantamentos de sísmica rasa, visto que o perfilador retorna apenas a medida da distância entre o sensor e a superfície refletora. Para isto, além da desejável velocidade constante, um sensor de profundidade ou um sistema hidroacústico de linhas de base ultra curtas (*USBL – Ultra Short Base Line*) podem ser integrados ao perfilador para que sua distância vertical em relação à antena GNSS seja monitorada.

A resolução vertical de um perfilador de subsuperfície do tipo *chirp* é derivada do comprimento do pulso, que por sua vez é associado a uma banda de frequência. Uma frequência típica de 10kHz produz uma resolução vertical teórica de 7,5cm, mas o comportamento da velocidade do som através das superfícies refletoras no local do levantamento irá ajustar a resolução para um valor mais adequado a cada circunstância. No entanto, a precisão vertical é adicionalmente diretamente dependente do controle do *offset* vertical, função do recurso tecnológico disponível.

2.2. Recuperação de informações batimétricas da sísmica rasa

Para serem recuperadas, as informações batimétricas da sísmica rasa são divididas em duas componentes: a profundidade do sensor rebocado e a distância vertical entre o sensor e o fundo marinho.

Neste trabalho foi utilizado um perfilador de subsuperfície equipado com um sensor de profundidade, baseado em medidas de variação da pressão local.

Em complemento, de maneira semiautomática, a discretização do refletor referente ao fundo marinho oferece as medidas de distância até o *sub-bottom*.

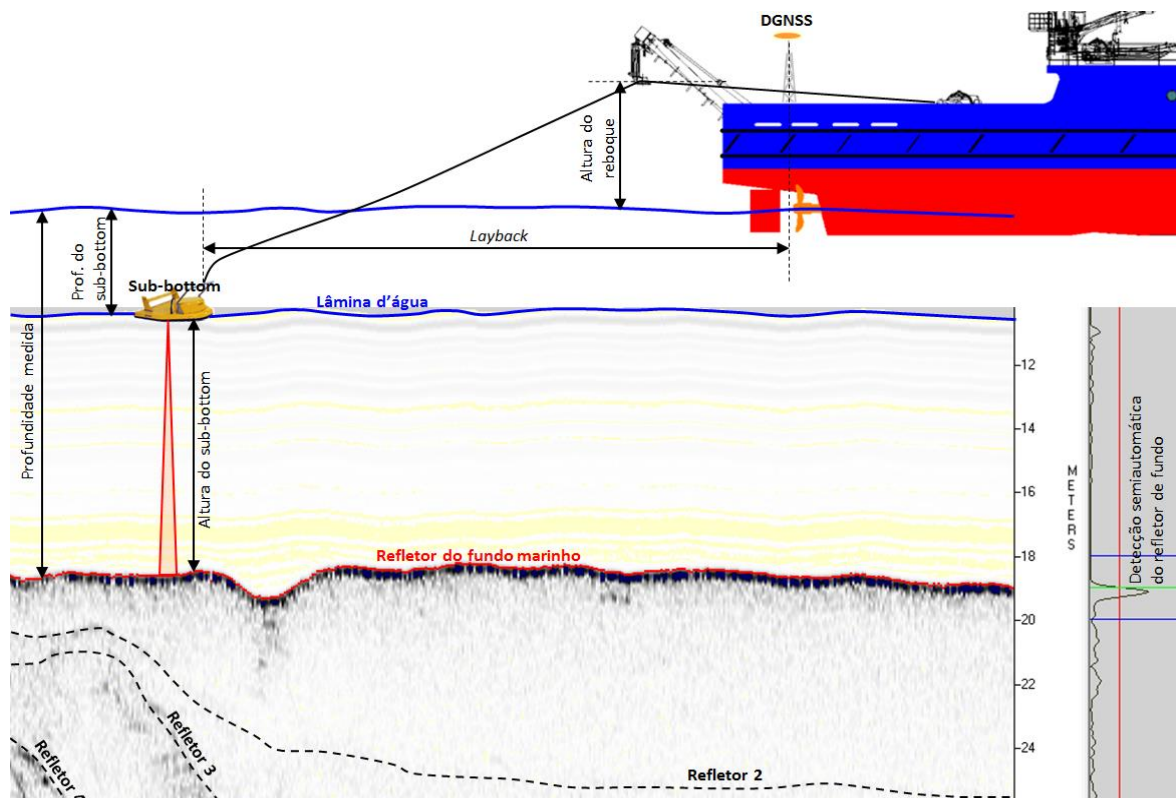


Figura 1 – Geometria de aquisição de dados de sísmica rasa

2.3. Ajuste das profundidades ao nível de redução de Marinha

Em Miguens (1996), podemos verificar que, em águas rasas, somente com o conhecimento preciso da altura da água em relação ao fundo do mar permitirá definir em que ocasiões e quais áreas uma embarcação poderá navegar com segurança.

Verificamos também que Maré é a oscilação vertical da superfície do mar ou outra grande massa d'água sobre a Terra, causada primariamente pelas diferenças na atração gravitacional da Lua e, em menor extensão, do Sol sobre os diversos pontos da Terra.

O autor mostra que para todas as profundidades apresentarem a mesma referência de medição, é necessário estabelecer um plano de referência. Nas cartas náuticas brasileiras, este plano é chamado de Nível de Redução (NR), normalmente correspondente ao nível médio das baixameres de sizígia (MLWS). É um nível abaixo do qual o mar não desce senão raramente.

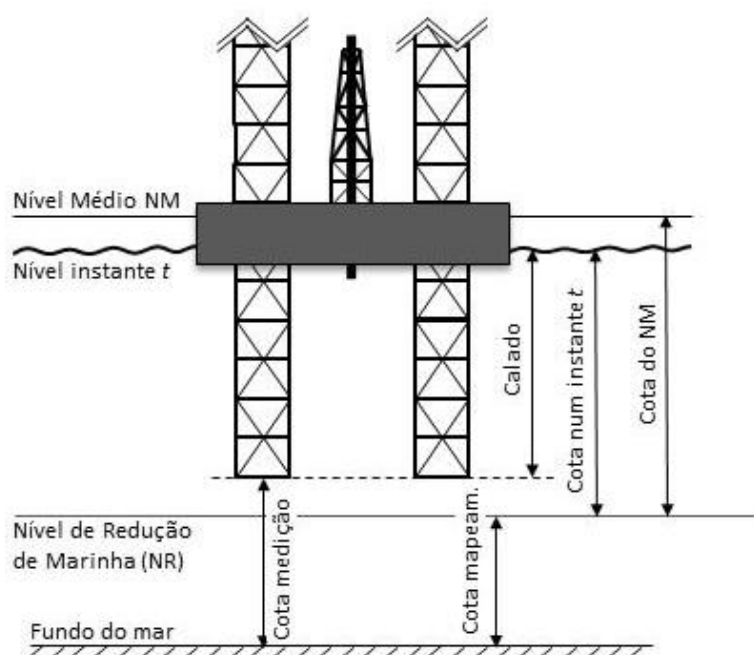


Figura 2 – Profundidades e planos de referência (Fonte: Adaptada de Miguens, 1996)

Considerando as condições meteorológicas e geográficas locais favoráveis, para os efeitos deste trabalho, o cálculo das profundidades referenciadas ao NR foi realizado com base nas tábuas das marés dos portos mais próximos aos locais de estudo. A tábua das marés constitui uma publicação da DHN, que considera a maré astronômica representada por componentes harmônicos, excluindo os efeitos meteorológicos sobre o nível do mar (Marinha do Brasil/DHN).

Com base nas tábuas das marés, representadas por duas preamares e duas baixa-mares diárias, configurando as marés semidiurnas do local, o cálculos das marés para cada profundidade medida foi realizado considerando o comportamento sinusoidal entre uma preamar e uma baixamar consecutivas.

A função cosseno $f(x) = a + b \cos(cx + d)$ foi utilizada como representação simplificada do comportamento da maré a cada meio período.

Aplicando esta função à estimativa de altura de maré, temos:

$$h(t) = NM + A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \phi\right) \quad (1)$$

onde, $h(t)$ é a altura da maré em função do tempo t ; NM é o nível médio entre uma preamar e uma baixamar consecutiva ou vice-versa; A é a amplitude da maré; T é o período da maré; t é a variável independente; e ϕ é a fase da função representada pela diferença da preamar em relação ao instante t_0 .

Aplicando aos parâmetros das tábuas das marés temos:

$$h(t) = \frac{PM+BM}{2} + \left(\frac{PM-BM}{2}\right) \cdot \cos \left[\frac{(t-t_{PM})\pi}{t_{PM}-t_{BM}} \right] \quad (2)$$

onde, $h(t)$ é a altura da maré em função do tempo t ; PM é o nível da preamar em metros; BM é o nível da baixamar em metros; t_{PM} é o horário da preamar em horas decimais; t_{BM} é o horário da baixamar em horas decimais; e t é o instante em horas decimais cujo nível da maré se deseja estimar.

Cada medida de profundidade é ajustada ao nível de redução NR a partir dos registros de horário das medições, de onde será gerada uma lista de coordenadas e profundidades reduzidas, que constituem os insumos para interpolação da superfície batimétrica.

2.4. Interpolação de superfícies

A interpolação de uma superfície deve considerar fundamentalmente o objetivo final da informação produzida. A realidade dos dados analisados tem como objetivo final o conhecimento da morfologia do assoalho marinho, responsável pela definição de rotas seguras de aproximação e posicionamento de plataformas autoelevatórias.

As plataformas do tipo autoelevatórias possuem a peculiaridade de um calado dinâmico, representado por pernas retráteis capazes de se ajustar a diferentes profundidades.

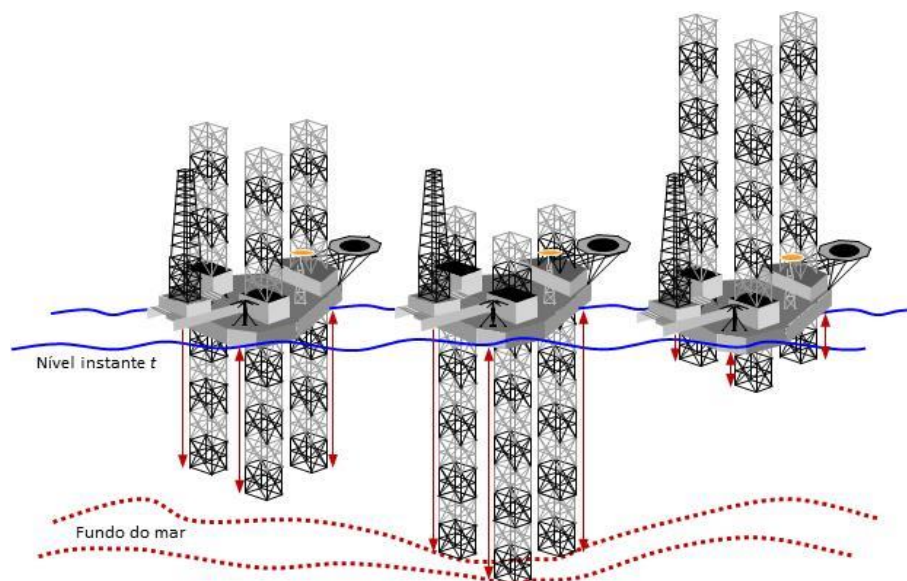


Figura 3 – Calado dinâmico de uma plataforma autoelevatória

Desta forma, a geração de superfícies batimétricas neste trabalho não se propõe a representar detalhes pontuais da superfície do fundo marinho, haja vista que as próprias seções paralelas espaçadas de 25 metros já limitam sobremaneira a fidelidade pontual de representação da superfície do fundo marinho.

Neste contexto, o interpolador *Inverse Distance Weighted* se mostra favorável, pelo fato de gerar a superfície batimétrica considerando os pontos mais próximos regularmente espaçados controlados por alguns parâmetros de delimitação de vizinhança.

De forma complementar, uma etapa de filtragem é realizada sobre as superfícies interpoladas buscando eliminar ruídos de medição inconsistentes, originados pelos movimentos não controlados tanto da embarcação como dos sensores utilizados. O resultado é uma representação morfológica suavemente delineada, compatível com a capacidade de representação de uma superfície embasada na aquisição monofeixe distribuída em seções paralelas.

2.5. Análise estatística

A análise estatística foi realizada para o modelo de superfície batimétrica residual resultante da diferença entre as superfícies geradas a partir dos dados do ecobatímetro e do *sub-bottom*.

Foram analisados os valores de média e desvio padrão das superfícies geradas, com destaque para as profundidades residuais e para a influência da variação da velocidade do som.

3. Resultados e Discussão

Os dados batimétricos foram adquiridos em duas áreas de movimentação de plataformas autoelevatórias dentro da Baía de Todos os Santos, pertencentes ao município de Salvador – BA, sendo uma de 200m x 300m, com profundidades variando entre 8m e 31m, e outra de 500m x 250m, com profundidades variando entre 16m e 18m.

Foram utilizados os marégrafos do Porto de Salvador e do Porto de Aratu, ambos situados na Baía de Todos os Santos de forma a adequar a menor distância entre a referência das marés e as áreas de levantamento.

A partir da Equação 2 implementada numa planilha eletrônica, todas as medições de profundidade foram referenciadas ao NR de Marinha, tornando possível a comparação proposta.

A partir das profundidades reduzidas, foi utilizado o programa *Surfer 8* para interpolação e filtragem dos dados, produzindo a superfície batimétrica gerada com ecobatímetro, superfície batimétrica gerada com *sub-bottom*, superfície batimétrica residual e superfície de impacto da variação de velocidade do som.

Estatisticamente, a superfície batimétrica residual da Área 1 obteve um desvio padrão de 40 cm e média de 16 cm, enquanto que a Área 2, inversamente, obteve um desvio padrão de 10 cm e média de 43 cm.

Os valores médios foram entendidos como erros sistemáticos devidos a ausência de calibração do sensor de profundidade e na imprecisão do valor aproximado da velocidade do som utilizado inerentes ao *sub-bottom*. Com isto, as figuras 4 e 5 apresentam a superfície batimétrica residual subtraída do valor residual médio, de forma a proporcionar a análise dos resíduos das medidas de profundidade na sísmica rasa em relação à batimetria com ecobatímetro monofeixe.

Aprofundando um pouco a análise da influência na incerteza dos valores de velocidade do som na água, a partir do conhecimento do comportamento da variação local, foi considerada uma variação de 20m/s, entre 1520m/s e 1540m/s, e espacializado o impacto desta variação estimada nas medidas de profundidade, conforme figura 6, através da equação 3.

$$\Delta P = \frac{\Delta V}{V} \cdot P \quad (3)$$

onde, ΔP é a variação da profundidade, ΔV é a variação da velocidade do som considerada, V é velocidade do som utilizada no trabalho e P é a profundidade local.

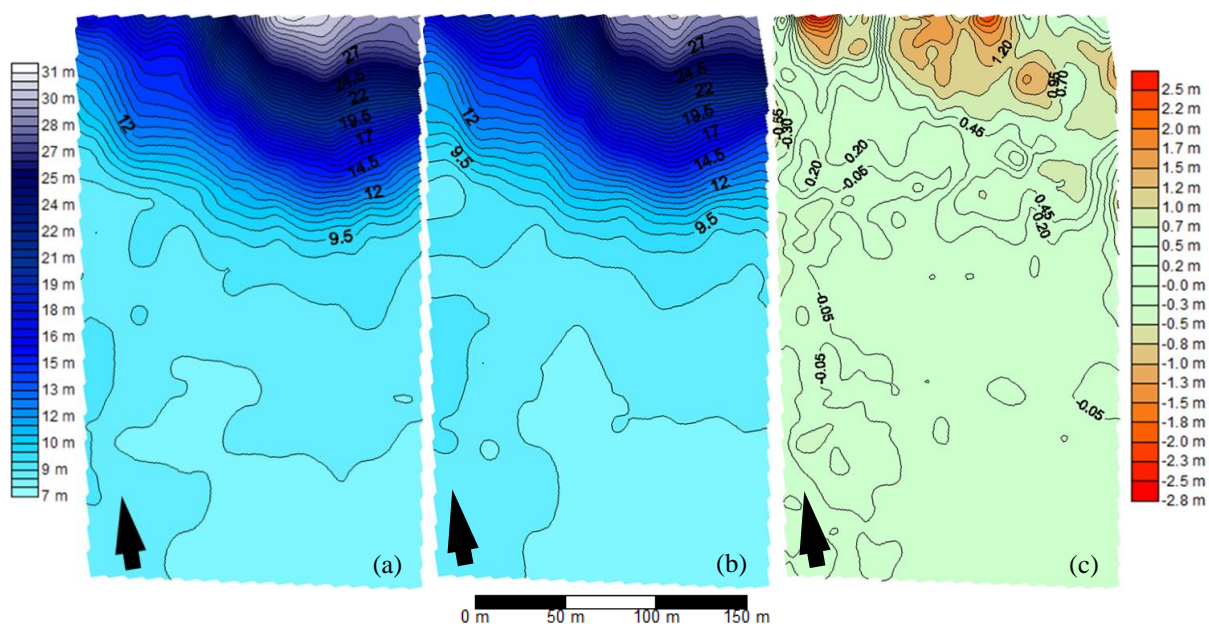


Figura 4 – **Área 1**; (a) Superfície batimétrica gerada com ecobatímetro; (b) Superfície batimétrica gerada com sub-bottom; e (c) Superfície batimétrica residual corrigida de tendência.

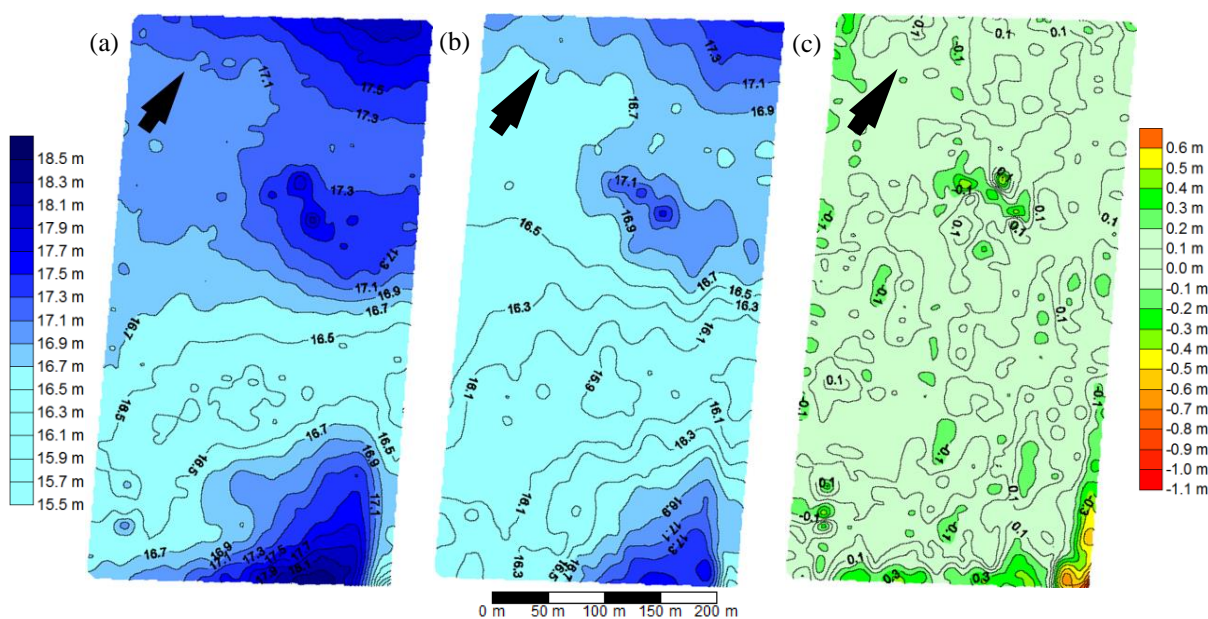


Figura 5 – **Área 2**; (a) Superfície batimétrica gerada com ecobatímetro; (b) Superfície batimétrica gerada com sub-bottom; e (c) Superfície batimétrica residual corrigida de tendência.

A figura 6 mostra, dentro do previsível, que a variação da velocidade do som nas maiores profundidades existentes na Área 1 apresenta maiores impactos, e em contraponto, a baixa variação de profundidade na Área 2 resulta num impacto quase constante.

Analisando a porção norte da Área 1, podemos perceber a influência da imprecisão planimétrica em razão do controle da posição do sensor rebocado ser realizado apenas com a informação de *layback* (*offset* a ré). Constata-se que em maiores gradientes de profundidade, a imprecisão aumenta.

É possível utilizar velocidades do som mais precisas, porém apenas isto não seria suficiente para resolver os problemas de imprecisão nas medidas de profundidade do sub-bottom. Como pode ser verificada na figura 4c, a ordem de grandeza dos resíduos ao norte é superior à estimativa da possível imprecisão causada por variação dos valores de velocidade do som.

Contudo, na situação de menores gradientes da Área 2, a diferença de cota batimétrica se equipara, em ordem de grandeza, dentro dos impactos da variação mencionada.

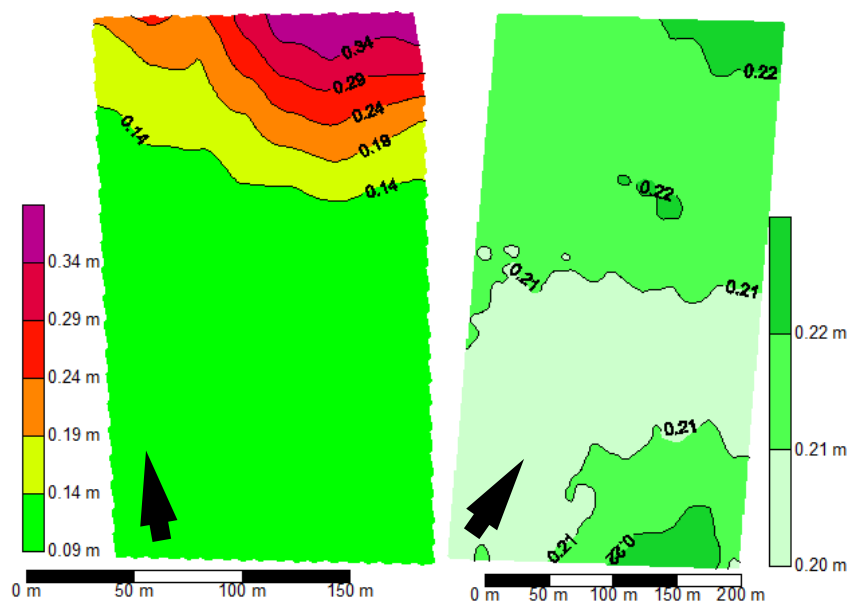


Figura 6 – (a) Impacto da variação da velocidade do som em 20m/s na Área 1; e Impacto da variação da velocidade do som em 20m/s na Área 2.

4. Conclusões

Com base nas análises realizadas, é possível perceber o valor dos dados batimétricos recuperados de levantamentos de sísmica rasa, pois torna possível a verificação de consistência dos dados batimétricos adquiridos com ecobatímetro monofeixe, assim como seu adensamento em condições controladas.

Observa-se claramente que alguns procedimentos de calibração com parâmetros locais do sensor de profundidade e da velocidade do som podem aumentar a qualidade das medidas absolutas de profundidade provenientes do *sub-bottom*, se houver o intuito de recuperá-las.

Seguindo ainda uma recomendação de Miguens (1996) à navegação, é conveniente considerar uma incerteza de 10% nos valores obtidos das tábuas de previsão das marés, o que poderia ser evitado com a instalação de uma estação maregráfica numa distância regulamentar das áreas de levantamento.

Considerando as atividades de movimentação de plataformas, onde a acurácia batimétrica necessária se situa em grande parte entre 0,5m e 1m, dependendo da profundidade local, conclui-se que é possível e viável a recuperação e utilização dos dados de batimetria obtidos de levantamentos de sísmica rasa em áreas com gradientes de profundidade pequenos. No entanto, este objetivo pode ser mais facilmente alcançado se for contemplado com procedimentos de calibração local, de medição da velocidade do som e de controle da posição planimétrica do sensor rebocado.

Referências Bibliográficas

Marinha do Brasil/DHN. Previsão de Marés - Máximas e Mínimas diárias. Disponível em: <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-previsao-mare/tabuas/>>. Acesso em: 30.ago.2010.

Miguens, A. P. Navegação: A Ciência e a Arte. Navegação Costeira. Estimada e em Águas Restritas. **Marés e correntes de maré; correntes oceânicas**. cap 10, p.227-274. Rio de Janeiro. Marinha do Brasil/DHN, 1996. Disponível em: <<https://www.mar.mil.br/dhn/bhmn/download/cap10.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2014.

Parkinson, R. High Resolution Site Surveys. **Analogue site survey systems**. 3. ed. Spon Press, London, England, 2001. 230 p.