

PRIMEIRAS MEDIÇÕES DIRETAS DE MARÉ INTERNA GERADAS NA CADEIA VITÓRIA-TRINDADE

Marcelo R. Toffoli¹, Guilherme N. Mill¹, Vladimir S. Costa¹, Felipe L. L. Amorim¹, Mariela Gabioux¹, Renato D. Ghisolfi², Alexandre M. Fernandes³, Leandro Calado⁴, Lohengrin D. A. Fernandes⁴, Afonso M. Paiva¹

*¹Laboratório de Oceanografia Física – LOF, Programa de Engenharia Oceânica – PENO/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
Av. Horácio Macedo, 2030/ Bloco C/ sala 209, Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, 21941-914, Rio de Janeiro*

² Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

³ Universidade Estadual do Rio de Janeiro – UERJ

*⁴Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira - IEAPM
toffolioceano@gmail.com*

RESUMO

Este trabalho apresenta as primeiras observações diretas de maré interna na região da Cadeia Vitória Trindade (CVT). Uma linha de fundeio instrumentada foi lançada próximo ao Monte Montague, onde permaneceu por 8 meses registrando dados de temperatura, salinidade e corrente em diferentes profundidades da coluna de água. Os dados revelaram a existência de oscilações semidiurnas do campo de correntes superiores a 15 cm/s e oscilações do campo de massa de aproximadamente 50m na região da termoclina. As correntes com período semidiurno dominam o espectro energético de velocidades no local, com uma dominância da contribuição da componente de maré astronômica M2. Análises de funções ortogonais empíricas indicam que, embora cerca de metade da energia baroclínica semidiurna possa ser associada a uma onda de maré interna de primeiro modo baroclínico, modos de ordem superiores representam uma fração considerável do espectro de ondas internas local.

Palavras chave: ondas internas, maré baroclínica, Monte Montague

INTRODUÇÃO

Ondas internas na frequência de maré têm sido observadas em diversas regiões do mundo, a partir de observações diretas, modelagem numérica e sensoriamento remoto. As ilhas do Havaí (e.g., RAY e MITCHUM, 1996) e o Estreito de Luzon, no Mar do Sul da China (e.g., ALFORD et al., 2015) são descritas na literatura como regiões de destacada geração de maré interna¹. Estimativas globais indicam que cerca de 75% da conversão global de energia da maré barotrópica para a maré baroclínica ocorre em 20 locais de grande variação topográfica (SIMMONS et al., 2004). Trabalhos anteriores destacavam no Atlântico Sul a Cordilheira Meso-Atlântica, Cadeia Walvis e a Elevação do Rio Grande (ZHAO et al., 2016) como as principais áreas de geração de maré interna na bacia. Trabalhos recentes (CAMARGO et al., 2015; CAMARGO, 2016; PAIVA *et al.*, em preparação) mostraram, a partir da análise de simulações numéricas e dados altimétricos, a importância da Cadeia Vitória Trindade na geração de marés internas. Camargo (2016) descreveu que a maré interna gerada na Cadeia Vitória-Trindade é irradiada tanto para norte como para sul da cadeia, com dominância no sinal superficial da componente M2 com amplitudes de 2 a 3 cm. Camargo et al. (2015) calcularam o fluxo de energia associado a propagação da maré interna e a

1 Maré interna ou maré baroclínica são ondas internas na frequência de maré geradas pela interação da onda de maré barotrópica com o assoalho marinho na presença de fortes gradientes batimétricos em regiões estratificadas (CRAIG, 1987)

conversão energética entre as componentes barotrópica e baroclínica e concluíram que ambos são significativos e da mesma ordem que os descritos na literatura para outras regiões. Em relação a mudanças no campo de massa ocasionadas pelas ondas internas, Camargo (2016) mostrou, a partir da análise de simulações numéricas em alta resolução espacial, que as isopícnais na termoclina permanente podiam variar verticalmente algumas dezenas de metros (até 100 m), com período semidiurno.

Até o ano de 2016, resultados numéricos eram a única fonte de informação em relação a estrutura de massa na região na escala de tempo da maré. Em abril de 2016, o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento em Ilhas Oceânicas intitulado “Estudo da maré interna e seu impacto na mistura vertical e na biomassa fitoplanctônica na região da Ilha de Trindade e montes submarinos da Cadeia Vitória-Trindade”, aprovado no MCTI/CNPq/FNDCT-Ação Transversal/CT-Aquaviário no. 62/2013 e coordenado pela COPPE/UFRJ, lançou uma linha de fundeio instrumentada de subsuperfície nas proximidades do Monte Montague (aproximadamente 20,4°S/36,6°W) que permitiu a observação de perfis verticais de corrente, temperatura e salinidade ao longo de 8 meses. Neste trabalho, caracteriza-se a estrutura vertical do campo de massa e correntes associada ao processo de maré interna na região da CVT a partir de medições *in situ*. Até o presente momento estas medições são únicas, não sendo de conhecimento dos autores a existência de um conjunto de dados similar na região.

METODOLOGIA

O fundeio oceanográfico foi lançado próximo à isóbata de 280 metros de profundidade, no talude ao sul do Monte Montague na Cadeia Vitória-Trindade, permanecendo na água entre 20 de abril e 10 de dezembro de 2016. A linha de fundeio era composta por uma boia de subsuperfície a 50 metros de profundidade, uma cadeia de 19 termistores a cada 10 metros ao longo da linha, 2 CTDs, uma armadilha de material particulado a 150 metros da superfície e um perfilador acústico de correntes a 15 metros do fundo medindo velocidade na coluna d'água entre 250 m e a superfície. Os equipamentos foram configurados para realizar medições do campo de correntes e massa a cada 30 minutos.

As séries temporais de temperatura e velocidade de correntes em diferentes níveis foram analisadas e foram retirados os dados espúrios. As séries foram filtradas com filtros *butterworth* para isolar o efeito das marés semidiurnas de outros processos. Considerou-se baixa frequência processos com escala temporal superior a 3 dias. Para as séries de alta frequência foram considerados os períodos semidiurnos, eliminando o efeito das marés diurnas e evitando a contaminação da análise das marés internas com a banda inercial do registro de correntes e campo de massa. A componente baroclínica da maré para as correntes foi obtida a partir da diferença do perfil vertical da banda semidiurna e a média vertical para cada tempo. Foram realizadas análises espectrais, harmônicas e decomposição em funções empíricas ortogonais das séries brutas e filtradas em diferentes níveis para analisar a estrutura vertical e variabilidade temporal da maré interna gerada próxima ao Monte Montague.

RESULTADOS

Lançado durante o outono austral, a linha de fundeio amostrou parte do ciclo sazonal da camada de mistura e a termoclina na região da Cadeia Vitória-Trindade. A estrutura vertical do campo de correntes (Figura 1) mostra magnitudes semelhantes para os máximos observados na baixa frequência (> 3 dias) e na banda semidiurna do registro. A região de lançamento da linha encontra-se fora da região de influência do fluxo superficial da Corrente do Brasil. As componentes zonal e meridional de velocidade em baixa frequência mostram máximos próximos de 15-20 cm/s (Figura 1a e 1c), com inversões do fluxo entre a superfície e a região da termoclina. Baixas velocidades (< 10 cm/s) na componente meridional de velocidade foram observadas ao longo de praticamente todo o registro.

As correntes de maré semidiurna apresentam energia em todo o registro de 8 meses. Foram registrados picos superiores a 15 cm/s associados a oscilações que incluem a contribuição das marés barotrópica e baroclínica. As oscilações do campo de massa (linhas pretas na Figura 1b e d) apresentam excursões verticais máximas de até 100 metros na região da termoclina permanente durante períodos de sizígia. Análises harmônicas realizadas a partir das séries temporais de velocidade e temperatura revelaram uma dominância da contribuição da componente M2 da maré nas oscilações do campo de massa e correntes. As componentes S2 e O1 apresentam contribuições secundárias. Os perfis verticais da amplitude da componente M2 nas séries de velocidade de correntes (não mostrados) apresentam maiores valores nos primeiros 100 metros da coluna d'água, com amplitudes próximas de 10 cm/s. Considerando apenas a parte baroclínica do perfil de correntes, o perfil vertical das amplitudes da componente M2 apresentam um mínimo entre 100 e 150 metros, aumentando em direção à superfície e ao fundo, semelhante ao padrão observado nos perfis verticais de fase para a mesma componente, sugerindo a dominância de uma maré interna de primeiro modo baroclínico. Embora com uma contribuição menor na energia total, os perfis verticais de amplitude e fase das componentes S2 e O1 apresentam variações verticais que remetem a uma estrutura baroclínica de primeiro modo, semelhante ao calculado para a componente principal lunar.

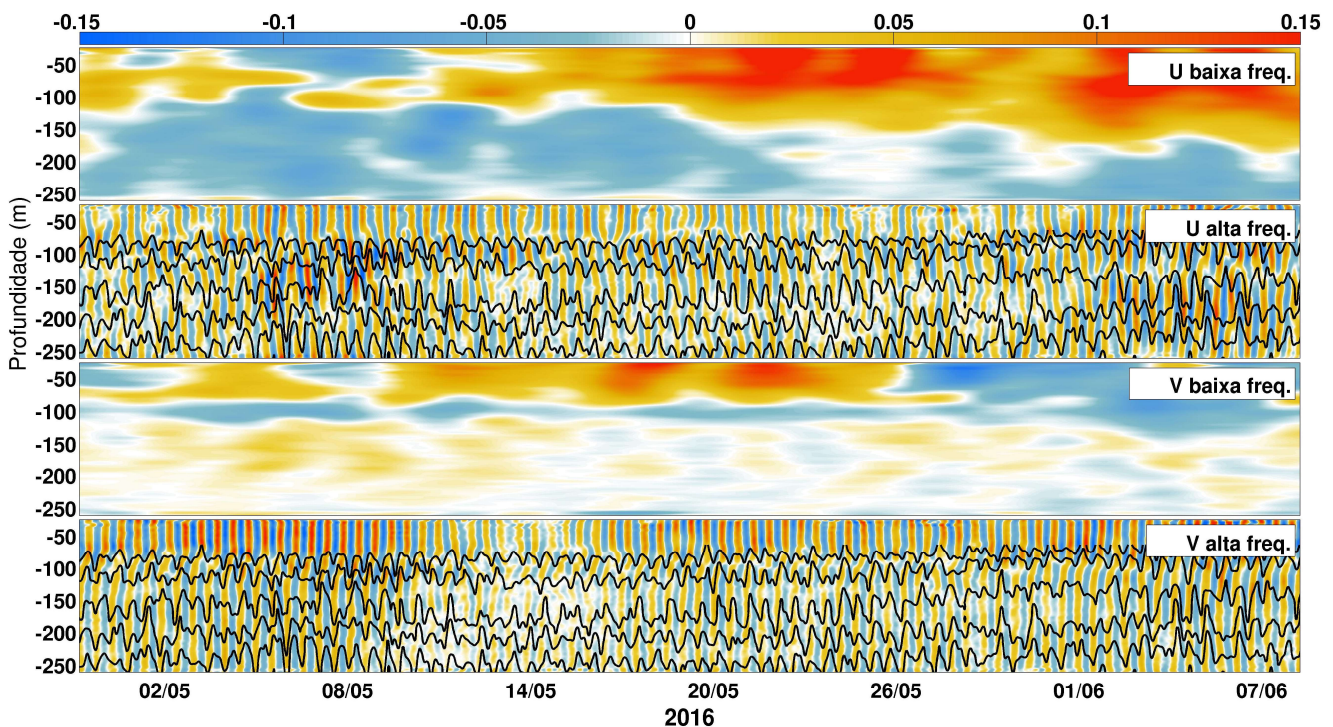


Figura 1 – Evolução temporal dos perfis verticais de corrente filtrados (em m/s), ilustrando 40 dias do registro: (a) baixa frequência (> 3 dias) da componente cartesiana U ; (b) correntes baroclínicas semidiurnas da componente U e isotermas do campo de massa (a cada 2°C); (c) o mesmo que em (a) para a componente cartesiana V ; (d) o mesmo que em (b) para a componente V .

As análises espectrais do campo de correntes (Figura 2a) e massa (Figura 2b) mostram a dominância da energia na banda de maré semidiurna quando comparada às demais faixas de frequência de outros processos oceânicos regionais. Os espectros das correntes zonais e da temperatura mostram picos destacados em aproximadamente 12,4 h para todas as profundidades. No entanto, há uma diferença vertical na energia associada a banda semidiurna. Há uma diminuição da energia em direção ao fundo da banda semidiurna nas correntes (Figura 2a). A temperatura mostra maiores energias na banda semidiurna na região de maior estratificação (Figura 2b).

Foram realizadas análises das componentes principais dos perfis verticais de velocidade a

partir de decomposição em funções ortogonais empíricas. Considerando tanto a maré barotrópica quanto a baroclínica, os 2 primeiros modos ortogonais empíricos respondem por 73% da variância total. O primeiro modo (53%) apresenta um perfil vertical (não mostrado) com maiores amplitudes próximo à superfície, decaindo em direção ao fundo. O segundo modo ortogonal empírico (20%) apresenta inversão em aproximadamente 100 m. Considerando apenas a maré baroclínica, o primeiro modo ortogonal responde por 45% da variância total e o segundo modo por 23%. *b*

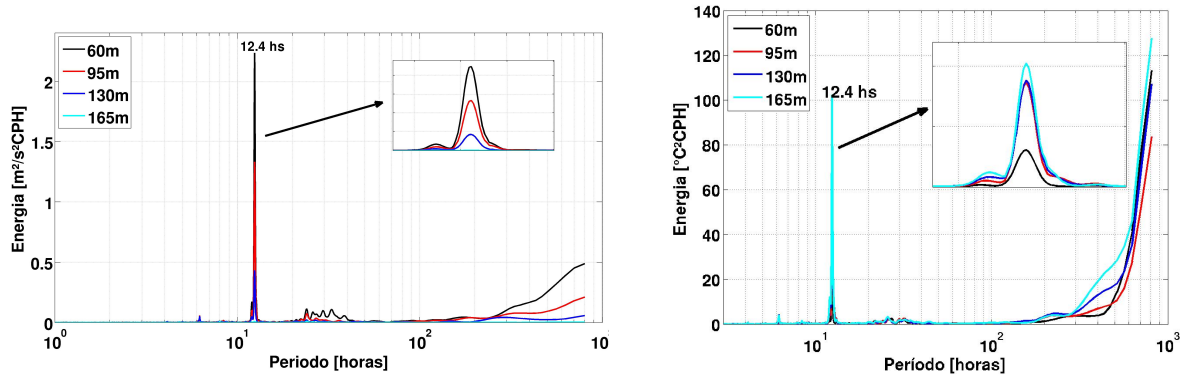


Figura 2 - Espectros alisados das séries temporais de corrente (a) e temperatura (b) para diferentes profundidades. No detalhe evidenciam-se as diferenças de energia na banda semidiurna em diferentes níveis na coluna d'água.

CONCLUSÕES

A região da Cadeia Vitória-Trindade próxima ao Monte Montague mostra uma influência significativa da maré na variabilidade do campo de massa e correntes. As análises no domínio da frequência mostraram que as maiores energias no espectro de 8 meses de séries temporais de correntes e massa estão associadas à banda semidiurna. Máximos superiores a 15 cm/s foram observados durante maré de sizígia na região, com oscilações semidiurnas do campo de massa próximas de 100 metros na região da termoclina. Análises harmônicas do campo de massa e correntes revelaram uma dominância da influência da componente M2, com contribuições secundárias de outras componentes semidiurnas e diurnas. A decomposição em modos empíricos ortogonais mostra que a maré interna de primeiro modo baroclínico representa aproximadamente metade da energia total de ondas internas na região. Modos baroclínicos de ordens superiores (2° modo, 3° modo, etc) representam uma fração significativa do espectro de ondas internas na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFORD, M. H., PEACOCK, T., MACKINNON, J. A., et al., 2015, "The formation and fate of internal waves in the South China Sea", *Nature*, v. 521, pp. 65–69.
- CAMARGO, S. S. B., COSTA, V. S., MILL, G. N., DAHER, V. B., ALVARENGA, J.B.R., PAIVA, A. M., 2015, "Geração de maré interna na Cadeia Vitória-Trindade", Trabalho apresentado no XI OMARSAT, Arraial do Cabo, 2015.
- CAMARGO, S. S. B., 2016. "Geração de maré interna na Cadeia Vitória-Trindade", Dissertação de mestrado a ser defendida em março de 2016 - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- CRAIG, P. D. 1987. "Solutions for internal tidal generation over coastal topography". *Journal of Marine Research*, v.45, pp. 83-105.
- PAIVA, A. M., COSTA, V. S., MILL, G. N., et al., 2017. "Internal tides generated at the Vitória-Trindade Ridge, South Atlantic". A ser submetido para *Journal of Geophysical Research*.
- RAY, R. D., MITCHUM, G. T., 1996, "Surface manifestation of internal tides generated near Hawaii", *Geophysical Research Letters*, v. 23, n. 16, pp. 2101–2104.
- SIMMONS, S. R. Jayne, L. C. St. Laurent, and A. J. Weaver, 2004: Tidally driven mixing in a numerical model of the ocean general circulation. *Ocean Modelling*, v. 6, pp. 245–263.
- ZHAO, Z., ALFORD, M. H., GIRTON, J. B., et al., 2016. "Global observations of open-ocean mode-1 M2 internal tides", *Journal of Physical Oceanography*, pp. 1657-1684.