



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE OCEANOGRAFIA**

LUCAS SOUZA DA FONSECA

*A INFLUÊNCIA DA CIRCULAÇÃO GRAVITACIONAL E AÇÃO DAS ONDAS NO
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ARRASTO NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS*

**SALVADOR
2018**

LUCAS SOUZA DA FONSECA

*A INFLUÊNCIA DA CIRCULAÇÃO GRAVITACIONAL E AÇÃO DAS ONDAS NO
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ARRASTO NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS*

Monografia apresentada ao curso de graduação em Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Camargo Lessa

Salvador
2015

TERMO DE APROVAÇÃO

LUCAS SOUZA DA FONSECA

A INFLUÊNCIA DA CIRCULAÇÃO GRAVITACIONAL E AÇÃO DAS ONDAS NO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR ARRASTO NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS

Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Oceanografia, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

Guilherme Camargo Lessa – Orientador
Ph.D em Ciências Marinhas - Universidade de Sidney, Austrália.
Universidade Federal da Bahia, Brasil.

Junia Kacenenbogen Guimarães
Doutora em Geologia – Universidade Federal da Bahia, Brasil
Universidade Federal da Bahia, Brasil

Taoan Silva Franklin
Doutor em Engenharia Oceânica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para realização deste trabalho, aos meus pais Lauro e Lucia, que com muita força e dedicação sempre me ajudaram e me incentivaram nos estudos, aos meus irmãos Netos e Larissa, que me acompanham em todos os momentos importantes da minha vida. Agradeço aos meus tios Antônio e Nelma que foram muito importantes em uma fase de minha vida, me apoiando e me dando todo o suporte necessário para a minha permanência longe de casa. Agradeço aos meus amigos pelo apoio dado ao longo desses anos. Agradeço ao meu orientador Guilherme Lessa por todo o conhecimento profissional e pessoal compartilhado, pela oportunidade dada e pela excelente orientação, com muitos ensinamentos, que possibilitaram a conclusão deste e de outros trabalhos que foram fundamentais para a minha formação. Agradeço ao grupo de pesquisa GOAT que proporcionou um ambiente confortável e estimulante para a realização dos trabalhos, apoiando o desenvolvimento dos projetos.

RESUMO

O canal de Salvador, na entrada da Baía de Todos os Santos (BTS), tem sua hidrodinâmica forçada, em sua maior parte, pela maré astronômica. O canal tem fundo arenoso, com formas de leito com decímetros de altura, indicando intenso processo de transporte de sedimentos. Na BTS a assimetria de maré é reconhecidamente favorável à geração de correntes de vazante mais fortes, responsáveis pela formação de feições sedimentares como o Banco de Santo Antônio. Este estudo investiga a variabilidade e estrutura da circulação de água, e o transporte de sedimentos de fundo, no canal de Salvador, tendo como base uma extensa série de dados obtidos com perfilador de correntes Doppler, fundeado a 30 m de profundidade, e resultados de modelagem numérica. Os resultados mostram que as correntes da maré astronômica previstas transportam sedimentos preferencialmente para fora da baía, mas que as correntes medidas geram um transporte residual para dentro da BTS. Isto ocorre devido à ação da circulação gravitacional, responsável por imprimir maior velocidade no fluxo de enchente junto ao fundo. A inclusão das ondas nos cálculos de transporte aumenta em 6% a taxa de sedimentos transportados para dentro da baía e reduz em 27% o transporte de sedimento para fora da baía. Os resultados do modelo numérico reproduzem adequadamente o fluxo barotrópico da maré astronômica e mostram que as correntes de maré vazante preponderam sobre as de enchente em toda a área do Canal de Salvador. Estes resultados sugerem que o transporte resultante de sedimentos para dentro da BTS calculado localmente deve representar a tendência para a região do Canal de Salvador com profundidades superiores a 13m, onde a corrente gravitacional tem importante papel na aceleração dos fluxos de maré enchente junto ao fundo.

Palavras-chave: Transporte. Ondas. Maré. Fluxo não-mareal.

ABSTRACT

The hydrodynamics of the Todos os Santos Bay inlet, or Salvador Channel, is significantly forced by barotropic tidal currents. The predominantly sandy bottom has large areas covered with bedforms indicating active sediment transport, that so far has been understood as most influenced by ebb tidal currents that are accounted for the development of a large ebb-tidal delta called Banco de Santo Antônio. This study investigates the variability and structure of the water circulation, and the resulting bedload sediment transport, in the Salvador Channel using results of a numerical model and a one-year time series of current and wave data obtained with a Doppler current profiler deployed at 30 m of depth. Calculated bedload sediment transport by predicted tidal currents alone is seaward directed throughout the time at the mooring station. However, it becomes inland directed if real current readings are used in the calculation. This is ascribed to the impact of the gravitational circulation upon the tidal flow, which enhances the speed of both flood-tidal currents at the bottom and ebb-tidal currents at the surface. The inclusion of surface wave propagation in the calculations raised the flood-directed net sediment transport by 6%, while decreasing the ebb-directed transport in 27%. The results of the numerical model were in good agreement with the observations and indicate that barotropic ebb tidal currents prevail throughout the bottom of Salvador Channel. Therefore, it is suggested that the effects of the vertically stratified gravitational circulation might reverse the ebb-dominance and cause inland-directed net sediment transport at any site deeper than 13m, where vertical shear of the mean flow is observed.

Keywords: Transport. Waves. Tide. Non-tidal flow

SUMÁRIO

RESUMO	5
ABSTRACT	6
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABELAS	11
1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVO	17
3 ÁREA DE ESTUDO.....	18
4 METODOLOGIA	20
4.1 Validação do modelo.....	25
5 RESULTADOS.....	27
5.1 Corrente medida.....	27
5.2 Correntes forçadas pela maré astronômica.....	30
5.3 Fluxos não-mareais.....	31
5.4 Tensões de cisalhamento de fundo causado pelas ondas.....	32
5.5 Granulometria.....	33
5.6 Transporte de sedimentos de fundo.....	34
5.7 Modelo Hidrodinâmico.....	36
6 DISCUSSÃO	39
7 CONCLUSÃO	42
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Diagrama de assimetria da variação do nível d'água vs razão entre transporte de arrasto de enchente e vazante. O eixo da abcissa representa a diferença de fase das componentes harmônicas M_4 e M_2 . O eixo da ordenada representa a razão das amplitudes das componentes M_4 e M_2 . Os círculos vermelhos marcam a posição relativa ao fundeio do ADCP na BTS (1) e as encontradas por diferentes autores em diferentes locais da BTS. Editado de Fry e Aubrey (1990)..... 13
- Figura 2: Recorte da carta náutica mostrando a entrada da Baía de Todos os Santos, com a posição de fundeio do correntômetros e o banco de Santo Antônio. 14
- Figura 3: Mapa mostrando as diferentes regiões da BTS onde foram obtidos registros de maré por diferentes autores. 14
- Figura 4: Aspecto do leito do Canal de Salvador a profundidade de 30 m, com a estrutura de fundeio se assentando à frente da face deslizante de uma duna submersa direcionada para dentro da baía (superior) e foto de uma duna submersa no leito do canal, na posição do fundeio, mostrando a face deslizantes quase vertical com altura dessimétrica e a face de cavalgamento com pequenas formas de leito sobrepostos, orientados para dentro da baía (inferior). 17
- Figura 5: Mapa das fácies texturais na BTS. (Lessa e Dias 2009)..... 19
- Figura 6: Desenho esquemático mostrando a discretização da coluna de água. 20
- Figura 7: Resumo esquemático do processamento dos dados..... 24
- Figura 8: Domínio do modelo (esquerda), e detalhe da batimetria da BTS utilizada (direita). Abaixo a grade do modelo no canal de Salvador, com resolução espacial de 75 m. 24
- Figura 9: Série temporal das velocidades máximas de enchente (A e C) e de vazante (B e D) para os dados modelados (azul) e observados (vermelho), originais (A e B) e ajustados (C e D)..... 26
- Figura 10: Recorte da série temporal de correntes maré observadas (vermelho) e modeladas (azul) em uma maré equinocial, entre 13 de fevereiro e 1 de março de 2015..... 26
- Figura 11: (A) Recorte de um momento da série temporal do nível. (B) Variabilidade temporal do perfil vertical de velocidades no mês de março (longitudinal ao canal). Valores positivos (negativos) indicam correntes de enchente (vazante), ou seja, orientadas para dentro (fora) da baía. 27
- Figura 12: Perfil vertical médio, relativo a todo período de medição (12 meses), do fluxo de água no local de monitoramento. (A) velocidades médias do fluxo medido em azul e velocidades médias do fluxo associado à maré astronômica prevista em vermelho, (B) magnitudes médias do fluxo medido em azul e magnitudes médias do fluxo associado à maré astronômica prevista em vermelho..... 28

- Figura 13: (A) Série do nível máximo da maré a cada ciclo. Valores máximos indicando momentos de sizígia e os mínimos momentos de quadratura. (B) Variabilidade temporal do perfil vertical de velocidades máximas em cada ciclo de maré. Valores positivos (negativos) indicam que a velocidade de enchente (vazante) é superior a velocidade de vazante (enchente). Linha preta marcando a camada limite logarítmica. (C) Variabilidade temporal da duração de cada maré enchente e vazante. Valores positivos (negativos) indicam que a enchente (vazante) teve uma maior duração que a vazante (enchente). Linha preta marcando a camada limite logarítmica..... 29
- Figura 14: (A) Recorte de um momento da série temporal do nível. Valores máximos indicando momentos de sizígia e os mínimos momentos de quadratura. (B) Variabilidade temporal do perfil vertical de velocidades de maré (longitudinal ao canal). Valores positivos (negativos) indicam correntes de enchente (vazante), ou seja, orientadas para dentro (fora) da baía. 30
- Figura 15: (A) Série do nível máximo da maré a cada ciclo. Valores máximos indicando momentos de sizígia e os mínimos momentos de quadratura. (B) Variabilidade temporal do perfil vertical de velocidades máximas de maré em cada ciclo de maré. Valores positivos (negativos) indicam que a velocidade de enchente (vazante) é superior a velocidade de vazante (enchente). Linha preta marcando a camada limite logarítmica. (C) Variabilidade temporal da duração de cada maré enchente e vazante. Valores positivos (negativos) indicam que a enchente (vazante) teve uma maior duração que a vazante (enchente). Linha preta marcando a camada limite logarítmica. 31
- Figura 16: (A) Série do nível máximo da maré a cada ciclo. Valores máximos indicando momentos de sizígia e os mínimos momentos de quadratura. (B) Variabilidade temporal do perfil vertical de velocidades filtrada com frequência de corte de 50h. Valores positivos (negativos) indicam correntes de enchente (vazante), ou seja, orientadas para dentro (fora) da baía. Linha preta marcando a camada limite logarítmica..... 32
- Figura 17: Série temporal dos parâmetros de ondas obtidos no canal de Salvador. (A) Altura significativa (m). (B) Período de pico (s). (C) Tensão de cisalhamento (N/m²)...... 33
- Figura 18: Distribuição de frequências dos diâmetros de sedimento da amostra coletada na posição do correntômetro. 33
- Figura 19: (A) Série do nível máximo da maré a cada ciclo. Valores máximos indicando momentos de sizígia e os mínimos momentos de quadratura. (B) Transporte de sedimento por ação das correntes medidas, a cada ciclo de maré. (C) Transporte de sedimento por correntes de maré, para enchente e vazante, a cada ciclo de maré. (D) Transporte de sedimento por ação conjunta de onda e correntes medidas, para enchente e vazante, a cada ciclo de maré. 35
- Figura 20: (A) Série do nível máximo da maré a cada ciclo. Valores máximos indicando momentos de sizígia e os mínimos momentos de quadratura. (B) Transporte líquido de sedimentos em cada ciclo de maré para as condições i) corrente medida, ii) correntes de maré previstas e, iii) corrente medida + ondas..... 36

Figura 21: Campo de velocidades máximas das correntes de maré no canal de Salvador, entre meses de janeiro e junho de 2015. Ponto preto marcando a posição onde foi feito o fundeio do ADCP. Média das velocidades máximas de enchente à esquerda e média das velocidades máximas de vazante à direita.....	37
Figura 22: Campo de magnitude média das correntes de maré no canal de Salvador, entre meses de janeiro e junho de 2015. Ponto preto marcando a posição onde foi feito o fundeio do ADCP.	37
Figura 23: O mapa mostra o campo médio das razões entre as velocidades máximas de enchente e vazante em cada maré entre os meses de janeiro e junho de 2015. Ponto preto marcando a posição onde feito o fundeio do ADCP.....	38

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Constantes harmônicas para diferentes regiões dentro da BTS.	15
Tabela 2: Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos dados modelados e observados.	25

1 INTRODUÇÃO

O transporte de areia em um ambiente costeiro ocorre sob a influência da combinação de processos hidrodinâmicos associados à propagação de ondas e correntes geradas pela maré e ventos (VAN RIJN 2013). Para a fração areia, grande parte do transporte ocorre por arrasto, com partículas saltando, rolando e deslizando em estreito contato com o fundo. O transporte por arrasto gera alterações na morfologia do fundo, com o desenvolvimento de formas de leito de diferentes dimensões (SOULSBY 2005). Em regiões estuarinas, a corrente de maré é a principal fonte de tensões de cisalhamento responsável por quebrar a inércia de repouso das partículas. Ao entrar no estuário, o fluxo de maré é afetado pela sua geomorfologia, estabelecendo assimetrias no campo de elevação e correntes, entre os fluxos de enchente e de vazante. A assimetria da maré, gerada com a propagação da onda de maré do oceano aberto para o confinamento do estuário, pode ser representada pelo crescimento não linear de componentes sub-harmônicos dos principais constituintes harmônicos das marés astronômicas. Em locais onde a componente lunar semi-diurna principal (M_2) é dominante, como ocorre na maior parte da costa brasileira, a componente sub-harmônica mais significativa gerada é a M_4 , primeiro sub-harmônico de M_2 . O crescimento de M_4 pode ser medido pela sua amplitude relativa, ou razão de amplitude M_4 / M_2 , o qual indica o grau de distorção da maré. Já o sentido da distorção, favorecendo menores intervalos de maré enchente (fluxos mais fortes de enchente) ou de vazante (fluxos mais fortes de enchente), é dado pela diferença de fase entre as duas componentes (FRIEDRICHS e AUBREY 1988). Fry e Aubrey (1990) investigaram o impacto da assimetria das marés no transporte residual de sedimentos arenosos, se para dentro ou para fora do estuário, e propuseram um diagrama de referência (Figura 1) para o diagnóstico deste transporte baseado somente na relação de amplitude e fase de M_2 e M_4 , ou seja, M_4/M_2 e $2M_4 - M_2$, respectivamente.

Conforme relatado por Lessa et al. (in press), a maioria dos estuários brasileiros apresenta assimetrias de maré condizentes com o predomínio de correntes de maré vazante, fato corroborado pela presença de deltas de maré vazante à jusante da saída dos estuários. Este é o caso, por exemplo, da Baía de Todos os Santos (BTS) (Figura 2), onde a hidrodinâmica é forçada em grande parte pela maré astronômica caracteristicamente semi-diurna (XAVIER 2002; CIRANO E LESSA 2007; SANTANA et al. in press), e apresenta um extenso delta de maré vazante (Banco de Santo Antônio) junto à desembocadura (LESSA et al. 2000, MELLO

2016) (Figura 2). A maré na BTS é amplificada e distorcida ao se propagar para o interior da baía, onde a altura média da maré cresce 1,3 vezes e a amplitude da componente M_4 é amplificada em 4 vezes em relação àquela na entrada da baía (CIRANO E LESSA 2007, PEREIRA 2013). A distorção do campo de elevação da maré ocorre, por continuidade, como consequência de assimetrias na descarga de maré enchente e vazante. Os registros de maré obtidos na BTS por Gens (2006), Cirano e Lessa (2007), Pereira (2013), e Pereira e Lessa (2009), relacionados na Tabela 1, sugerem um transporte residual de sedimentos arenosos (carga de fundo) em direção ao oceano, fato corroborado por simulações numéricas realizadas por Xavier (2002) e Lessa et al (2009), e registros de corrente analisados por Cirano e Lessa (2007), Pereira e Lessa (2009). A posição das relações entre as componentes de maré da Tabela 1 no diagrama da Figura 1, mostra que o transporte de sedimentos associado à maré vazante na BTS deveria ser até 3 vezes maior que o de enchente em alguns canais da baía (círculos vermelhos na Figura 1).

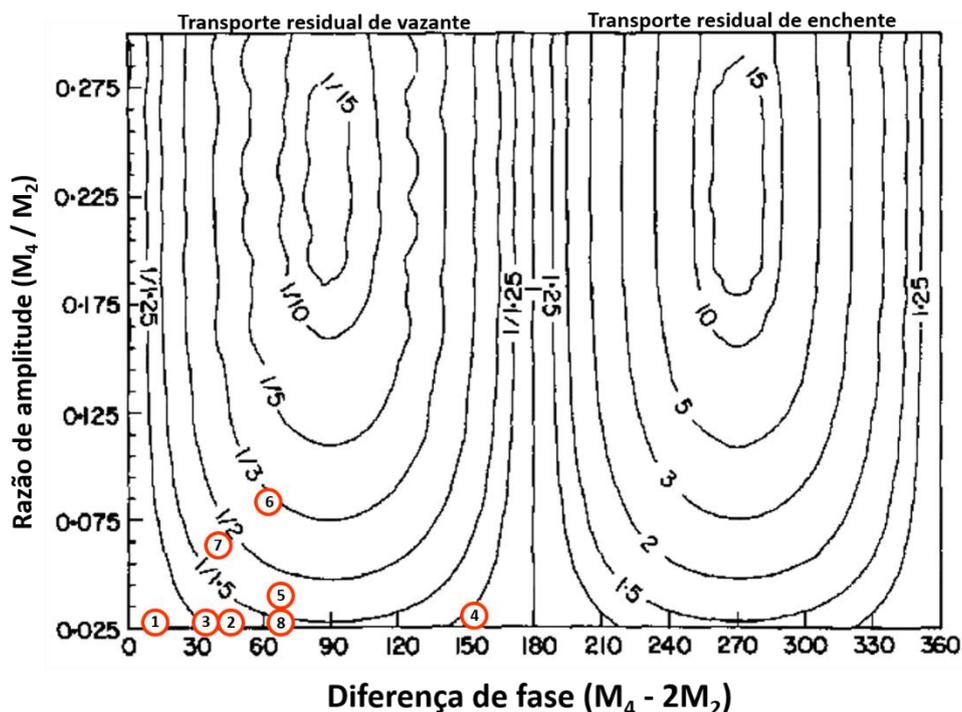


Figura 1: Diagrama de assimetria da variação do nível d'água vs razão entre transporte de arrasto de enchente e vazante. O eixo da abcissa representa a diferença de fase das componentes harmônicas M_4 e M_2 . O eixo da ordenada representa a razão das amplitudes das componentes M_4 e M_2 . Os círculos vermelhos marcam a posição relativa ao fundeio do ADCP na BTS (1) e as encontradas por diferentes autores em diferentes locais da BTS. Editado de Fry e Aubrey (1990).

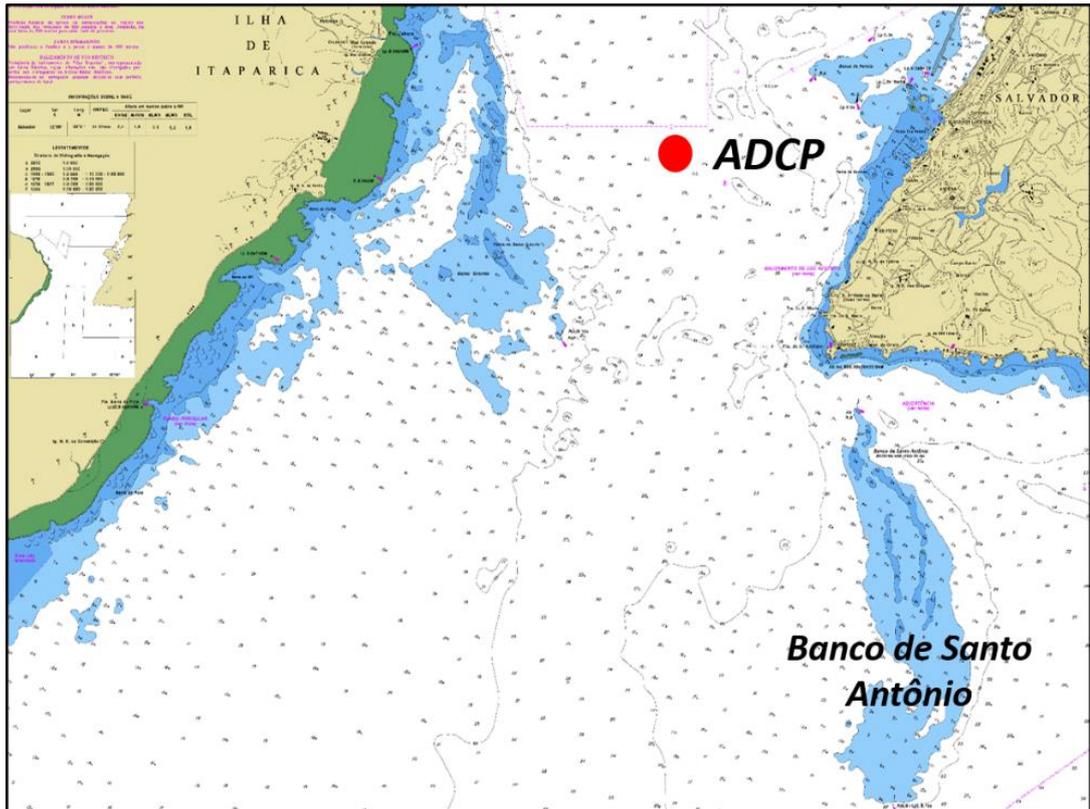


Figura 2: Recorte da carta náutica mostrando a entrada da Baía de Todos os Santos, com a posição de fundeio do correntômetro e o banco de Santo Antônio.

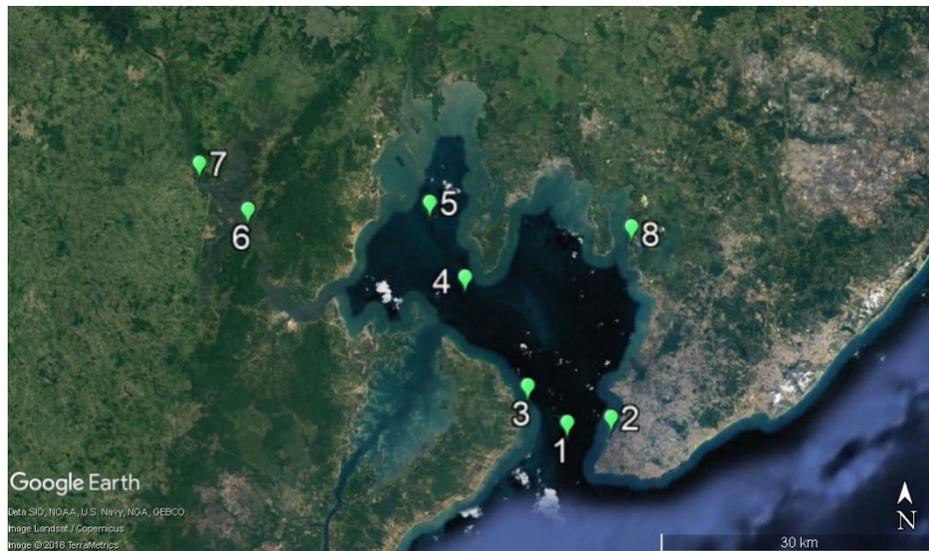


Figura 3: Mapa mostrando as diferentes regiões da BTS onde foram obtidos registros de maré por diferentes autores.

Tabela 1: Constantes harmônicas para diferentes regiões dentro da BTS.

Nº	AUTOR	LOCAL	M ₂		M ₄		Amp	Fase
			AMP	FASE	AMP	FASE	M ₄ / M ₂	M ₄ - 2M ₂
1	Relatório Coppe	C. Salvador	0.77	108.6	0.02	236.5	0.02	19
2	Pereira 2013	SSA	0.80	112.0	0.01	275.0	0.02	51
3	Cirano e Lessa (2007)	S19	0.81	101.0	0.02	234.0	0.02	32
4	CRA 2000	S5	0.89	101.0	0.02	358.0	0.02	156
5	CRA 2000	S20	0.93	104.0	0.04	279.0	0.04	71
6	CRA 2000	S18	1.06	109.0	0.09	285.0	0.09	67
7	Genz 2006	Coqueiros	1.04	128.0	0.06	294.0	0.06	38
8	Pereira e Lessa 2009	Cotegipe	0.91	114.1	0.02	299.2	0.02	70.95

O fluxo de maré abordado no trabalho de Friedrichs e Aubrey (1988) e Fry e Aubrey (1990) se refere exclusivamente à componente barotrópica do escoamento de maré nos estuários, e mostram o impacto que variações espaciais da batimetria geram no transporte de sedimentos. No entanto, fluxos não mareais, são estabelecidos pelos ventos e por diferenças longitudinais de densidade, os quais podem exercer papel significativo no fluxo total de água em um estuário (RIBEIRO et al. 2004). Cirano e Lessa (2007) identificaram, no Canal de Salvador, a presença de correntes residuais com sentidos opostos na superfície e no fundo, tanto no período de verão quanto no de inverno. Pereira e Lessa (2009), Lessa et al (2009) e Lessa et al (in press) identificaram uma circulação média verticalmente estratificada na coluna d'água (circulação gravitacional) em várias regiões da BTS, incluindo o Canal de Salvador onde a estratificação foi permanentemente observada ao longo de 1 ano de registros contínuos. Apesar da influência das assimetrias das correntes de maré astronômica no transporte residual de sedimentos arenosos já ter sido largamente investigada, foram encontrados poucos estudos relatando a influência de fluxos não mareais estuarinos, de natureza baroclínica, na determinação de uma direção resultante do transporte de sedimentos arenosos. Thomas et al. (2001) e Brown et al. (2015) mostram que atividades de dragagem acentuaram a velocidade do fluxo gravitacional na Baía de Liverpool e facilitaram a importação de sedimentos arenosos no estuário de Mersey. Por si só, devido às baixas velocidades de escoamento, a circulação gravitacional não tem a capacidade de gerar transporte por arrasto. No entanto, o escoamento de fundo direcionado para dentro do estuário combinado ao fluxo de maré enchente, o qual quebra a inércia da partícula, pode acabar por favorecer o transporte residual de sedimentos para dentro do estuário.

Além dos fluxos não-mareais, a ação das ondas sobre o fundo pode ser importante nos estuários com ampla embocadura. Apesar de ter capacidade limitada de gerar uma resultante no transporte de sedimentos, sua ação pode influenciar no transporte por romper a inércia de repouso do sedimento, e atenuar de forma mais severa as tensões cisalhantes no fundo em situações de maré enchente, quando se propaga na mesma direção das correntes (UMEYAMA, 2005). Na BTS, a ação das ondas na mobilização dos sedimentos foi investigada por Hydros-CRA (2004), os quais mostram que os sedimentos na entrada da BTS podem ser movidos por ondas provenientes de S-SE durante outono e inverno.

Apesar do reconhecido domínio de maré vazante no transporte de sedimentos arenosos na BTS, durante a oportunidade de operações de fundeio de um correntômetro no Canal de Salvador em 2014, foi observada a existência de formas de leito orientadas com a maré enchente (Figura 4). A disponibilidade de uma longa série de dados correntométricos e de onda na entrada da BTS, oriunda do instrumento citado, motivou a investigação do transporte de sedimento de fundo no canal de Salvador, de modo a verificar que processos físicos estariam gerando a direção resultante do transporte de sedimento contrário ao da assimetria da maré.





Figura 4: Aspecto do leito do Canal de Salvador a profundidade de 30 m, com a estrutura de fundeio se assentando à frente da face deslizante de uma duna submersa direcionada para dentro da baía (superior) e foto de uma duna submersa no leito do canal, na posição do fundeio, mostrando a face deslizantes quase vertical com altura dessimétrica e a face de cavalgamento com pequenas formas de leito sobrepostos, orientados para dentro da baía (inferior).

2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é investigar a influência da circulação média, não-mareal, e da ação de ondas no transporte de sedimento de fundo na entrada da Baía de Todos os Santos.

Como objetivos específicos são listados:

- i) determinação da assimetria do campo de correntes total e de maré, e sua variabilidade temporal;
- ii) cálculo das tensões de cisalhamento geradas no fundo e determinação dos momentos de mobilização dos sedimentos pelas ondas;
- iii) cálculo do transporte de sedimentos por arrasto dos fluxos total e de maré, com e sem a atuação das ondas, e determinar a variação temporal do transporte;
- iv) determinação da variação espacial do fluxo de maré no canal de Salvador e área de abrangência do transporte resultante de sedimentos direcionado para dentro da BTS.

3 **ÁREA DE ESTUDO**

O Canal de Salvador, localizado na entrada da BTS (Figura 2), tem profundidade média de aproximadamente 30 metros, profundidade máxima de 102 m (XAVIER 2002), e uma embocadura com 9 km de largura, sendo seu fundo composto por sedimentos arenosos de origem marinha e natureza siliciclástica (Figura 5), com formas de leito que indicam a existência de transporte de sedimentos de fundo (DOMINGUEZ et al., 2009). Os *megaripples* observados no local do fundeio possuem, aproximadamente, 1 metro de altura e 10 metros de comprimento. Foram observados *ripples*, com cerca de 3 cm de altura e 25 cm de comprimento, sobre a face de cavalgamento dos *megaripples*.

A maré na BTS apresenta um caráter fortemente semi-diurno, com o domínio da componente astronômica M_2 . O número de forma varia entre 0,06 na parte mais interna da baía e 0,11 na região oceânica adjacente. As maiores alturas de maré em condições equinociais de março e setembro são próximas a 1,43 m no Canal de Salvador. As constantes M_2 e M_4 , em Salvador, apresentam amplitudes de 0,80 m e 0,01 m, e fases entre $112,07^\circ$ e $274,97^\circ$, respectivamente (PEREIRA 2013).

A maré se comporta com uma onda estacionária dentro da baía, com velocidades mínimas ocorrendo nos momentos de virada da maré (preamar e baixa-mar). Os fluxos mais vigorosos e intensos ocorrem no Canal de Salvador e na maré vazante, onde a componente M_2 apresenta uma magnitude de 0,65 m/s na superfície (CIRANO E LESSA 2007). A maré astronômica explica 99% da variabilidade do fluxo observado na superfície, e 97,6% 2 metros acima do fundo (ROCHA 2015). O canal de Salvador apresenta uma clássica estrutura de fluxo estuarino, com correntes médias orientadas para dentro da BTS na base da coluna d'água, e direcionada para o oceano no topo, ambas com magnitude máxima de 0,05 m/s (LESSA et al. 2009).

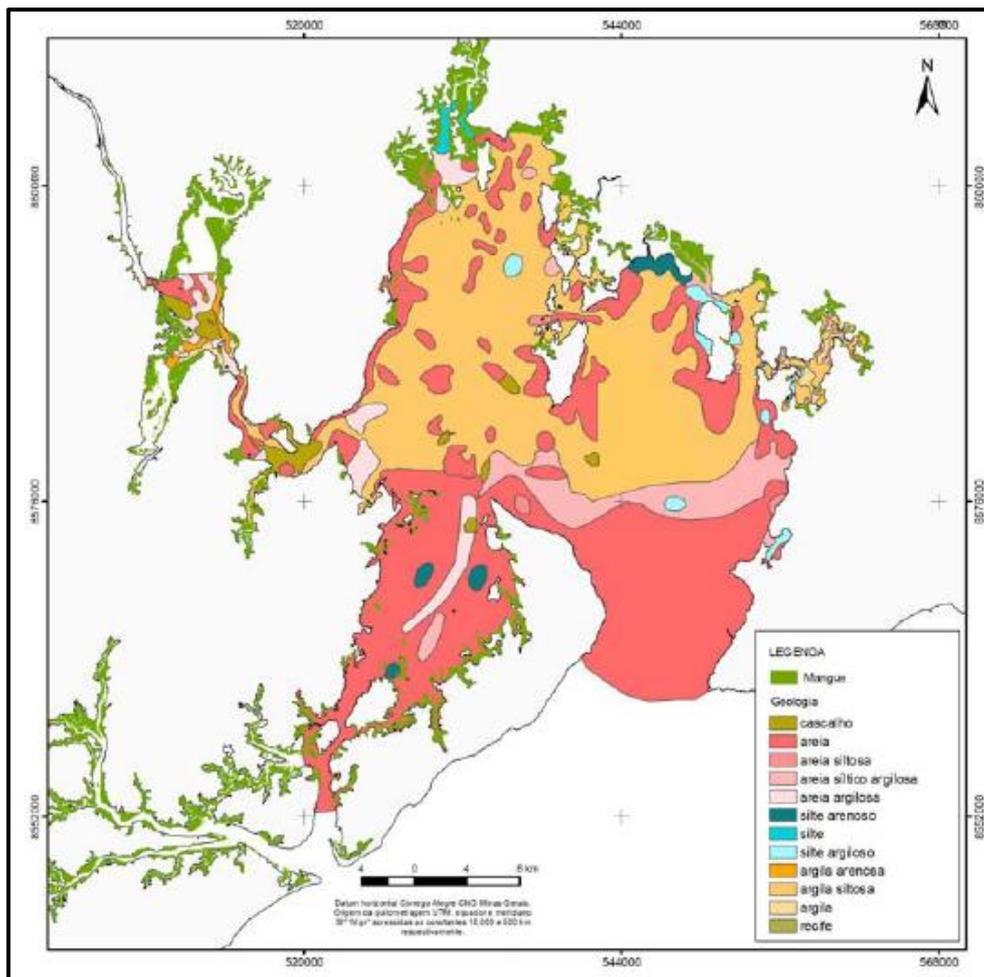


Figura 5: Mapa das fácies texturais na BTS. (Lessa e Dias 2009)

O clima de ondas na região apresenta pequenas variações sazonais entre verão e inverno. Durante o inverno, as ondas de sudeste com alturas entre 2 e 3 m e períodos de 6 a 10 s são as mais frequentes. No verão a direção dominante é de leste, com alturas entre 1 e 2 metros e períodos de 6 a 8 s (PIANCA et al. 2010). As ondas mais altas são observadas durante o inverno, com ondas de sudeste alcançando 4 m de altura e períodos de 17 s. A região apresenta ondas com direção dominante de leste/sudeste associadas à ação dos ventos alísios. No entanto, durante o outono e inverno as frentes frias vindas de sul afetam o clima de ondas na região (PIANCA et al. 2010). No Canal de Salvador HYDROS-CRA (2004) relatam a dominância de ondas com alturas médias quadráticas de 0,35 m no verão e 0,75 no inverno.

A magnitude média da componente zonal do vetor velocidade (U), orientada transversalmente ao canal, é 7 vezes menor que a média da componente meridional. Com isso, apenas a componente meridional do vetor velocidade (V), a qual é orientada longitudinalmente ao canal (N-S), foi analisada. Fluxos com valores positivos (negativos) indicam escoamento para dentro (fora) da baía.

Um filtro espectral passa baixa Lanczos, com período de corte de 4 horas, foi aplicado à série de dados para a suavização do sinal de corrente e facilitação da identificação dos momentos de inversão de fluxo em cada uma das células de medição. Com isso foi possível identificar a velocidade máxima e o período de tempo decorrido em cada intervalo de maré enchente e vazante. Um segundo processo de filtragem do sinal de corrente foi executado com frequência de corte de 50 horas para extrair o sinal não-mareal, de baixa frequência, da componente V. Medidas de assimetria foram calculadas a partir do logaritmo natural da razão entre os tempos e as velocidades máximas de enchente e vazante. A utilização de logaritmo natural permite que razões maiores e menores que 1 sejam simetricamente representadas em gráfico, facilitando a interpretação.

Duas amostras de sedimentos de fundo foram coletadas no local de fundeio próximo à crista da forma de leito e no primeiro terço da sua face de deslizamento. As amostras foram lavadas e sua distribuição granulométrica determinada por peneiramento em intervalos de 0,5 Phi. Em seguida foi feita a média das duas amostras.

O transporte de sedimento por arrasto no local de fundeio foi calculado a partir das equações descritas por Van Rijn (2013), para três condições: i) para corrente medida, ii) para correntes de maré previstas pela reconstituição harmônica do campo de correntes, em cada célula de profundidade, utilizando o pacote t-tide para Matlab e, iii) ação conjunta de ondas e correntes medidas.

O transporte associado às correntes, em kg/m/s, foi calculado a partir da equação:

$$T_f = \alpha * \rho_s * V_m * Prof * \left(\frac{D_{50}}{Prof} \right)^{1.2} * Me_c^{1.5} \quad (1)$$

onde T_f = transporte de sedimento por arrasto por correntes (kg/m/s), Me_c = parâmetro de mobilidade para correntes, α = constante, ρ_s = densidade do sedimento, V_m = velocidade média da camada limite logarítmica, D_{50} = diâmetro mediano do sedimento, e $Prof$ = profundidade. A profundidade aqui utilizada é a profundidade da camada limite logarítmica.

Me se refere ao parâmetro de mobilidade, dado por:

$$Me_c = \frac{V_m - U_{cr_c}}{\sqrt{(S - 1) * g * D_{50}}} \quad (2)$$

sendo S = densidade específica do sedimento, e U_{cr_c} = velocidade crítica das correntes calculada por:

$$U_{cr_c} = 0.19 * D_{50}^{0.1} * \text{Log} \left(\frac{12 * Prof}{3 * D_{90}} \right) \quad (3)$$

onde D_{90} corresponde ao diâmetro associado ao 90º percentil da distribuição granulométrica acumulada.

O transporte associado à ação conjunta de ondas e correntes é dado também pela equação 1, porém o parâmetro de mobilidade usado para essa condição é dado por:

$$Me_w = \frac{U_e - U_{cr_w}}{\sqrt{(S - 1) * g * D_{50}}} \quad (4)$$

Sendo U_e = velocidade efetiva (equação 5), e U_{cr_w} = velocidade crítica de mobilização dos sedimentos por ação de ondas e correntes (equação 6).

$$U_e = V_m + (0.4 * U_w) \quad (5)$$

$$U_{cr_w} = (\beta * U_{cr_c}) + (1 - \beta) * U_{cr_w} \quad (6)$$

A variável β na equação 6 é dada por $V_m / (V_m + U_w)$, onde U_w = velocidade orbital junto ao fundo (equação 7), e U_{cr_w} = velocidade crítica de ondas para mobilização do fundo (equação 8), definidas como:

$$U_w = \frac{(\pi * H_s)}{T_p * \sinh\left(\frac{2 * \pi * h}{L}\right)} \quad (7)$$

$$U_{CW} = 0.24 * ((S - 1) * g)^{0.66} * D_{50}^{0.33} * T_p^{0.33} \quad (8)$$

onde H_s é a altura significativa, T_p é o período de pico, h é a profundidade da coluna d'água e L = comprimento de ondas em águas intermediárias.

O transporte de sedimentos de fundo por ação das correntes de maré foi calculado seguindo o mesmo processamento para o transporte por correntes medidas, porém a velocidade utilizada foi a componente V do vetor velocidade obtida pela reconstituição harmônica do campo de correntes (ver esquema de cálculos na Figura 7).

A quantidade de sedimento transportado em cada maré enchente e em cada vazante, para cada uma das 3 condições, foi calculada pela integral do segmento da curva relativa a cada período específico, dessa forma o transporte é dado em kg/m (Figura 7).

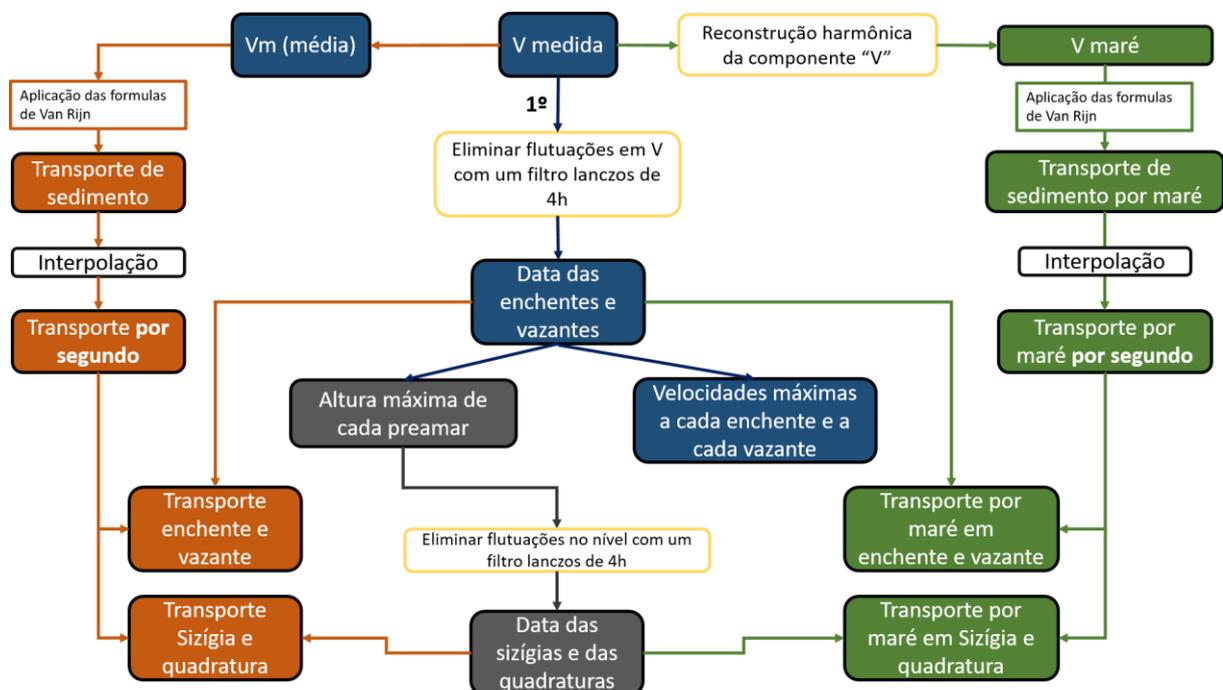


Figura 7: Resumo esquemático do processamento dos dados.

Uma modelagem do escoamento de maré na Baía de Todos os Santos foi feita utilizando o modulo Delft3D – FLOW do modelo Delft3D, em modo bidimensional (velocidade média na vertical) e com grade numérica curvilínea com espaçamento horizontal de 75 metros (Figura 8). A maré foi forçada nos contornos abertos com dados do modelo de maré TPXO, onde foram utilizadas as treze principais componentes harmônicas (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , MF , MM , M_4 , MS_4 e MN_4). As forçantes atmosféricas foram obtidas do Global Forecast System (GFS) com resolução espacial de aproximadamente 28 km. Considerando que as forçantes atmosféricas foram incluídas no modelo, as correntes de maré previstas foram obtidas pela reconstituição harmônica do campo de correntes. Foram analisados os dados modelados para o Canal de Salvador entre janeiro e julho de 2015, incluindo dessa forma as marés equinociais.

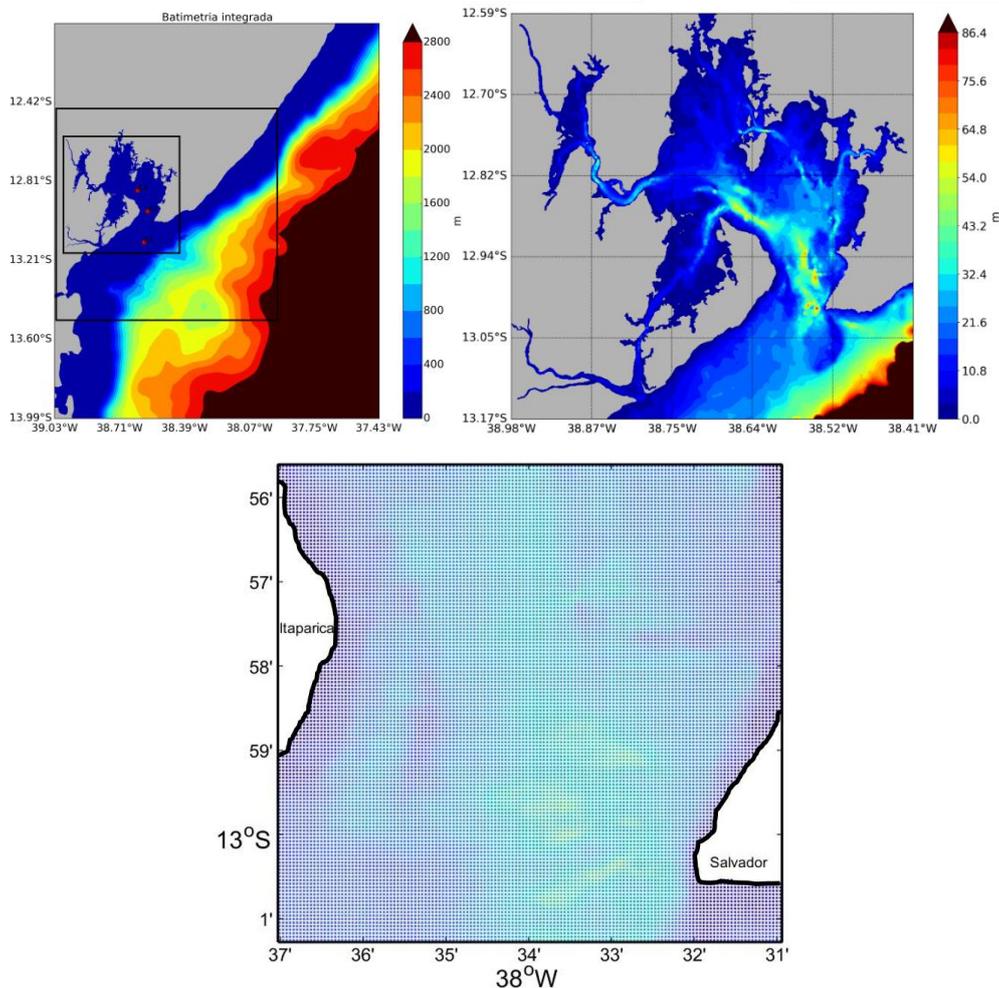


Figura 8: Domínio do modelo (esquerda), e detalhe da batimetria da BTS utilizada (direita). Abaixo a grade do modelo no canal de Salvador, com resolução espacial de 75 m.

4.1 Validação do modelo

A validação dos dados modelados foi feita utilizando os seguintes parâmetros estatísticos: i) valores médios, máximos e desvio padrão para dados modelados e observados, ii) Viés (valor médio da diferença entre resultados do modelo e observados que mostra se o modelo tende a superestimar medições ou subestimar as medições, quando positivo ou negativo, respectivamente), iii) erro quadrático médio (raiz quadrada do valor médio do quadrado da diferença entre modelo e medições, dá ideia da magnitude do módulo do erro do modelo), iv) índice de espalhamento (razão entre o erro quadrático e o valor médio das medições, mede o grau de confiança que se pode ter nos resultados do modelo), e v) inclinação quadrática média (raiz quadrada da razão entre a variância do modelo e a variância das medições, é análise de regressão na qual nenhum dos dois conjuntos de dados é considerado como perfeito, se maior que 1 o modelo tende a superestimar valores grandes ou subestimar valores pequenos e se menor que 1 ocorre o oposto).

O resultado dos parâmetros estatísticos (Tabela 2) e o gráfico da Figura 10, mostram que os resultados do modelo estão em fase com os dados observados, com um coeficiente de correlação (R^2) de 0,98. As velocidades do modelo estão subestimadas em momentos de sizígia e superestimadas em momentos de quadratura. As velocidades máximas em cada maré foram ajustadas utilizando a razão entre as velocidades máximas observadas e do modelo para enchente e para vazante ao longo de toda a série. As razões foram então multiplicadas pelas velocidades máximas do modelo (enchente e vazante). Este ajuste foi executado para toda a grade numérica.

Tabela 2: Parâmetros estatísticos utilizados na comparação dos dados modelados e observados.

	Observado	Modelo
Média	0,50	0,51
Desvio	0,57	0,57
Máximo (positivo)	1,14	1,05
Máximo (negativo)	-1,23	-1,08
Viés	0	
Erro Médio Quadrático	0,12 m/s	
Índice de Espalhamento	0,25	

Inclinação Quadrática Média	0,99
Correlação	0,98

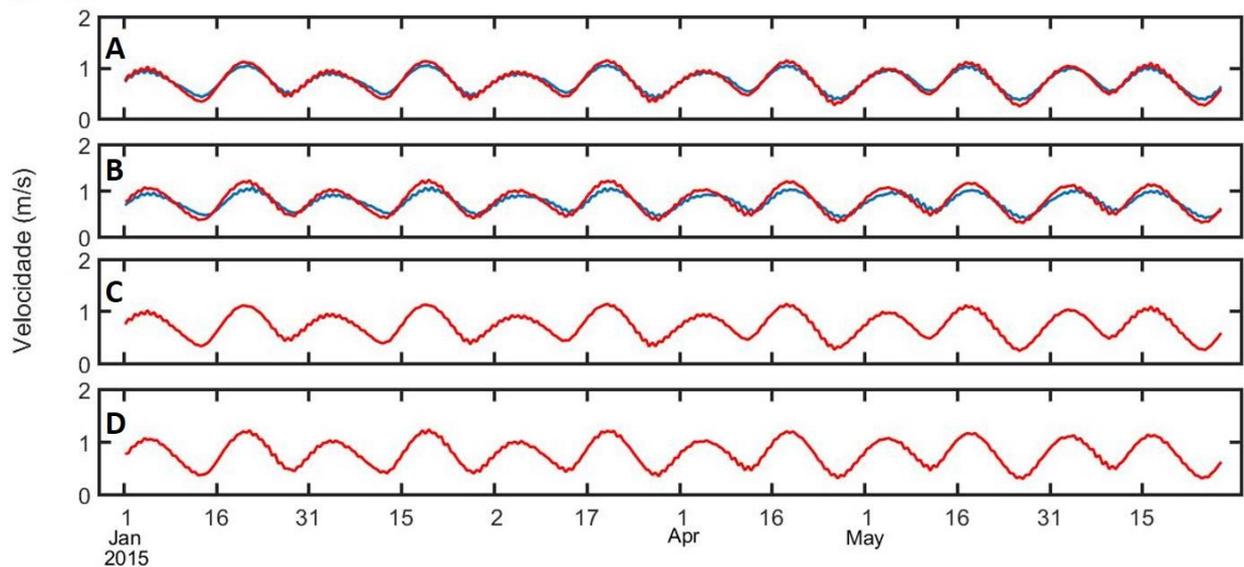


Figura 9: Série temporal das velocidades máximas de enchente (A e C) e de vazante (B e D) para os dados modelados (azul) e observados (vermelho), originais (A e B) e ajustados (C e D)

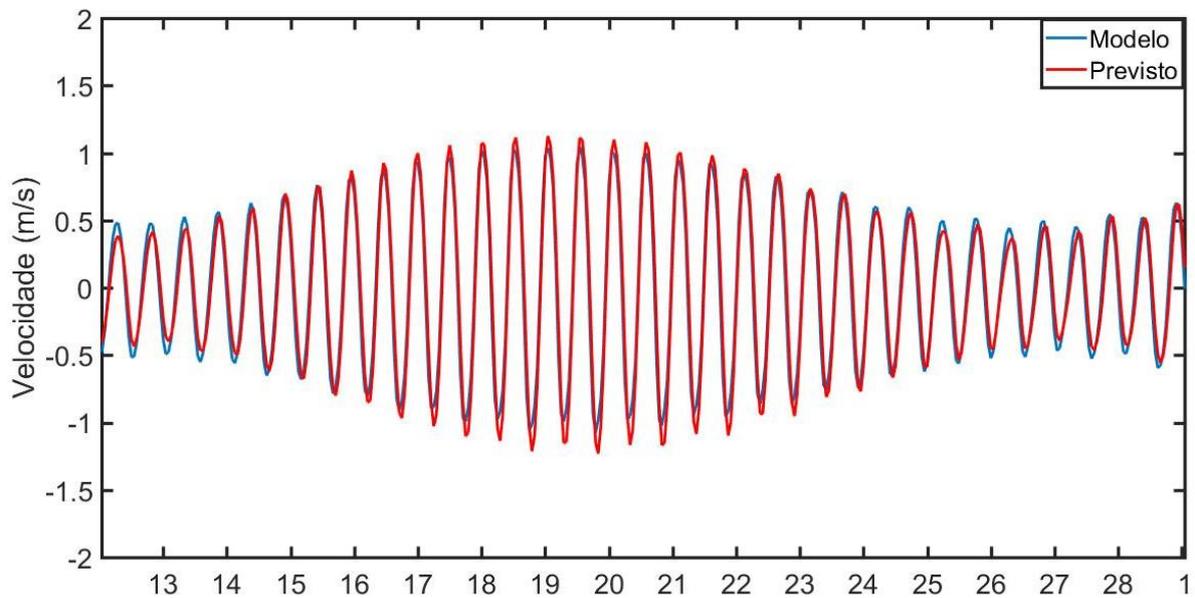


Figura 10: Recorte da série temporal de correntes maré observadas (vermelho) e modeladas (azul) em uma maré equinocial, entre 13 de fevereiro e 1 de março de 2015.

5 RESULTADOS

5.1 Corrente medida

A variação da componente V do fluxo e o nível da coluna d'água estão apresentados na Figura 11 para um período de 1 mês coincidente com uma maré equinocial (maiores alturas de maré ao longo do ano no dia 21 de março). Os valores positivos (negativos) de velocidade indicam marés de enchente (vazante), ou seja, fluxo para dentro (fora) da baía. A magnitude máxima registrada foi de 1,65 m/s próximo à superfície (~7 m de profundidade) em momento de maré vazante. A velocidade máxima de enchente neste período alcançou 1,4 m/s próximo a superfície.

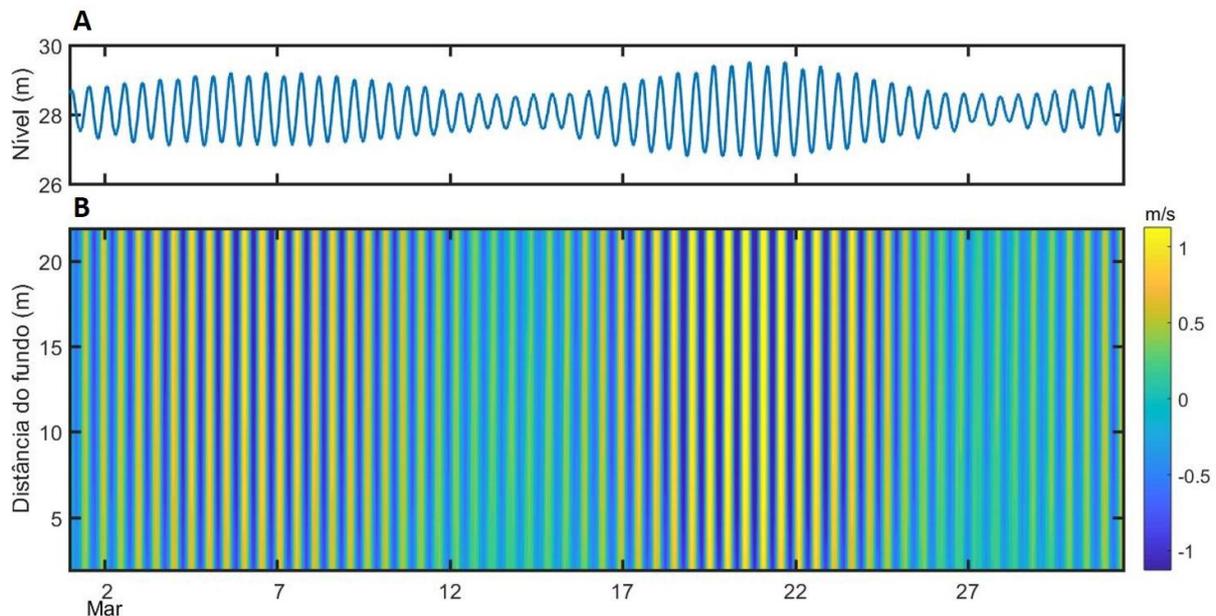


Figura 11: (A) Recorte de um momento da série temporal do nível. (B) Variabilidade temporal do perfil vertical de velocidades no mês de março (longitudinal ao canal). Valores positivos (negativos) indicam correntes de enchente (vazante), ou seja, orientadas para dentro (fora) da baía.

A Figura 12 mostra os perfis verticais de velocidades médias (A) e os perfis verticais das magnitudes médias (B) considerando todo o intervalo de dados. Observa-se que o perfil vertical das velocidades médias do fluxo medido (Figura 12A) é estratificado, com fluxo direcionado para fora da baía na superfície e para dentro da baía no fundo, resultado da presença de fluxos gravitacionais. As velocidades médias máximas foram 0,05 próximos à superfície e 0,03

próximo ao fundo. A inversão da orientação do fluxo ocorre à profundidade de 12 m. Já o perfil vertical das magnitudes médias (Figura 12B) mostra que a camada limite se estende por toda a coluna d'água, sendo que a camada limite logarítmica alcança os primeiros 4 m do perfil. A magnitude média para o fluxo previsto de maré é igual a 0,37 m/s no fundo e 0,55 m/s mais próximo à superfície. As magnitudes médias das correntes medidas foram 2% superiores, variando entre 0,38 m/s próximo ao fundo e 0,56 m/s na camada mais superficial.

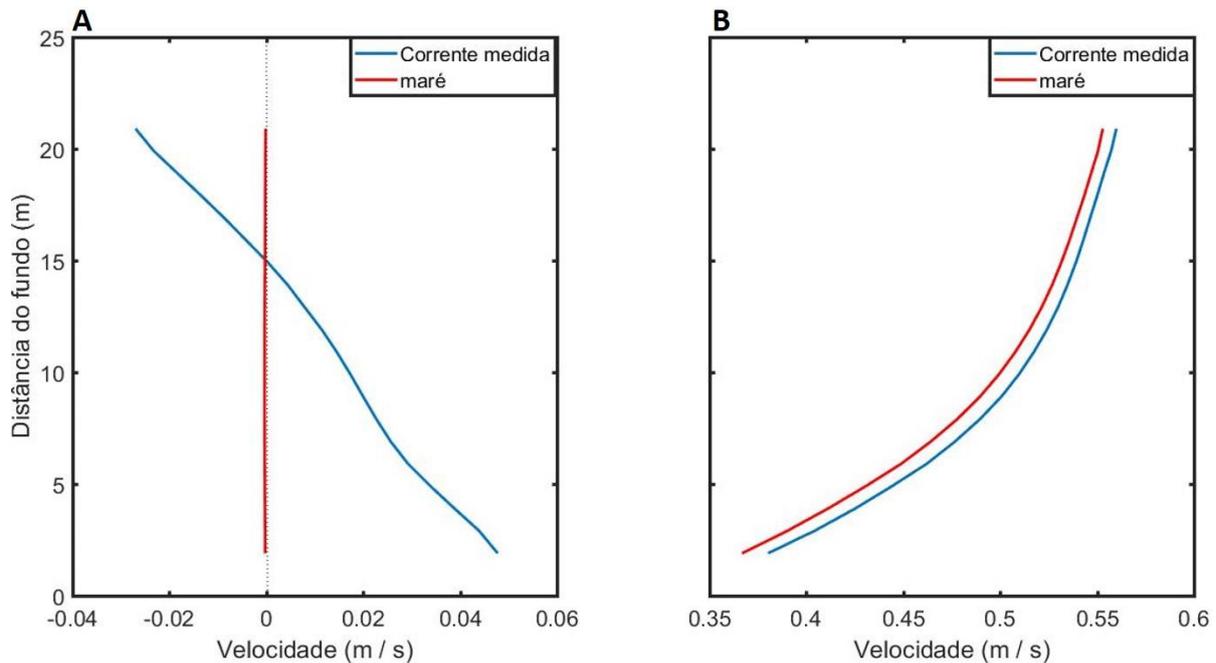


Figura 12: Perfil vertical médio, relativo a todo período de medição (12 meses), do fluxo de água no local de monitoramento. (A) velocidades médias do fluxo medido em azul e velocidades médias do fluxo associado à maré astronômica prevista em vermelho, (B) magnitudes médias do fluxo medido em azul e magnitudes médias do fluxo associado à maré astronômica prevista em vermelho.

A Figura 13 mostra a variabilidade temporal da altura de maré e do logaritmo natural das razões entre i) velocidades máximas de enchente e vazante, e ii) duração dos ciclos de maré enchente e vazante, para cada ciclo de maré, ao longo da coluna d'água. Os gráficos consideram toda a série temporal. Na Figura 13A as maiores alturas se referem aos períodos de maré de sizígia e menores às marés de quadratura. Os valores positivos (negativos) na Figura 13A e Figura 13B indicam que a velocidade máxima e duração da maré enchente (vazante) é superior à velocidade máxima e duração de vazante (enchente). O valor de 0,5 (-0,5) na Figura 13B indica fluxos de enchente (vazante) 1,6 vezes mais veloz que o de vazante (enchente). O valor 0,5 (-0,5) na Figura 13C indica que a duração da maré enchente (vazante) foi 3 horas mais duradoura que a

maré vazante (enchente). A maré enchente foi, em média, 30 minutos mais demorada do que a duração da maré vazante.

As velocidades máximas de enchente se mostraram superiores às máximas de vazante nos 5 primeiros metros acima do fundo praticamente ao longo de todo o ano. Por outro lado, a velocidade máxima de vazante foi superior à velocidade máxima de enchente na superfície ao longo de praticamente todo o ano. Nas marés de sizígia este padrão foi menos evidente, havendo ocasiões quando as velocidades máximas de vazantes foram superiores as máximas de enchente ao longo de toda a coluna d'água. No que se refere à duração das fases de enchente e vazante, os fluxos de maré enchente próximo ao fundo perduraram por mais tempo do que os de maré vazante ao longo de todo o ano. De forma oposta, os fluxos de maré vazantes foram sempre mais demorados do que os de maré enchente próximo à superfície, sendo que as diferenças foram magnificadas em maré de quadratura quando diferenças de até 3 horas foram observadas.

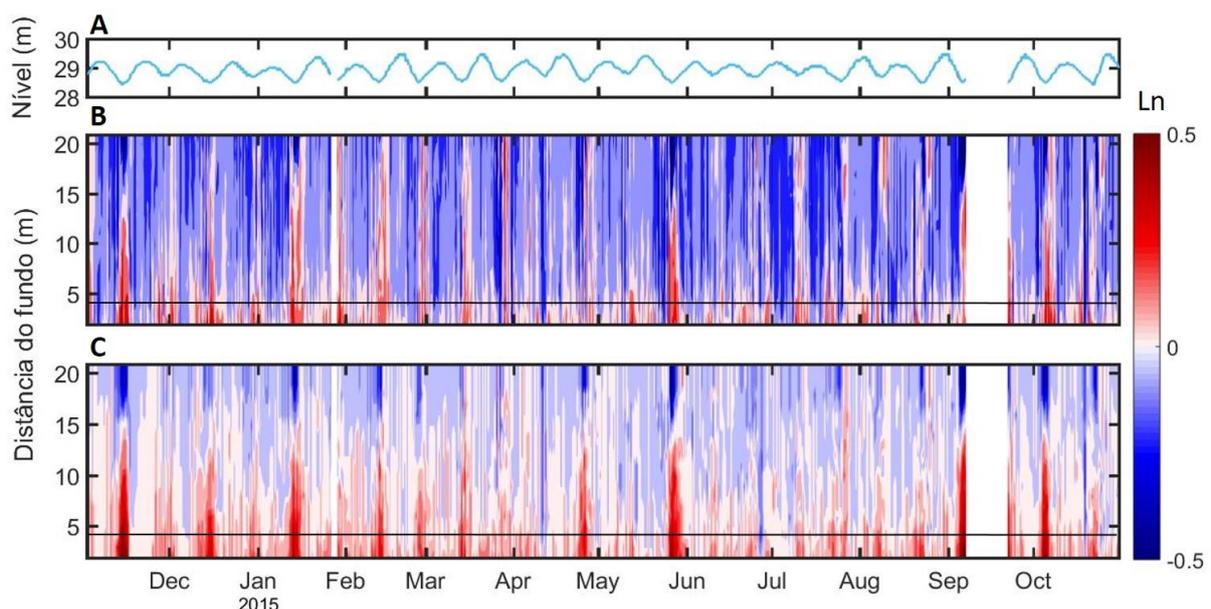


Figura 13: (A) Série do nível máximo da maré a cada ciclo. Valores máximos indicando momentos de sizígia e os mínimos momentos de quadratura. (B) Variabilidade temporal do perfil vertical de velocidades máximas em cada ciclo de maré. Valores positivos (negativos) indicam que a velocidade de enchente (vazante) é superior a velocidade de vazante (enchente). Linha preta marcando a camada limite logarítmica. (C) Variabilidade temporal da duração de cada maré enchente e vazante. Valores positivos (negativos) indicam que a enchente (vazante) teve uma maior duração que a vazante (enchente). Linha preta marcando a camada limite logarítmica.

5.2 Correntes forçadas pela maré astronômica

A análise harmônica das correntes de maré permitiu a reconstrução da componente V das correntes de maré prevista, a qual é apresentada na Figura 14 junto à variação do nível d'água. Novamente, valores positivos (negativos) indicam marés de enchente (vazante). As velocidades máximas previstas para a componente V em marés de enchente e vazante foram, de modo geral, apenas um pouco menores do que as velocidades das correntes medidas (Figura 13), com valores iguais a 1,44 m/s e -1,52 m/s, respectivamente. As velocidades médias do fluxo de maré próximo à superfície foram em média 33% superiores às velocidades no fundo, ambas orientadas com a maré de vazante. (Figura 12B). As magnitudes médias do fluxo foram muito semelhantes, variando de um mínimo de 0,37 junto ao fundo a um máximo de 0,55 próximo à superfície (Figura 12B).

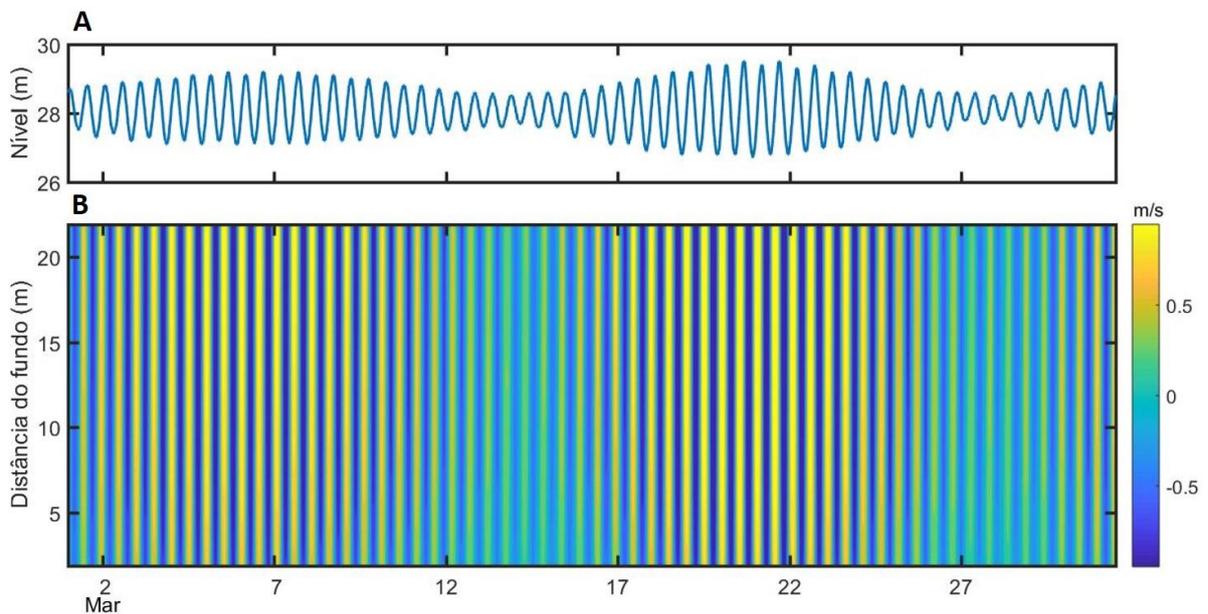


Figura 14: (A) Recorte de um momento da série temporal do nível. Valores máximos indicando momentos de sizígia e os mínimos momentos de quadratura. (B) Variabilidade temporal do perfil vertical de velocidades de maré (longitudinal ao canal). Valores positivos (negativos) indicam correntes de enchente (vazante), ou seja, orientadas para dentro (fora) da baía.

A Figura 15B mostra a variabilidade temporal do logaritmo natural da razão entre velocidades máximas de maré, na enchente e na vazante, para cada ciclo de maré, ao longo da coluna d'água. A Figura 15C apresenta a variabilidade temporal do logaritmo natural da razão entre a duração de cada maré enchente e vazante também ao longo da coluna d'água. Os valores positivos (negativos) indicam que a velocidade máxima de enchente (vazante) é superior a velocidade

máxima de vazante (enchente), onde na Figura 15B o valor 0,1 (-0,1) indica fluxos de enchente (vazante), aproximadamente, 1,1 vezes mais velozes que os de vazante (enchente) e na Figura 15C, o valor 0,1 (-0,1) indica que a enchente (vazante) foi 1 hora mais duradoura do que a vazante (enchente). A duração da maré enchente foi, em média, 15 minutos mais demorada do que a duração da maré vazante.

As velocidades máximas de maré na vazante se mostraram superiores às máximas de enchente praticamente ao longo de todo o ano em toda a coluna d'água. Nas quadraturas a situação tende a se inverter, com domínio de enchente até próximo a superfície. De modo geral, as marés de enchente foram mais duradouras do que as de vazante longo de todo o ano.

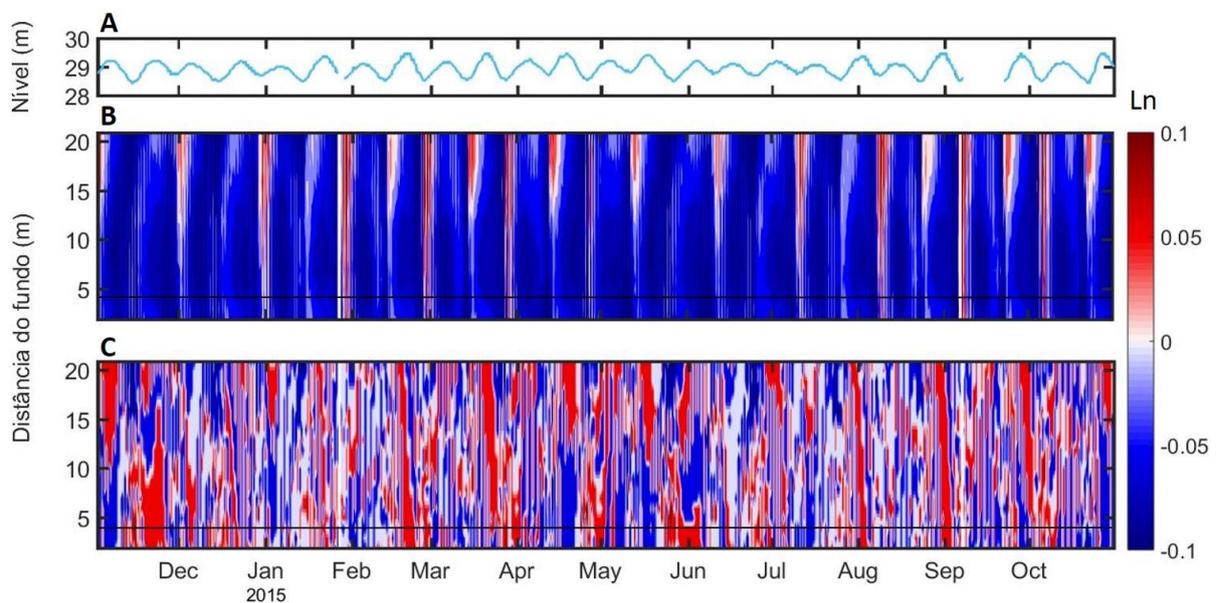


Figura 15: (A) Série do nível máximo da maré a cada ciclo. Valores máximos indicando momentos de sizígia e os mínimos momentos de quadratura. (B) Variabilidade temporal do perfil vertical de velocidades máximas de maré em cada ciclo de maré. Valores positivos (negativos) indicam que a velocidade de enchente (vazante) é superior a velocidade de vazante (enchente). Linha preta marcando a camada limite logarítmica. (C) Variabilidade temporal da duração de cada maré enchente e vazante. Valores positivos (negativos) indicam que a enchente (vazante) teve uma maior duração que a vazante (enchente). Linha preta marcando a camada limite logarítmica.

5.3 Fluxos não-mareais

A variabilidade temporal do fluxo não-mareal, longitudinal ao canal, está apresentado na Figura 16B. Os fluxos não-mareais foram no mínimo uma ordem de magnitude inferior ao fluxo

medido e ao fluxo de maré previsto. A velocidade máxima calculada para o fluxo não-mareal foi de 0,21 m/s, mais próximo à superfície, e 0,13 m/s no fundo. A média das velocidades na camada mais próxima à superfície foi -0,03 m/s, enquanto na de fundo esta foi de 0,05 m/s (Figura 16). A magnitude do fluxo no fundo foi, em média, 28% maior que aquela na superfície.

De modo geral, a estratificação do fluxo ocorre a 16 m do fundo (~12 m de profundidade), mas variando entre períodos de sizígia e quadratura de 17 m (~10 m de profundidade) e 15 m acima do fundo (~13 m de profundidade), respectivamente.

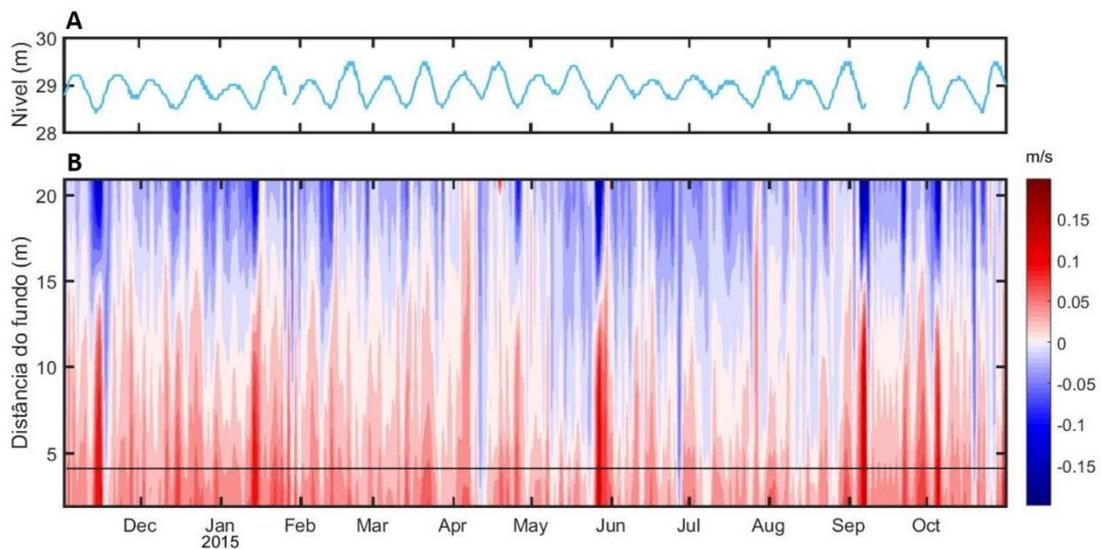


Figura 16: (A) Série do nível máximo da maré a cada ciclo. Valores máximos indicando momentos de sizígia e os mínimos momentos de quadratura. (B) Variabilidade temporal do perfil vertical de velocidades filtrada com frequência de corte de 50h. Valores positivos (negativos) indicam correntes de enchente (vazante), ou seja, orientadas para dentro (fora) da baía. Linha preta marcando a camada limite logarítmica.

5.4 Tensões de cisalhamento de fundo causado pelas ondas

As alturas máximas de onda ocorreram entre maio e julho de 2015, com valor máximo de 2,5 m em junho (Figura 17A). Períodos de pico acima de 16 s foram encontrados nos meses de maio, julho, agosto e outubro (Figura 17B). A tensão de cisalhamento máxima foi registrada no mês de maio, com 2 N/m², sendo que o mês de julho também apresentou tensões bem elevadas, chegando a 1,9 N/m² (Figura 17C). Os valores médios da altura significativa, período de pico e tensão de cisalhamento foram, respectivamente, 0,6 m, 9 s e 0,28 N/m².

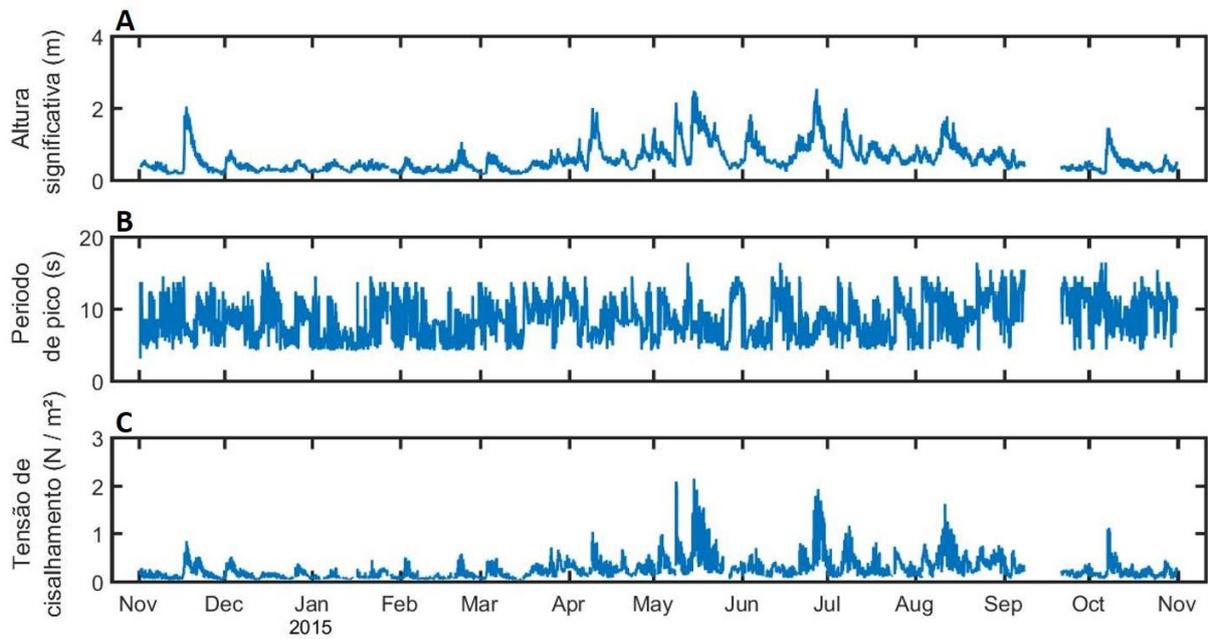


Figura 17: Série temporal dos parâmetros de ondas obtidos no canal de Salvador. (A) Altura significativa (m). (B) Período de pico (s). (C) Tensão de cisalhamento (N/m²).

5.5 Granulometria

A média dos resultados das análises granulométricas mostram que ocorre um domínio de areias médias, com diâmetro médio 0,25 mm, responsável por ocupar 81% do total da amostra. Aproximadamente 18% da amostra foi composta por sedimentos com a 0,5 mm de diâmetro. De acordo com a função de Shields, a tensão de cisalhamento crítica para esse tamanho de sedimento é 0,2 e 0,27 N/m².

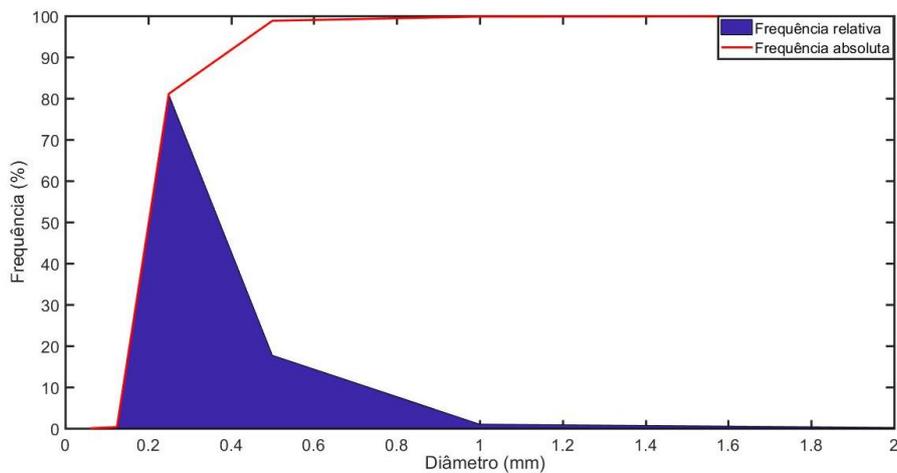


Figura 18: Distribuição de frequências dos diâmetros de sedimento da amostra coletada na posição do correntômetro.

5.6 Transporte de sedimentos de fundo

Na Figura 19 estão apresentados a variação temporal do nível máximo de água em cada ciclo de maré (Figura 19A) e do transporte de sedimentos por arrasto para as 3 condições propostas: i) para correntes medidas; ii) para correntes de maré previstas pela reconstituição harmônica do campo de correntes e; iii) para a ação conjunta de ondas e correntes medidas. A Figura 19B, que apresenta a variação do transporte por ação das correntes medidas, mostra que os valores associados à maré enchente são maiores que aqueles associados à vazante praticamente ao longo de todo o ano, sendo esta diferença maior em marés de sizígia. Algumas situações de sizígia, representando apenas 16% do tempo total de monitoramento, apresentaram um transporte de vazante superior ao de enchente por curtos períodos, quando as velocidades máximas de vazante foram superiores às máximas de enchente em toda a coluna d'água. Os valores máximos de transporte para enchente e vazante em um ciclo de maré ocorreram em fevereiro de 2015 com um transporte de 682 kg/m na enchente e 523 kg/m na vazante. Os transportes médios de enchente e de vazante foram de 110 kg/m e 80 kg/m.

O transporte de sedimento de fundo por ação exclusiva das correntes de maré (Figura 19C) é sempre dominado pelas correntes de vazante. O transporte máximo de vazante em um ciclo de maré foi de 455 kg/m em agosto de 2015, e o máximo transporte de enchente ocorreu em setembro de 2015 com 373 kg/m. O transporte de enchente médio por ciclo de maré foi de 72 kg/m e o de vazante 92 kg/m.

O transporte por ação conjunta das ondas e correntes medidas (Figura 19D) é maior na maré enchente do que na vazante ao longo de todo o ano. O transporte máximo de enchente em um ciclo de maré foi de 717 kg/m e o máximo de vazante, 442 kg/m. O transporte médio de enchente foi de 118 kg/m, enquanto que o de vazante foi de 62 kg/m.

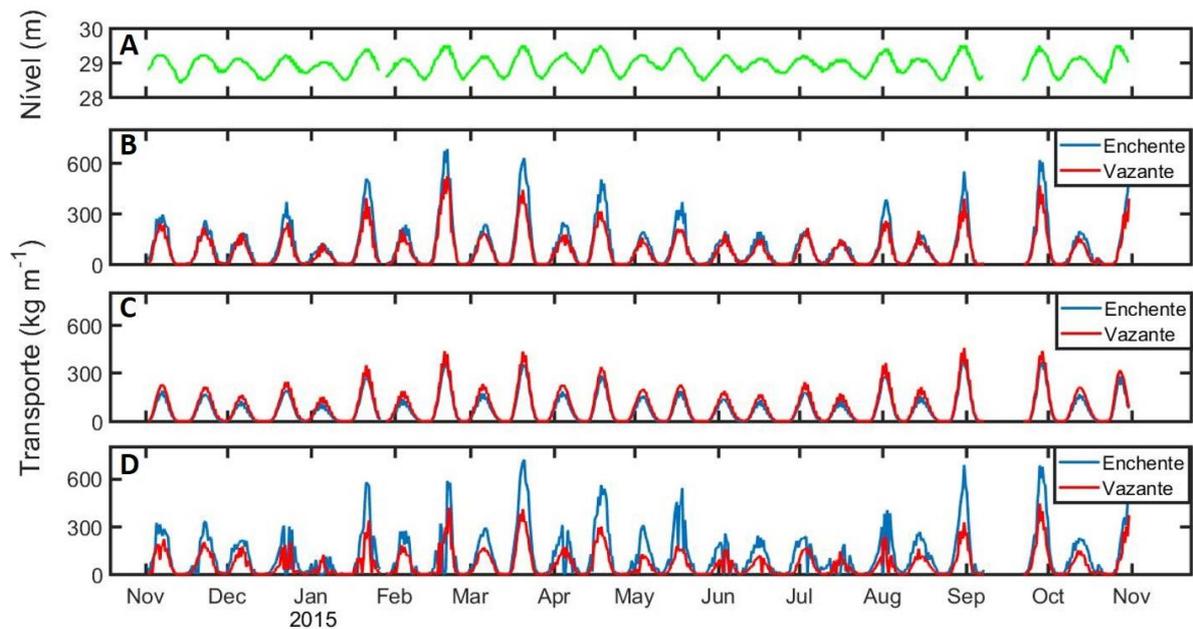


Figura 19: (A) *Série do nível máximo da maré a cada ciclo. Valores máximos indicando momentos de sizígia e os mínimos momentos de quadratura.* (B) *Transporte de sedimento por ação das correntes medidas, a cada ciclo de maré.* (C) *Transporte de sedimento por correntes de maré, para enchente e vazante, a cada ciclo de maré.* (D) *Transporte de sedimento por ação conjunta de onda e correntes medidas, para enchente e vazante, a cada ciclo de maré.*

A Figura 20 apresenta a variabilidade temporal do transporte resultante de sedimento de fundo para cada ciclo de maré, para as 3 condições propostas. O transporte por ação conjunta de ondas e correntes medidas foi o maior das 3 condições, atingindo uma média de 55 kg/m para dentro da baía. O transporte calculado para correntes medidas e correntes de maré foram de 30 kg/m e -19 kg/m, respectivamente, ou seja, apenas o transporte resultante relacionado às marés previstas apontam o deslocamento de sedimentos em direção ao mar.

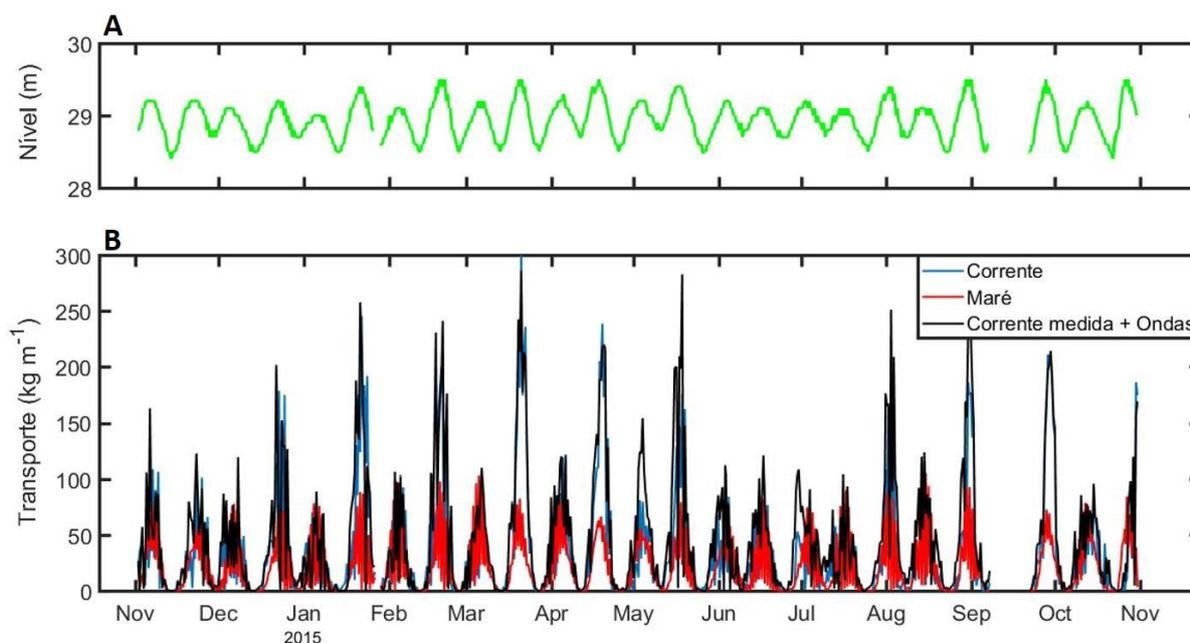


Figura 20: (A) Série do nível máximo da maré a cada ciclo. Valores máximos indicando momentos de sizígia e os mínimos momentos de quadratura. (B) Transporte líquido de sedimentos em cada ciclo de maré para as condições i) corrente medida, ii) correntes de maré previstas e, iii) corrente medida + ondas

5.7 Modelo Hidrodinâmico

A Figura 22 mostra a magnitude média do campo de velocidade média vertical modelada no canal de Salvador. Observa-se que as velocidades são mais intensas na metade leste do canal, e que a magnitude média no ponto de fundeio corresponde a 0,5 m/s. A magnitude média de toda a área foi de 0,3 m/s. A velocidade máxima do modelo para uma maré de vazante foi de 1,39 m/s e de 1,29 m/s para uma maré de enchente (Figura 21).

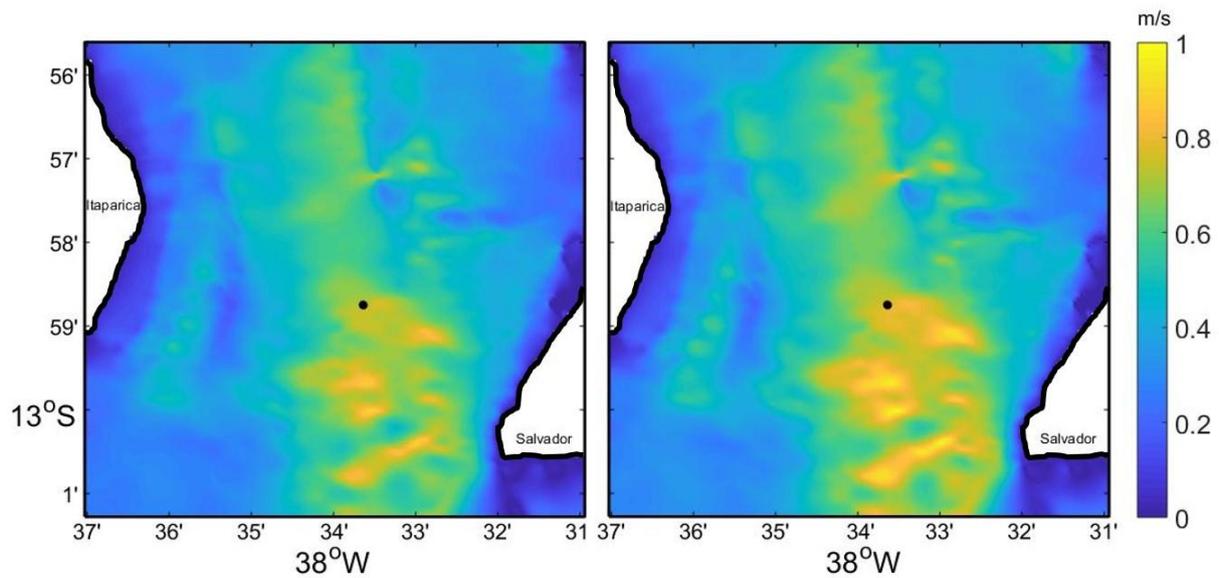


Figura 21: Campo de velocidades máximas das correntes de maré no canal de Salvador, entre meses de janeiro e junho de 2015. Ponto preto marcando a posição onde foi feito o fundeio do ADCP. Média das velocidades máximas de enchente à esquerda e média das velocidades máximas de vazante à direita.

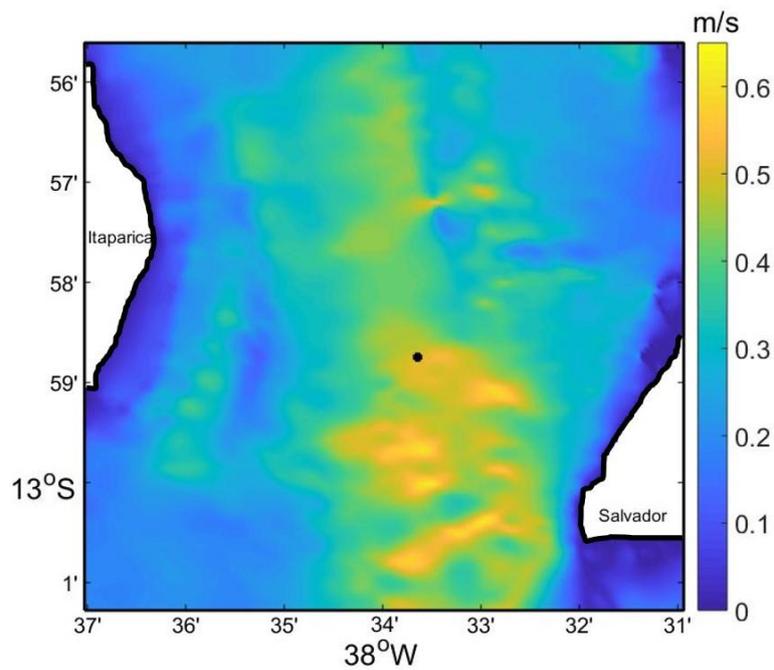


Figura 22: Campo de magnitude média das correntes de maré no canal de Salvador, entre meses de janeiro e junho de 2015. Ponto preto marcando a posição onde foi feito o fundeio do ADCP.

Na Figura 23, foi representado o logaritmo natural das razões entre velocidades máximas de enchente e vazante, de forma que valores positivos indicam fluxos de enchente mais intensos e valores negativos indicam fluxos de vazante mais intensos. Valores de 0,2 (-0,2) na Figura 23

indicam que os fluxos de enchente (vazante) são aproximadamente 1,2 vezes mais intensos do que o fluxo de vazante (enchente). A Figura 23 mostra que todo o canal de Salvador tem correntes máximas de vazante que chegam a ser, aproximadamente 2 vezes mais velozes do que as velocidades máximas de enchente. Na média, as velocidades máximas de vazante são 1,2 vezes mais intensas do que as máximas de enchente. Observa-se que o valor de \ln calculado para o local de fundeio (= -0,06) indica uma condição de domínio de maré vazante um pouco menos intensa do que a média da região central do canal (= -0,09 – margens excluídas).

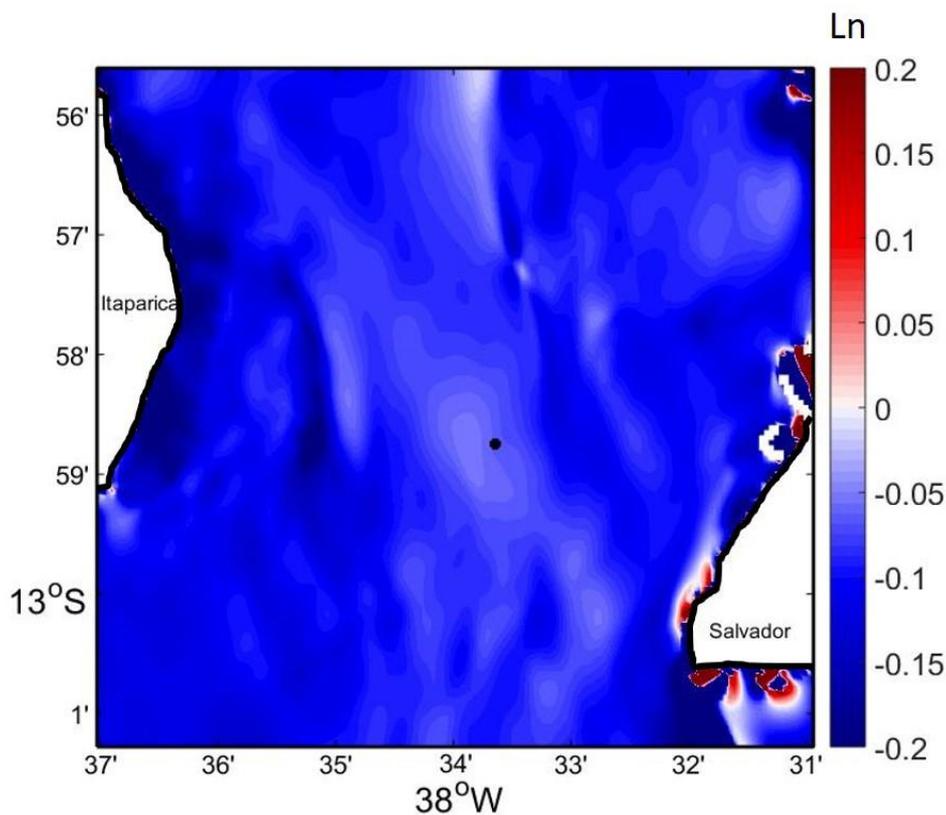


Figura 23: O mapa mostra o campo médio das razões entre as velocidades máximas de enchente e vazante em cada maré entre os meses de janeiro e junho de 2015. Ponto preto marcando a posição onde feito o fundeio do ADCP.

6 DISCUSSÃO

As velocidades máximas da componente V do vetor velocidade foram observadas nas marés de sizígia e as mínimas nas marés de quadratura (Figura 11). A magnitude do fluxo médio de sizígia chega a ser uma ordem de magnitude maior do que a magnitude média de quadratura. Rocha (2015), analisando apenas 2 meses de dados em situação astronômica próxima ao solstício (novembro e dezembro de 2014), observou que próximo ao fundo as correntes máximas de enchente foram 8% maiores do que as máximas de vazante, assim como na superfície as correntes de vazante foram 8% superiores as de enchente. A série de dados de 1 ano analisada neste trabalho mostra que na superfície as correntes de vazante foram 13% maiores do que as correntes de enchente, e no fundo as correntes de enchente foram 4% maiores do que as correntes de vazante. Cirano e Lessa (2007) e Rocha (2007) encontraram velocidades máximas da corrente de vazante igual a 1,14 m/s e 1,3 m/s próximo à superfície, sendo que as séries de dados analisada não coincidiriam com marés equinociais. A velocidade máxima da corrente de vazante encontrada neste trabalho foi de 1,7 m/s em 20/03/2015, coincidente com uma maré equinocial. O fato da velocidade ter sido medida a uma profundidade de 21 m, indica que fluxos ainda mais intensos devem ocorrer na superfície.

O domínio das correntes de maré enchente junto ao fundo é menos observado em marés de sizígia, quando as velocidades de maré vazante são bastante elevadas. De acordo com Friedrichs e Aubrey (1988) esse domínio de vazante pode ser explicado pela troca ineficiente de água entre as extensas regiões intermareais, onde ocorre um grande armazenamento de água durante a preamar de sizígia, e o canal principal, relativamente profundo. Com isso ocorrem atrasos na preamar no interior do estuário e dessa forma, uma maior aceleração nos fluxos de vazante.

A diminuição do domínio das marés de vazante em quadratura é simultânea à maior estratificação do fluxo médio na coluna d'água, devido à menor turbulência da coluna d'água promovida pela maré (Figura 16B). Nesta situação as velocidades máximas de enchente foram superiores às máximas velocidades de vazante em 72% da coluna d'água, sendo que houve algumas marés de quadraturas onde as velocidades máximas de enchente foram maiores que as de vazante até mesmo na superfície. As velocidades máximas de enchente nesses momentos chegaram a ser 1,6 vezes superiores às máximas de vazante (Figura 13B). Próximo ao fundo, a duração da maré enchente chegou a ser superior à duração da maré vazante em até 3 horas

(Figura 13C). Essa maior diferença na duração entre enchente e vazante é uma consequência da ativação e fortalecimento da circulação gravitacional em momentos de menor mistura vertical na quadratura (RIBEIRO et al. 2004). A presença e a duração da circulação gravitacional, de natureza baroclínica, tem assim um importante controle no tempo de residência e no transporte de sedimentos arenosos, como carga de fundo, para dentro do estuário (BROWN et al. 2015, RIBEIRO et al. 2004). A circulação gravitacional, de natureza baroclínica, tem assim a capacidade de favorecer o transporte de sedimentos arenosos, como carga de fundo, para dentro do estuário. BROWN et al. 2015 mostraram que as partículas podem ter um grande deslocamento durante uma única maré. No entanto, o transporte residual é causado pela assimetria do fluxo de maré e circulação gravitacional, mostrando inclusive que a circulação gravitacional é importante mesmo em regiões de macromaré, sendo responsável por limitar a perda de sedimento do estuário, podendo até promover transporte para dentro do estuário. O transporte de sedimentos na maré enchente na BTS foi em média 28% maior que o de vazante. O transporte líquido total, para os 12 meses observados, para a condição de correntes medidas, foi de 20×10^3 kg de sedimentos transportados por metro de largura no leito, para dentro da baía.

O transporte de sedimento calculado por ação exclusiva das correntes de maré teve direção invertida, isto é, de vazante, com valor de transporte médio 22% superior ao transporte médio de enchente. O transporte líquido total por ação somente das correntes de maré foi de 13×10^3 kg de sedimentos transportados para fora da baía por metro de largura do leito. O escoamento em frequências não-mareais é influenciado por variações espaciais da batimetria e rugosidade do leito, os quais geram resíduos no fluxo médio de maré apenas devido às distribuições assimétricas de velocidade entre vazante e enchente. Essa circulação residual é importante no transporte resultante de sedimentos em estuários com ausência de circulação gravitacional, como é o caso dos estuários modelo nos estudos de Fry & Aubrey (1990).

A altura média quadrática das ondas encontrada para o local foi de 0,21 m no verão e 0,42 m no inverno. HYDROS-CRA (2004), com base em dados do modelo de geração de ondas por campos de ventos, encontrou uma altura média quadrática no canal de Salvador de 0,35 m no verão e 0,75 m no inverno. Essa diferença indica que o modelo usado para a geração de ondas superestimou as alturas de ondas ou foi aplicado para um período quando os ventos estiveram muito mais intensos.

A tensão de cisalhamento crítica necessária para mobilizar sedimentos arenosos com 0,25 mm de tamanho, baseado na função de Shields, é de 0,2 N/m². Considerando que a tensão de cisalhamento média calculada foi de 0,28 N/m², e que a tensão crítica de cisalhamento é igual a 0,19 N/m², o fundo foi mobilizado pelas ondas durante 44% do tempo de monitoramento. Ainda com base na função de Shields, a tensão calculada na região teria a capacidade de movimentar sedimentos com diâmetros maiores que 2mm, principalmente entre os meses de maio e julho.

O transporte por ação conjunta de ondas e correntes apresentou o transporte total líquido de sedimentos mais elevados das três condições propostas, com 37×10^3 kg transportados por metro de largura do canal, para dentro da baía. O transporte médio de enchente para essa condição chegou a ser 47% mais elevado do que o transporte médio de vazante. As presenças de ondas juntamente com as correntes influenciam significativamente no fluxo de sedimentos por arrasto, aumentando o transporte líquido de sedimentos, principalmente em situações de tempestades, como indicado por VAN DER MOLEN (2002), que calculou a contribuição a longo prazo de ventos e ondas no transporte de sedimentos em uma plataforma rasa. O autor mostrou que em áreas onde o transporte induzido pela maré é pequeno, a ação conjunta de ondas e correntes atuando simultaneamente facilitam o transporte de areia média. Dessa forma as ondas e correntes de vento, auxiliadas por correntes de maré, determinam o transporte de sedimentos em *Dogger Bank*.

Os resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico mostram que o canal de Salvador é todo dominado por uma assimetria de vazante com velocidades máximas 2 vezes mais intensas do que as de enchente. Esse resultado está de acordo com o trabalho feito por Cirano e Lessa (2007), que encontraram as máximas velocidades no canal de Salvador em uma maré vazante. A assimetria de vazante mostrada pelo modelo também está de acordo com a posição relativa a BTS no diagrama desenvolvido por Fry e Aubrey (1990) (Figura 1). Levando em consideração que a profundidade de estabelecimento do cisalhamento do fluxo médio varia entre 13m e 10m, pode ser sugerido que regiões do canal de Salvador com profundidades superiores a 13m apresentem um transporte residual de sedimentos arenosos direcionados para dentro da baía.

7 CONCLUSÃO

As assimetrias de elevação e de corrente de maré estão de acordo com os modelos morfodinâmicos existentes, com tempos de maré vazante inferiores aos de enchente e maiores velocidades de maré vazante, principalmente próximo à superfície e em marés de sizígia.

A circulação gravitacional é estabelecida no canal de entrada da BTS durante todo o ano, porém modulada pelo ciclo sizígia/quadratura, com profundidade do cisalhamento variando entre 13m e 10m. A magnitude média em toda a coluna d'água foi de 0,02 m/s, no entanto os fluxos de enchente próximos ao fundo foram em média 28% mais intensos do que os de vazante próximo a superfície. A duração das marés de enchente próximo ao fundo foi maior do que a de vazante ao longo de toda a série temporal; da mesma forma a vazante foi mais duradoura que a enchente na superfície.

As tensões de cisalhamento junto ao fundo geradas pelas ondas foram superiores a tensão crítica em 44% do período monitorado. O transporte de sedimento por arrasto foi significativamente mais intenso nas sizígias, quando a velocidade do fluxo é maior. A ação conjunta das ondas superficiais com a corrente medida aumentou o transporte líquido em 15%, em relação ao transporte por ação apenas das correntes medidas, e manteve a direção do transporte, que se deu para dentro da Baía.

Os resultados mostram que a circulação gravitacional tem um importante papel no transporte de sedimento no fundo do canal, invertendo a direção do fluxo estabelecido pela maré astronômica. Apesar de todo o canal apresentar uma assimetria de vazante (Figura 23), é provável que a influência da circulação gravitacional ocorra em toda a área onde as cotas batimétricas sejam superiores a 13 m, formando assim uma região de importação de sedimentos arenosos no canal de Salvador. Dessa forma, trabalhos posteriores devem ser feitos no intuito de comprovar a existência de um fluxo estratificado em todo o canal e sua influência no transporte de sedimentos por arrasto.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROWN, J.M., AMOUDRY, L.O., SOUZA, A.J., REES, J., 2015. Fate and pathways of dredged estuarine sediment spoil in response to variable sediment size and baroclinic coastal circulation. *J. Environ. Manag.* 149, 209–221.

CIRANO, M.; LESSA, G. C., 2007, Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos. Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, pp. 363-387.

COPPETEC. PENO-18126, 2014, Análise e Levantamentos Hidro-sedimentológicos Visando ao Projeto da Ponte entre Salvador e a Ilha de Itaparica, BA. R3-Relatório de Inventário de Dados, Fundação COPPETEC, Rio de Janeiro, RJ.

CRA - Centro de Recursos Ambientais. 2000. Saneamento ambiental da Baía de Todos os Santos. Relatório Técnico, RT-257-03-GR-002-RF, 248 pp.

CRA 2004. Diagnóstico da concentração de metais pesados e hidrocarbonetos de petróleo nos sedimentos e biota da Baía de Todos os Santos. Consórcio BTS Hydros CH2MHILL. Governo do Estado da Bahia.

CUNHA-LIGNON, M., 2011, Dinâmica do manguezal no complexo estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape, Estado de São Paulo - Brasil. Tese (Mestrado em oceanografia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, pp. 222.

DOMINGUEZ, J. M. L., BITTENCOURT, A. C. S. P., 2009, *Geologia.em: Vanessa Hatje, Jailson B. de Andrade, Baía de Todos os Santos: Aspectos Oceanográficos*, Ed. Salvador: EDUFBA, pp. 25-66.

FRIEDRICHS, C. T. & AUBREY, D. G., 1988, Nonlinear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 21,521-545.

FRY, V. A., AUBREY, D. G., 1990, Tidal velocity asymmetries and bedload transport in shallow embayments, *Journal of Estuarine, Coastal and Shelf Science* 30, 453-473.

LESSA, G.C., BITTENCOURT, A.C.S.P., BRICHTA, A., DOMINGUEZ, J.M.L., 2000. A Reevaluation of the Late Quaternary Sedimentation in Todos os Santos Bay (BA), Brazil. *An. Acad. Bras. Cienc.* 72, 1–18.

LESSA G. C., CIRANO M., TANAJURA C. A. S., SILVA R. R., 2009, *Oceanografia Física*. In: Vanessa Hatje; Jailson B. de Andrade. (Org). *Baía de Todos os Santos: Aspectos Oceanográficos*, Ed. Salvador: EDUFBA, pp. 68-119.

MELLO, A. C. C., DOMINGUEZ, J. M. L., SOUZA, L. A. P., 2016, *The Santo Antonio Bank: A High -Resolution Seismic Study of a Defflected Ebb-tidal Delta located at the entrance of a large tropical bay, eastern Brazil*, Tese (Mestrado em Geologia), Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA.

PEREIRA, M. G. e LESSA, G. C. (2009) Varying patterns of water circulation in Canal de Cotegipe, Baía de Todos os Santos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 27.

PEREIRA, M. H. C., 2013, *Oscilações do nível d'água no porto de salvador e sua relação com duas estações interiorizadas na Baía de Todos os Santos – BA*, Monografia (Graduação em Oceanografia), Instituto de Geociências. Universidade Federal da Bahia.

PIANCA, C., MAZZINI, P.L., SIEGLE, E., 2010, Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis, *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(1): 53-70.

RIBEIRO, C. H. A., WANIEK, J. J. & SHARPLES, J., 2004, Observations of the spring-neap modulation of the gravitational circulation in a partiallymixed estuary, *Ocean Dynamics*, 54: 299-306.

ROCHA, M. R., 2015, *Análise do campo de correntes e suas forçantes no canal principal da baía de todos os santos, bahia*, Monografia (Graduação em Oceanografia), Instituto de Geociências. Universidade Federal da Bahia.

SOULSBY, R. L., and DAMGAARD, J. S., 2005, Bedload sediment transport in coastal waters, *Coastal Engineering* 52, pp. 673–689.

THOMAS, C.G., SPEARMAN, J.R., TURNBALL, M.J., 2001. Historical morphological change in the Mersey Estuary. *Cont. Shelf Res.* 22, 1775 - 1794.

UMEYAMA, M., 2005, Reynolds Stresses and Velocity Distributions in a Wave-Current Coexisting Environment, *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 131(5): 203-212.

VAN DER MOLEN, J., 2002, The influence of tides, wind and waves on the net sand transport in the north sea, *Cont. Shelf Res.*, 22: 2739-2762.

VAN RIJN, L. C., 2013, Simple general formulae for sand transport in rivers, estuaries and coastal waters, retrieved from www.leovanrijn-sediment.com.

XAVIER, A. G., 2002, Análise hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, pp. 222.