



Variabilidade da assimetria de maré no estuário da Beira, Moçambique.

Teodósio N. M. Nzualo^{a*}; Marcos N. Gallo^a; Susana B. Vinzon^a

^aÁrea de Engenharia Oceânica e Oceanográfica, Programa de Engenharia Oceânica/ COPPE,
Universidade Federal do Rio de Janeiro, CT 1100 Cx Po 68508, 21945-970,
Rio de Janeiro, Brasil.

Palavra chave: maré, assimetria de maré, estuário da Beira.

Resumo

O estuário da Beira representa um dos mais importantes sistemas estuarinos de Moçambique, devido à existência de uma grande e invejável biodiversidade marinha e um dos melhores centros de pesca do país, bem como pelo fato do mesmo albergar um porto de grandes dimensões que recebe navios de tonelage 50.000 DWT¹ ou maiores, por força de dragagens periódicas que historicamente são reportados por NEDECO, 1979, 1981, 1982; JICA, 1998 e CONSULTTEC, 2007.

Existe uma forte preocupação com relação à segurança da navegação sobre o estuário, dado que a sua topografia de fundo é caracterizada por uma ativa dinâmica sedimentar associada a uma poderosa energia de marés que cria zonas de intensa sedimentação e erosão. Deste modo, compreender a hidrodinâmica e a dinâmica de sedimentos sobre o estuário é uma questão sensível, tanto por razões econômicas quanto ambientais.

O objetivo principal deste trabalho é aplicar a modelagem hidrodinâmica como ferramenta para compreender a ocorrência da alternância da assimetria de maré entre a sizígia e a quadratura dos ciclos de maré que são observados nos dados de maré medidos pelo marégrafo do INAHINA no porto e sobre o estuário, medidos em 4 pontos em Maio de 2009 e em cenário de maré de quadratura.

Os dados medidos mostram uma assimetria positiva ou *dominada por enchente* na sizígia e negativa, *dominada por vazante* na quadratura. Experimentos numéricos 2DH realizados com o modelo hidrodinâmico Delft3D reproduziram padrões semelhantes da variabilidade ocorrência da assimetria encontrada nos dados medidos, onde, é positiva na sizígia e negativa na quadratura para os períodos chuvoso e seco.

¹ DWT – É a sigla em inglês de “Deadweight tonnage” ou Tonelage de arqueação bruta.

* autor: Tel.: +55-21-25628811; +55-21-69269123
e-mail: nzualo@yahoo.com.br



1. Introdução

O estudo da assimetria de maré em rios e estuários é bem estabelecida desde os trabalhos de Dronkers, 1964; Postma, 1967; Boothroyd & Hubbard, 1975; Dronkers, 1986; Friedrichs, 1988; Aubrey and Friedrichs, 1988; Boon, 1988; Wang et al., 1995; Wang et al., 1995; Van de Kreeke and Robaczewska, 1993; Van de Kreeke, 1997; Lanzoni and Seminara, 2002; Toubanc et al., 2012 e estudos com foco em regiões offshore, Pingree and Maddock, 1978; Pingree and Griffiths, 1979; Van der Molen, 2000.

A contribuição da assimetria da maré no transporte e acumulação de sedimentos tem sido estudada por várias décadas nos estuários da costa atlântica dos Estados Unidos e no golfo do México por Friedrichs & Aubrey (1988) e em grandes estuários na Europa como o Severn, UK; Seine, França e na Ásia o Yangtze, China (Toubanc et al., 2012). Entretanto, estudos sobre a contribuição da assimetria de maré no transporte de sedimentos no estuário da Beira é inexistente.

A dinâmica de sedimento sobre o estuário é grande e com mudanças morfodinâmicas assinaláveis entre os anos 1930 a 1980 na região oeste do estuário e sobre a boca do rio Buzi (NEDECO, 1982). O mesmo estudo nos apresenta profundidades de 4 m abaixo do Datum em 1930 que reduziram para 2, 7 abaixo do Datum em 1981 nos canais naturais a oeste do estuário e próximo ao rio Buzi. As mínimas profundidades encontradas em 1977 foram de 1,5 m abaixo do Datum que se deterioraram para 1 m acima do Datum.

Comparações da batimetria do estuário de 1986 com as batimetrias localizadas realizadas pela companhia de consultoria JICA (1998) e INAHINA (2009) sobre o canal de acesso portuário mostram uma deriva do canal para oeste (Nzualo, 2010). Deste modo, a compreensão da hidrodinâmica e a dinâmica de sedimentos no estuário da Beira é uma questão sensível, tanto por razões econômicas e ambientais, dado este o mesmo alberga um porto de grandes dimensões que recebeu navios de 50.000 DWT ou maiores, por força de dragagens periódicas historicamente reportadas por NEDECO, 1979, 1981, 1982; JICA, 1998 e CONSULTEC, 2007.

A morfologia estuarina é largamente determinada pelo padrão de transporte residual de sedimentos. O transporte residual de sedimentos depende da diferença de magnitude e duração entre as correntes de vazante e enchente. Tais diferenças ou “*assimetria de maré*” são produzidas pela distorção da propagação da onda da maré na região costeira ao penetrar sobre baías e estuários.

A assimetria do nível de maré se desenvolve no tempo na medida em que esta entra nas regiões rasas e onde ocorre à interação não linear da maré com fundo e ou com a geometria dos canais, resultando em assimetrias no campo de velocidades. A distorção não linear das marés é uma composição de dois efeitos principais:

(1) a interação da fricção entre a maré e o fundo de canais (refletida pela razão entre a amplitude da maré e profundidade do canal, expressa por a/h) provocando enchentes curtas e facilitando assimetrias positivas;

(2) nas regiões de armazenamento entre-marés² (expressa pela razão V_s/V_c = volume de armazenamento entre-marés volume de canais ao nível médio do mar) e durante a maré alta, a propagação da maré é lenta devido às baixas velocidades produzidas nas extensas planícies em função do atrito. Enquanto que na maré baixa as planícies encontram-se secas, possibilitando uma propagação mais rápida, e consequentemente, num período de vazante mais curto que produzem assimetrias negativas.

As distorções da maré em estuários podem ocasionar assimetrias positivas ou negativas. Estuários com *assimetria positiva* ou *dominados por enchente* são caracterizados por longos períodos de vazante e por fortes correntes de enchente, enquanto, que de *assimetria negativa* ou *estuários dominados por vazante* possuem longos períodos de enchente e fortes correntes de vazante.

O artigo que se apresenta, estuda o comportamento da assimetria da maré no estuário da Beira como um fator relevante para entender a dinâmica de sedimentos neste corpo de água. Dados de maré medidos no porto da

² entre marés – Tradução do inglês *intertidal*.



Beira mostram a ocorrência de uma variabilidade da assimetria nos níveis entre a sizígia e quadratura, sendo positiva na sizígia e negativa na quadratura.

O estudo do comportamento e da propagação da maré no estuário foi realizado com recurso a modelagens hidrodinâmicas 2DH com o modelo Delft3D para os períodos chuvoso (*verão*) e seco (*inverno*), que reproduziram padrões semelhantes da variabilidade ocorrência da assimetria encontrada nos dados medidos.

O estuário da Beira é classificado segundo Dyer (1997) como de macro-maré, com uma variação de maré entre 1.4 e 6.5 m. As principais constantes harmônicas do estuário são M_2 e S_2 , com amplitudes de aproximadamente 180 e 107 cm e maré tipicamente semi-diurna (Pugh, 1987), e com um fator de forma igual a 0.03. As constantes diurnas significativas são a O_1 , e K_1 com amplitudes da ordem de 5 e 3 cm, respectivamente e a constante de águas rasas M_4 de 10 cm.

O modelo hidrodinâmico foi forçado por constantes do modelo global FES2004 com 8 ou 9 constantes, e onde a diferença foi a introdução da M_4 no segundo caso (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_4).

Os resultados do modelo podem ajudar a dar um prognóstico da dinâmica de sedimentos no estuário. Assimetria de maré tem efeitos importantes tanto sobre a evolução geológica de estuários rasos bem como da navegabilidade dos canais estuarinos. Um estuário dominado por correntes de enchente pode ser incapaz de remover sedimentos que entram em um dado sistema estuarino. Como resultado, o estuário pode gradualmente absorver sedimento com conseqüente redução do prisma de maré e desenvolver bancos de areia. Por outro lado, um estuário com maior vazante (dominado por vazante) do que as correntes de enchente pode representar uma configuração mais estável.

Teoriza-se que sistemas estuarinos podem se desenvolver de um padrão de transporte dominado por enchente no seu estagio inicial para o dominado por vazante à medida que este estoca. Tal desenvolvimento implica numa retroalimentação entre a geometria do estuário e a forçante de maré (Byrne & Boon, 1976 *in* Speer, 1978).

2. Área de estudo

O estuário da Beira (vide Figura 1) se localiza na região central de Moçambique e na parte sul da região designada por Banco de Sofala. Esta região compreende a área metropolitana da Beira na província de Sofala, na costa oriental da África e sobre a margem esquerda do rio Pungué na sua saída para o Oceano Índico. A cidade da Beira abrange a região oceânica compreendida entre os paralelos 19° 49' e 19° 55' S, e entre os meridianos 34° 45' e 34° 55' E. A orientação geral da linha de costa é NE-SW (Roteiro da Costa da República Popular de Moçambique, 1986).

Quanto à configuração, o estuário é classificado em forma de funil com a razão entre sua largura e profundidade decrescendo em direção a montante a uma taxa exponencial. Ocorrem três grandes bancos lineares de areia (*Bancos Macuti, Rambler e Pelicanos*) associados ao estuário de macro-maré que possuem uma convergência em direção a montante do rio Pungué. Isso cria uma amplitude de maré crescente, enquanto que o atrito no leito causa uma defasagem na propagação da maré no estuário. As correntes de maré crescem em direção à montante com considerável assimetria durante a propagação da maré.

Em locais onde em geral as áreas rasas são completamente submersas mesmo na baixamar, a maré de enchente se concentram no canal principal, mas nas áreas rasas as correntes de vazante excedem as de enchente. Assim, os canais tendem a ser dominados pela enchente enquanto as rasas pela vazante.

Estuários em forma de funil são formados quando o fornecimento de sedimentos pelo rio é insuficiente para manter a quantidade de sedimentos que é removida pelas ondas e correntes de maré. Os sedimentos em estuários em funil em contraposição aos deltas tem uma fonte marinha de sedimentos, desde que a maré enchente e ondas tragam os mesmos do mar aberto.



A Figura 1 do LANDSAT 5 das 7:00:54,54031 do dia 14 de Novembro de 1986 mostra bancos de areia expostos 35 minutos depois da meia maré vazante e na transição da quadratura para a sizígia.

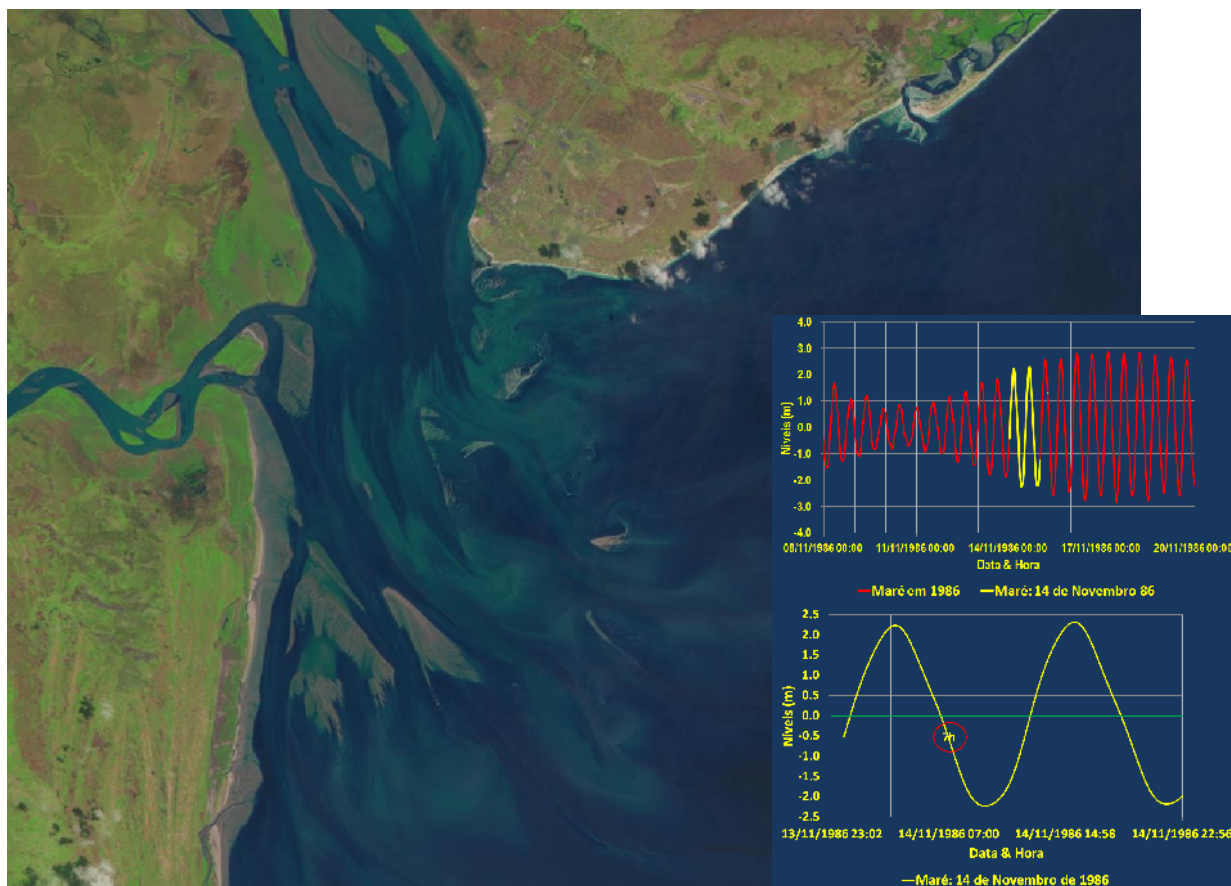


Figura 1 – Configuração do estuário da Beira na província de Sofala e na região centro de Moçambique. Imagem LANDSAT 5 de 14/11/1986 as 7:00:54,54031. **Fonte:** NASA Land Processes Distributed Active Archive Center User Services. *******www.landcover.org******* USGS Earth Resources Observation & Science (EROS).

3. Metodologia

O estudo do comportamento da propagação da maré no estuário da Beira se realizou em duas vertentes:

- Análise da variabilidade da assimetria observada nos dados de maré medidos no porto e;
- Realização de modelagens hidrodinâmicas para reproduzir a assimetria observada no porto e estudar o comportamento deste fenómeno no interior do estuário.

Os dados de maré disponíveis foram medidos de hora em hora durante o ano de 1999, sendo que os mesmos apresentavam lacunas em meses ou vários dias na serie anual. Os dados mais extensos e consistentes da serie anual são de três meses e do período entre 1/10/1999 a 31/12/1999, que foram usados para a previsão de maré para o mesmo período e a cada 5 minutos, com o intuito de melhorar as diferenças entre os tempos de enchente e vazante e deste modo, diminuir a incerteza devido à resolução temporal.



O modelo Delft3D foi forçado por vazões dos rios Pungué e Buzi (vide Figura 2) fornecidos pela DNA³.

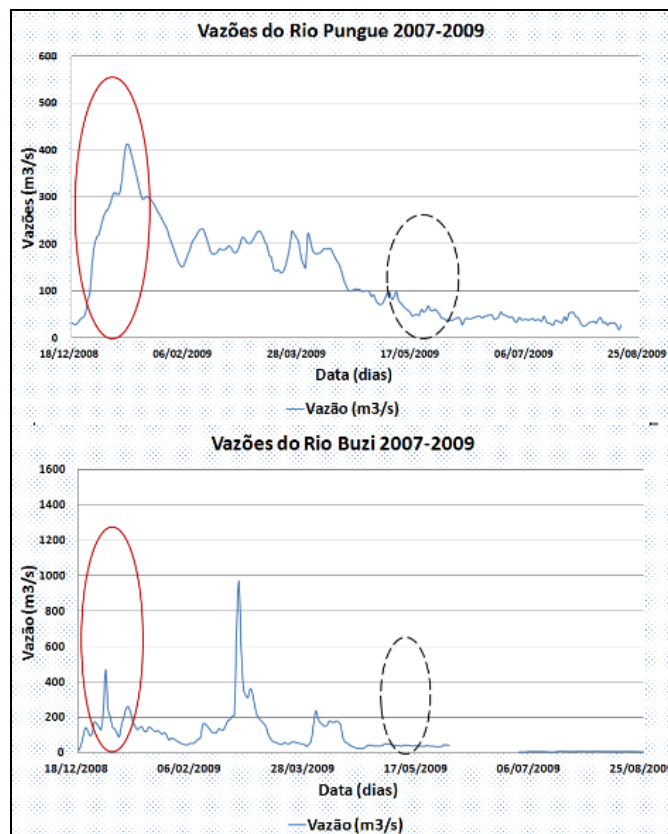


Figura 2 – Descarga fluvial dos rios Pungué e Buzi para os períodos chuvoso (*círculo cheio*) e seco (*círculo tracejado*) na modelagem hidrodinâmica.

A maré prescrita na fronteira aberta do modelo foi obtida da interpolação dos valores de maré disponíveis no modelo global FES2004, cuja discussão deste está disponível em Le Provost, 2001.

4. Modelo hidrodinâmico

Neste estudo, usou-se o módulo 2DH que desconsidera diferenças na densidade, restringindo o modelo a situações de grande mistura onde a coluna d'água é verticalmente homogênea.

As equações promediadas na vertical para a conservação de quantidade de movimento nas direções x e y são descritas no manual de fluxos do modelo Delft3D (Delft3D-Flow, 2010). Em seguida, realizou-se a calibração do modelo hidrodinâmico com dados de níveis medidos no porto través e de níveis e correntes realizados em 4 pontos do estuário numa campanha entre 15 a 24 de Maio de 2009, realizado com um AWAC de 600 kHz (Fernandes da Silva, 2011). Uma vez calibrado o modelo hidrodinâmico, realizaram-se diversas simulações para em seguida se compararem o padrão de assimetria observada no modelo com os observados nos dados observados no porto e nos pontos medidos.

³ DNA - Direção Nacional de Águas de Moçambique.



4.1. Malha e batimetria

O Delft3D é um sistema de diferenças finitas no qual os processos são simulados numa malha curvilínea ortogonal permitindo uma representação acurada e eficiente de domínios complexos. O nível d'água, a profundidade e as componentes da velocidade são definidas em locais distintos da célula computacional (grade intercalada – *staggered grid*). O esquema de discretização resultou numa malha de 13626 células de cálculo para uma área de 4213.72 km² (vide Figura 3). A região de maior refinamento da malha se localiza na boca do estuário com células de dimensões horizontais de $\Delta x = 140$ m e $\Delta y = 220$ m.

Os dados batimétricos (vide Figura 3) foram obtidos a partir da carta náutica editada e publicada em 1986 pelo Ministério da Defesa Nacional de Moçambique, no qual hoje está sobre a atribuição do Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação - INAHINA. A mesma é representada na escala 1: 25.000 e com o detalhe da região portuária na escala 1: 10.000. No entanto, estes dados batimétricos foram acoplados a um segundo conjunto de valores de isobadas de batimetrias de 20, 50 e 200 metros no fim da extensa plataforma do estuário.

Nas Cartas Náuticas editadas pelo INAHINA, as profundidades são representadas em metros e décimos de metro, tendo como origem vertical um plano de referência denominado Nível de Redução (NR) ou DATUM. O valor do nível médio da maré na Beira que é de 3.6 metros foi acrescentado aos dados batimétricos com referencia ao Datum e introduzidos no modelo Delft3D.

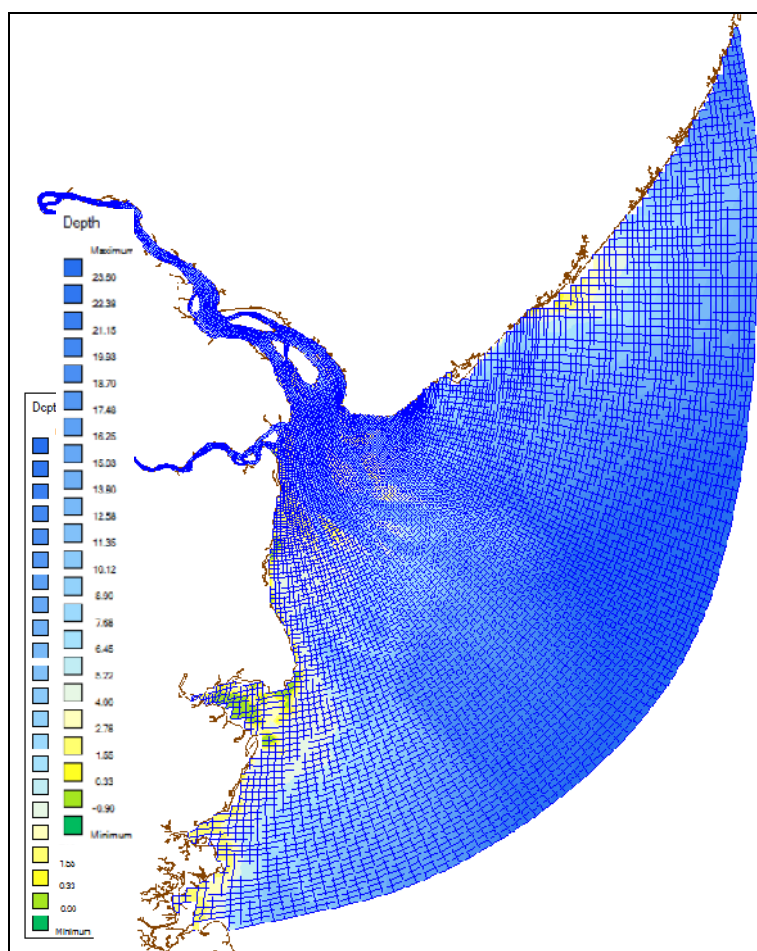


Figura 3 – Malha em diferenças finitas e batimetria utilizada na modelagem do estuário da Beira.



Os dados batimétricos do rio Pungué foram obtidos do estudo de Graas & Savenije (2008) e do rio Buzi, extraído do boletim hidrologico nacional Nº 48 da DNA de 23 de Janeiro de 2008.

4.2. Rugosidade

A rugosidade equivalente do fundo é um parâmetro importante da modelagem, dado que é responsável pelo cálculo das tensões de fundo e é o principal parâmetro ajustável responsável pela calibração das tensões turbulentas verticais do modelo.

As tensões geradas pelo atrito de fundo são conhecidas a partir da determinação do coeficiente de Chézy, que por sua vez dependem do valor da rugosidade equivalente (ϵ) do fundo. Como a rugosidade depende do tipo de material que compõe o leito do corpo d'água, torna-se fundamental o conhecimento da distribuição de sedimentos no fundo, a fim de prescrever amplitudes de rugosidade equivalente condizentes com a realidade. Neste projeto, estas informações foram obtidas através de um mapa faciológico fornecido pelos estudos realizados por NEDECO, 1982 e JICA, 1998.

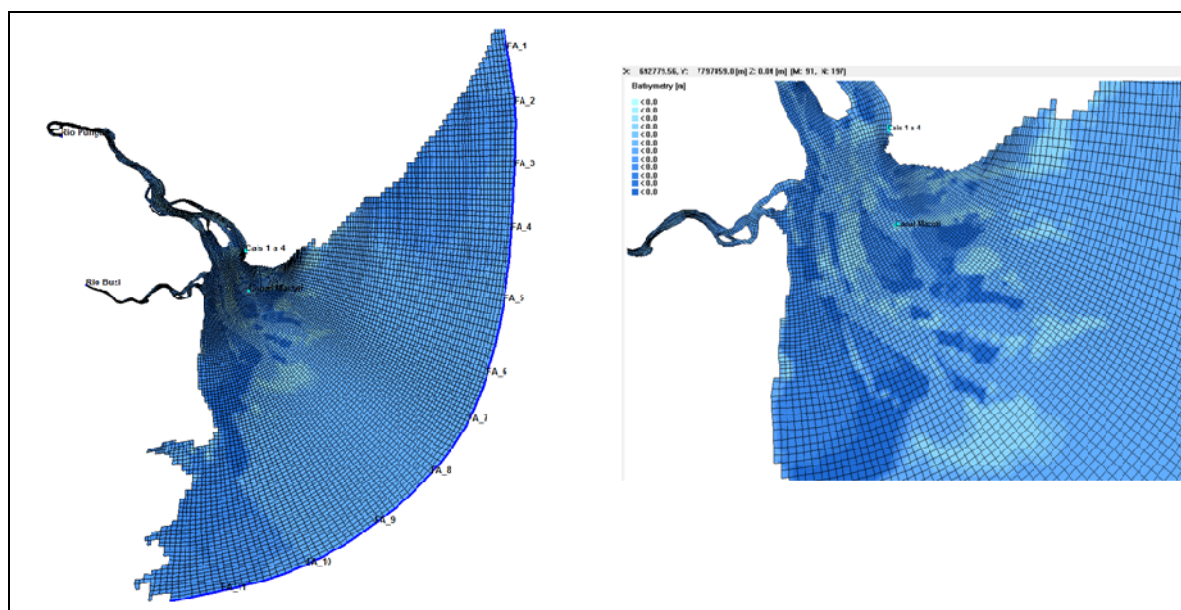


Figura 4 – Mapa da distribuição da rugosidade no estuário da Beira.

4.3. Procedimento para o cálculo das amplitudes corretas na fronteira aberta e calibração do modelo hidrodinâmico

Obtidas as amplitudes na fronteira aberta através do modelo global FES2004, houve a necessidade de se calibrar a maré no porto ao se detectarem amplitudes subestimadas e fase defasada no modelo em relação ao dado de maré medido.

A calibração foi conseguida (vide Figura 5) ao se amplificar cada constante harmônica mediante a soma dos valores das constantes inicialmente obtidas do FES2004 aos valores dos coeficientes calculados para cada



constante nos 11 pontos da fronteira aberta, e igualmente, se obteve uma nova fase em graus mediante somas dos coeficientes iniciais aos dos coeficientes correspondentes para cada constante da fronteira.

Tabela 1 – Comparação das principais constantes medidas no porto e obtida pelo modelo após calibração.

Constantes	Porto da Beira			
	Modelo		Dado	
	Amplitude (m)	Fase (graus)	Amplitude (m)	Fase (graus)
M2	1.72	126.6	1.76	124.3
S2	1.10	165.3	1.07	161.6
M4	0.14	212.0	0.10	216.0

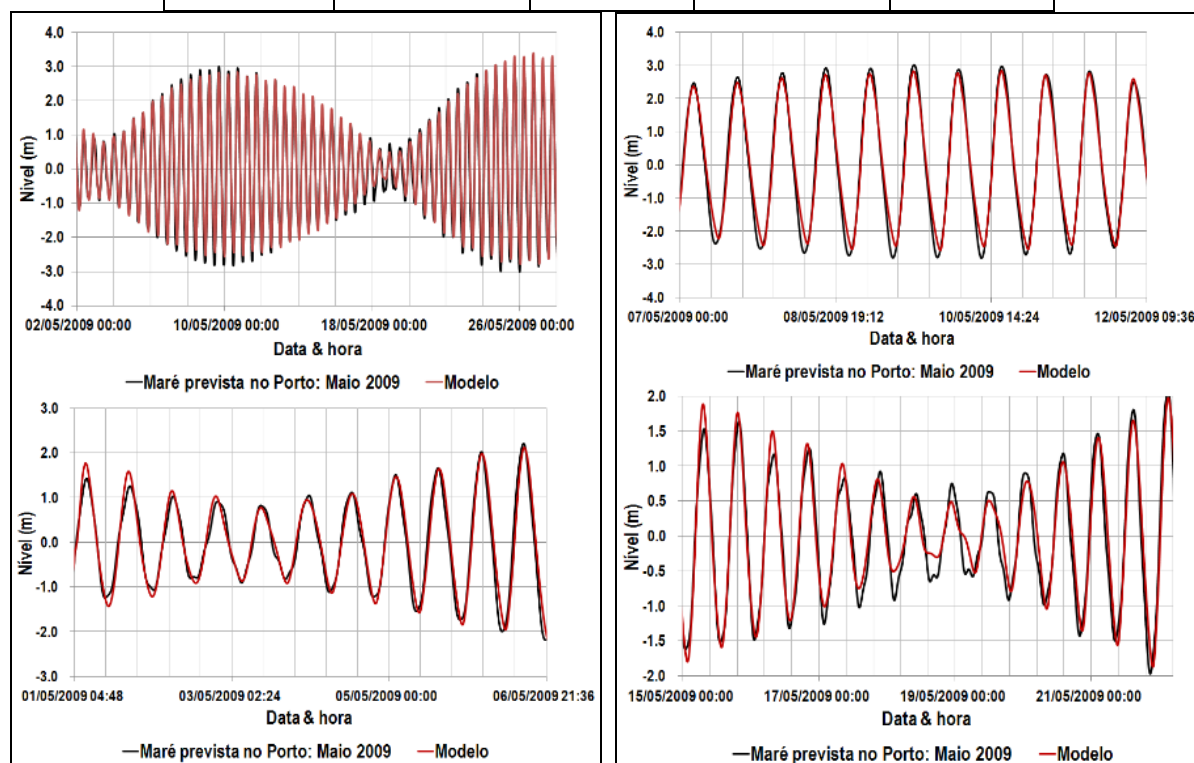


Figura 5 – Calibração da maré no Porto. Dado (linha em preto) e do modelo (linha em vermelho).

5. Resultados

Os dados consistentes de maré disponíveis para o estuário da Beira foram medidos a cada hora em 1999 no porto. Para a análise da assimetria de maré se construiu num único gráfico a oscilação de maré com os dados relativos à diferença entre os tempos de enchente e vazante relativos aos dados a cada hora e a cada 5 minutos com o intuito de melhorar as diferenças entre os tempos de enchente e vazante e diminuir a incerteza devido à resolução temporal. O resultado se configura num gráfico nos apresenta uma variabilidade de assimetria na sizígia e quadratura. A assimetria é positiva na sizígia e negativa durante as quadraturas (vide Figura 6).

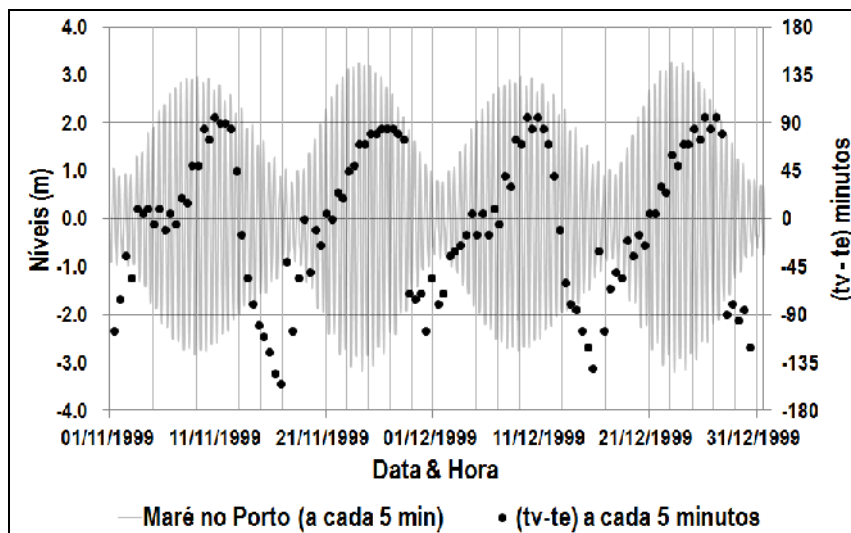


Figura 6 – Diferença nos tempos de enchente e vazante relativos aos dados previstos a cada 5 minutos (pontos pretos) no porto em 1999.

5.1. Resultados da simulação hidrodinâmica

O estudo do padrão da assimetria de maré no estuário da Beira foi realizado com recurso a simulações hidrodinâmicas para os períodos úmido e seco, que compreendem:

- I. Período úmido: 18/12/2008 a 28/01/2009
- II. Período seco: 01/05/2009 a 31/05/2009

Em seguida, se realizaram simulações hidrodinâmicas com a inclusão e ausência da vazão fluvial no modelo para entender sua influencia no comportamento da assimetria de maré.

Para os dois períodos, se prescreveram dois cenários de maré na fronteira aberta que são:

- a) Imposição de 8 constantes do FES2004 (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1).

Ao se prescreveram 8 constantes na fronteira aberta do modelo, ocorrem diferenças no comportamento da assimetria nos períodos úmido e seco. No úmido, a assimetria é positiva na sizígia e negativa na quadratura, sendo que no período seco ela é somente positiva. Nos dois casos, a assimetria positiva cresce à medida que aumentam as amplitudes da quadratura para a sizígia e decresce com a redução destas amplitudes da sizígia a quadratura (vide Figura 7a & Figura 7b).

A explicação para a ocorrência da variabilidade da assimetria encontrada no período úmido em relação ao seco se relaciona ao fato de a maré no primeiro caso possuir quadraturas inferiores ao segundo, e deste modo, permitir a alternância de assimetrias, ora com vazantes mais longas e correntes de enchente mais intensas quando a amplitude de maré na sizígia for maior a profundidade no nível médio, ou ainda, com vazantes mais intensas quando se inverte o cenário e este apresenta profundidades menores do que a amplitudes nos período de quadratura.



O raciocínio se baseia nas formulações de Speer & Aubrey (1985), que relacionam a amplitude da maré/profundidade média e onde a razão ($a/h > 0.3$) caracterizam sistemas do tipo enchente dominante. Valores onde a razão seja inferior a 0.2 caracterizam sistemas de vazante dominante.

- b) Imposição de 9 constantes do FES2004 (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 e a constante de águas rasas M_4).

Ao adicionar a constante de águas rasas M_4 na fronteira aberta do modelo, se observa de imediato a ocorrência da variabilidade da assimetria na fronteira que vai crescendo em direção ao porto. A assimetria é positiva na sizígia e negativa na quadratura nos períodos úmido e seco. Entretanto, a assimetria negativa é mais pronunciada quando se tem menores amplitudes de maré na quadratura que se verificam no período úmido (vide Figura 8a & Figura 8b).

Os resultados da maré para cada um dos cenários acima descritos são dispostos começando pela fronteira aberta e em seguida do porto da Beira, e para o período úmido e depois o seco.



Modelagem hidrodinâmica com imposição de 8 constantes do FES2004 (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1) na fronteira aberta

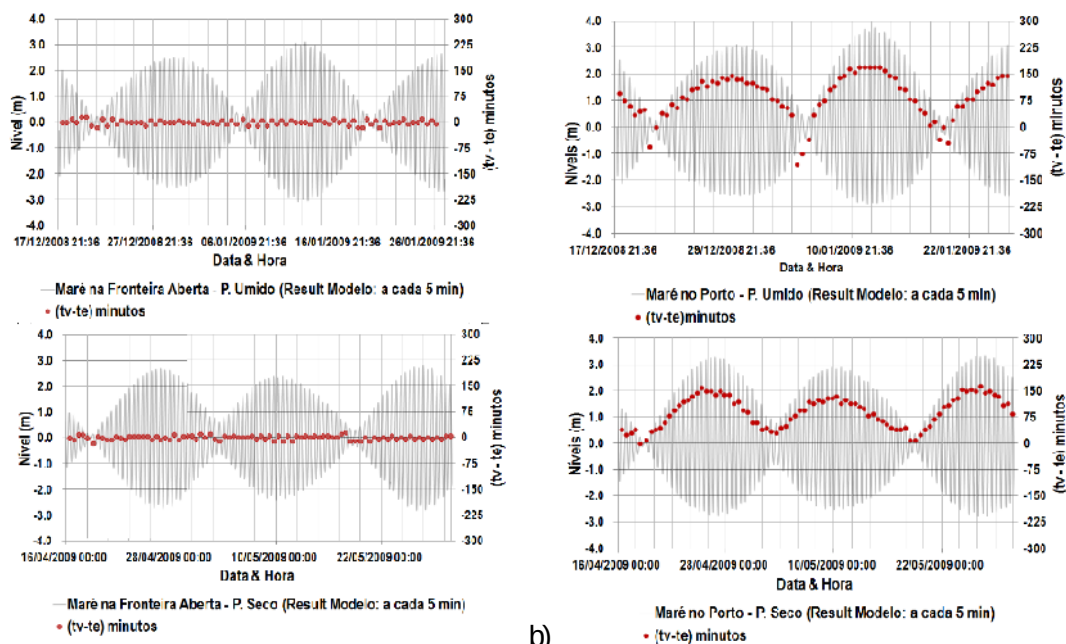


Figura 7a) – Condição de contorno na fronteira impondo 8 constantes harmônicas do FES2004 (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1) e diferenças de tempos de vazante e enchente calculados a partir desta condições para os períodos úmido e seco;
Figura 7b) – Resultados da assimetria da maré no porto obtidos pela modelagem para os períodos úmido e seco.

Modelagem hidrodinâmica com imposição de 9 constantes do FES2004 (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_4) na fronteira aberta.

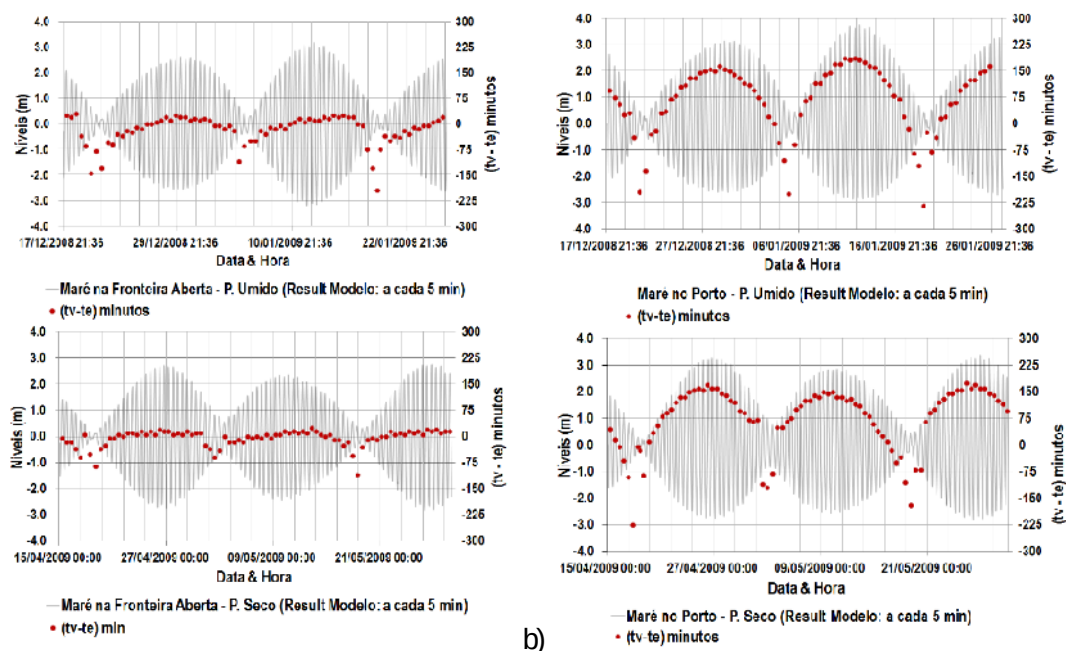




Figura 8a) – Condição de contorno na fronteira impondo 9 constantes harmônicas do FES2004 (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_4) e diferenças de tempos de vazante e enchente calculados a partir desta condição de contorno para os períodos úmido e seco. **Figura 8b)** – Resultados da assimetria da maré no porto obtidos pela modelagem para os períodos úmido e seco.

A Figura 7 mostra o mesmo padrão da variabilidade da assimetria de maré obtida nas discussões acima, sendo que se compara o desvio assimetria de maré no porto no modelo em relação ao dado medido. Uma vez que o período de modelagem no período úmido foi de 18/12/2008 a 28/01/2009 e os dados medidos são de 1999, se realizou a devida previsão a cada 5 minutos e se calcularam as diferenças entre os tempos de vazante e enchente que são mostrados na figura.

O modelo mostra uma modulação de variação de assimetria de maré bem comportada no modelo em relação ao dado e com uma assimetria positiva na ordem de 75 minutos maior que o dado medido na sizígia. A assimetria negativa é igualmente maior no modelo, mas com uma diferença muito pequena e da ordem de 5 a 20 minutos. Importa discutir que as diferenças observadas nas assimetrias podem advir do fato de o modelo possuir batimetrias bastante defasadas comparativamente as batimetrias do período da medição da maré.

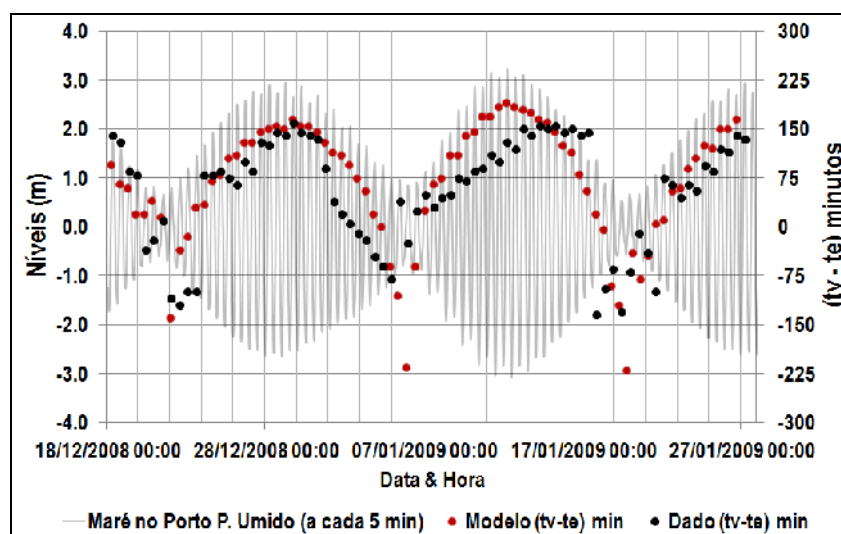


Figura 7 – Resultados da assimetria da maré no porto obtidos pela modelagem com o Delft3D (*pontos vermelhos*) e pelos dados medidos (*pontos pretos*).

Simulações hidrodinâmicas na ausência de vazões fluviais foram realizadas com o intuito de comparar a assimetria decorrente deste cenário com as que possuem vazões. A diferença verificada foi à ocorrência de assimetrias negativas maiores em 5 a 10 minutos com inclusão de vazões nas quadraturas, comparativamente a ausência de vazão.

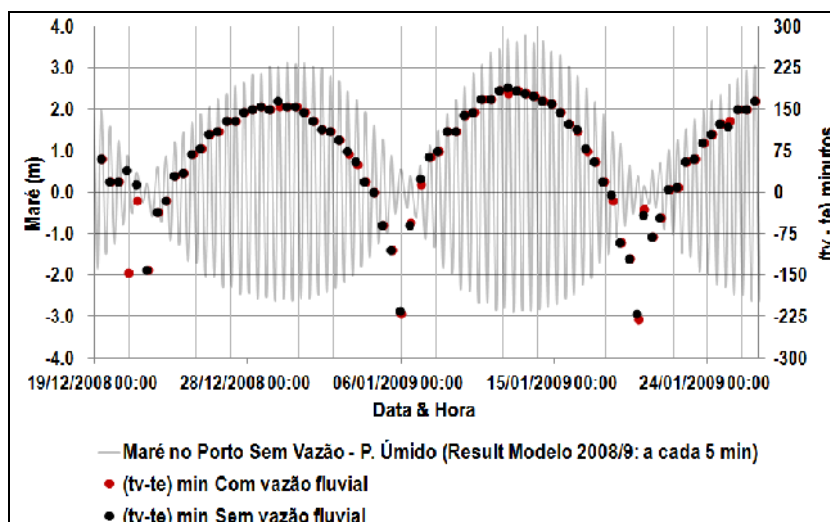


Figura 8 – Padrão da assimetria de maré na inclusão de vazão (*pontos vermelhos*) e ausência de vazão (*pontos pretos*).

6. Assimetria nas correntes de maré

Realizaram-se no estuário, medições de correntes e níveis da maré em 4 estações com um AWAC de 600 kHz (Fernandes da Silva, 2011). As medições foram obtidas a cada 5 minutos durante 10 dias e entre os dias 15 a 24 de Maio de 2009. Estas medições representam o período de seco ou de inverno e foram realizadas em maré de quadratura como ilustra a Figura 9.

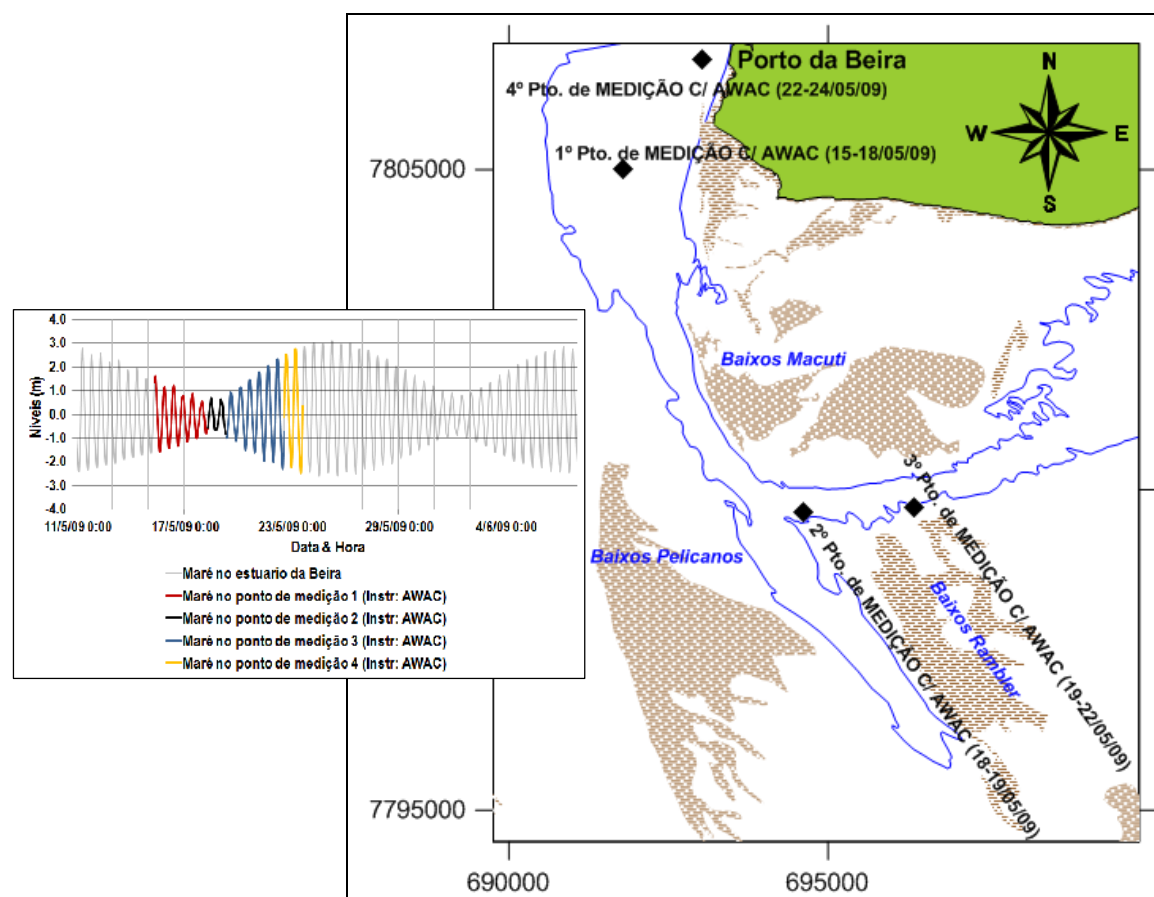


Figura 9 – Estações de medição de correntes no estuário da Beira em Maio de 2009 (Nzualo, 2010).

Tabela 2 – Coordenadas das estações de medição das correntes no estuário da Beira.

Estações	Data da Medição	Dias de Dados úteis	Coordenadas dos pontos de medição das correntes			
			Geográficas		UTM	
			Longitude	Latitude	x	y
Ponto 1	15 - 18/05/2009	3	34°49'03"E	19°50'39"S	691787.518	7804999.418
Ponto 2	18 - 19/05/2009	1	34°50'03"E	19°53'33"S	694624.838	7799663.35
Ponto 3	19 - 22/05/2009	3	34°51'08"E	19°53'34"S	696345.341	7799724.782
Ponto 4	22 - 24/05/2009	1	34° 49'35"E	19° 49'59"S	693039.1767	7806711.252

Os resultados da modelagem computacional com o Delft3D mostram a variabilidade de assimetria de níveis observada no porto sobre o estuário, representados pelos 4 pontos de medição. A assimetria é positiva na sizígia e negativa na quadratura. A assimetria positiva cresce com a sizígia, e do ponto 3 mais externo do estuário para o ponto 4 próximo ao porto.

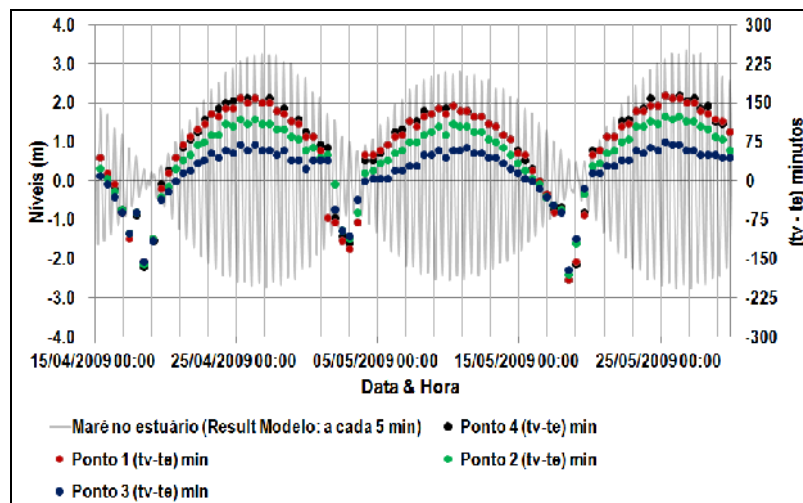


Figura 10 – Assimetria positiva crescente na sizígia do ponto 3 ao ponto 4 resultantes da modelagem computacional com o Delf3D.

Os resultados da assimetria nos dados medidos no estuário são mostrados sobre os pontos 1 e 3, onde as séries de nível e correntes são mais longas. A Figura 13 mostra em síntese a mudança da assimetria positiva para negativa e desta para positiva quando a maré transita da sizígia para a quadratura e quando retorna para a sizígia, nos pontos 1 e 3.

A Figura 13 mostra a uma boa calibração de níveis do modelo e dos dados, o que permitiu que se comparasse o padrão de assimetria obido dos resultados do modelo e dos dados. O modelo e dos dados mostram o mesmo padrão de assimetria, onde varia de positiva na sizígia para negativa na quadratura e retorna a positiva ao transitar novamente para a sizígia.

A assimetria e calibração de correntes é mostrada pela Figura 13, onde se observa a mesma mudança da assimetria positiva para negativa na medida em que a maré vai para a quadratura no ponto 1. No ponto 3, a assimetria se torna positiva quando a maré retorna a sizígia.

No ponto 1 se observam valores ligeiramente defasados da diferença dos tempos de vazante e enchente entre o modelo e os dados (Figura 13). Este resultado, bem como as pequenas diferenças nos níveis e correntes advém do fato de existirem diferenças na batimetria usada no modelo que data de 1986 com o da campanha de medição de níveis e correntes em Maio de 2009. Esta campanha de medição não comportou algum tipo de sondagem. No entanto, se realça que o estuário possui uma dinâmica de sedimentar grande e com mudanças morfodinâmicas assinaláveis (NEDECO, 1982).

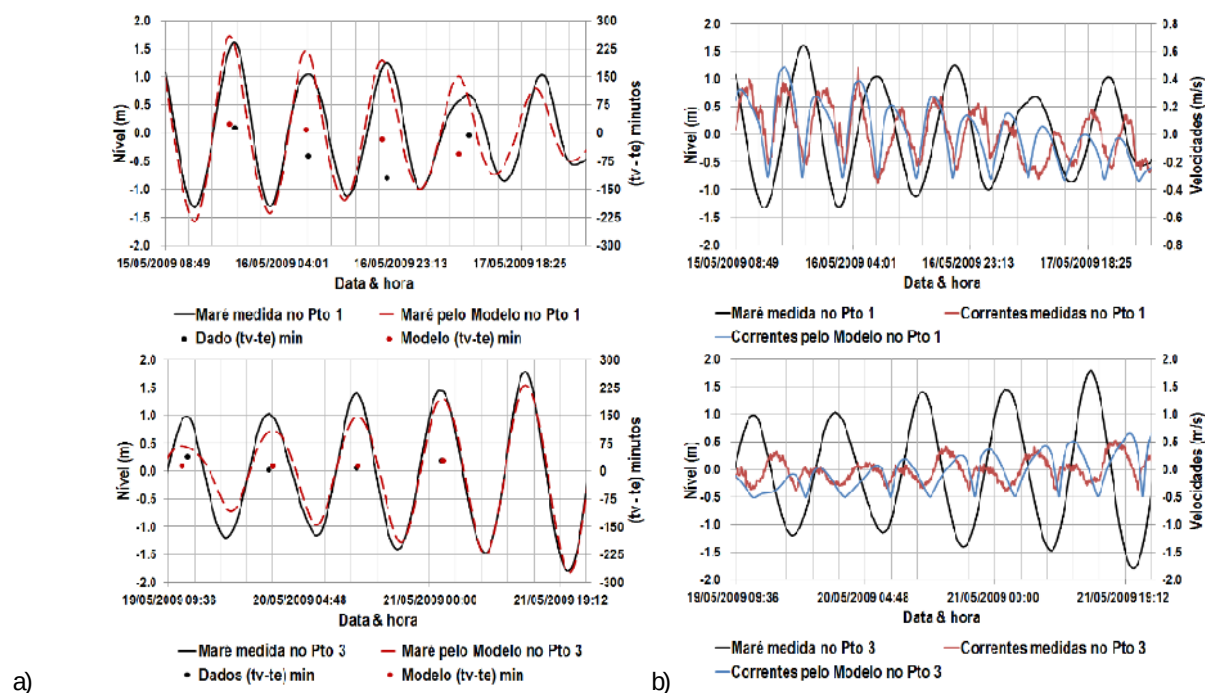


Figura 11a) – Comparação dos níveis dos dados (linha preta continua) aos do modelo (linha vermelha tracejada), e a variação da assimetria dos dados (Pontos pretos) em relação ao modelo (pontos vermelhos) nos ponto 1 e 3. **Figura 12b)** – Relação entre a maré medida (linha preta continua) e a correntes medida (linha vermelha) e modelada (linha azul) nos ponto 1 e 3 na análise da assimetria.

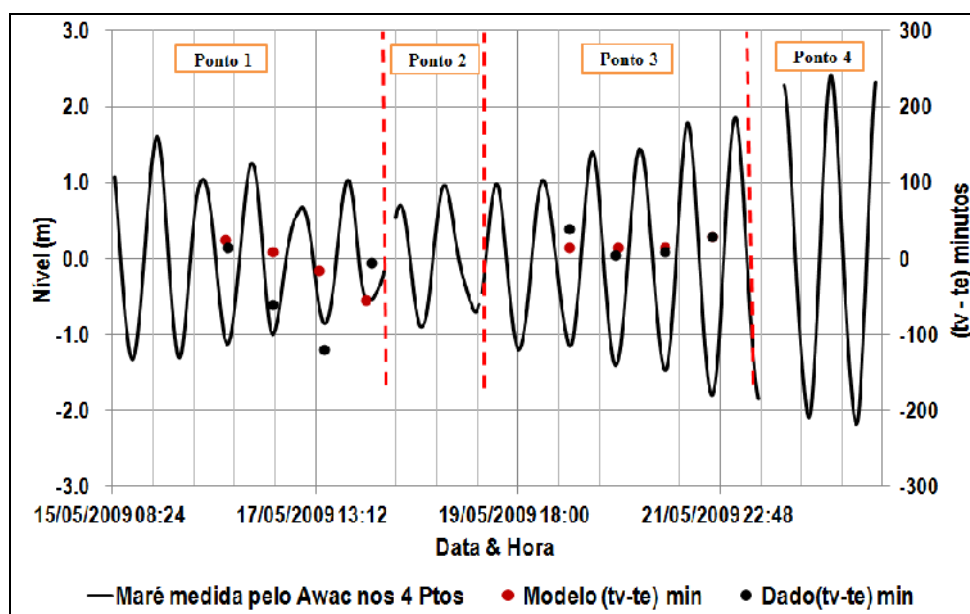


Figura 13 – Variabilidade da assimetria de maré nos 4 pontos de medição.



7. Correntes residuais no estuário da Beira

O campo de velocidades residual permite compreender as trocas de água no estuário para escalas de tempo superiores à do período de maré e é um bom indicador das direções preferenciais do trânsito sedimentar. Estes resultados foram obtidos por média euleriana do campo de velocidades instantâneas para os períodos de verão e inverno (vide Figura 14).

Os bancos Pelicanos, Rambler e Macuti que se manterem desde as sondagens de 1930 estão alinhados com o escoamento e se classificam segundo Dyer & Huntley (1999) como bancos de foz larga (*wide mouth ridges*).

Os resultados do padrão da circulação nos dois períodos têm comportamentos semelhantes, no entanto, em média as magnitudes das correntes residuais no verão são 29% maiores que as do inverno. Correntes residuais médias mais intensas são encontradas no canal principal de navegação com velocidades de 0.26 m/s, e as mais baixas de 0.02 m/s. Sobre os bancos se produzem vórtices, e onde correntes residuais baixíssimas são observadas a cima deles, o que pressupõe regiões de deposição de sedimentos arenosos trazidos pelas correntes de maré.

No braço direito do rio Pungué se identifica um vórtice com sentido anticiclónico, o que sugere se tratar de uma região de formação e modificação de um banco. No entanto, para determinar a taxa de transporte de sedimentos e mudanças na morfologia do estuário é necessário realizar o modelo morfodinâmico.

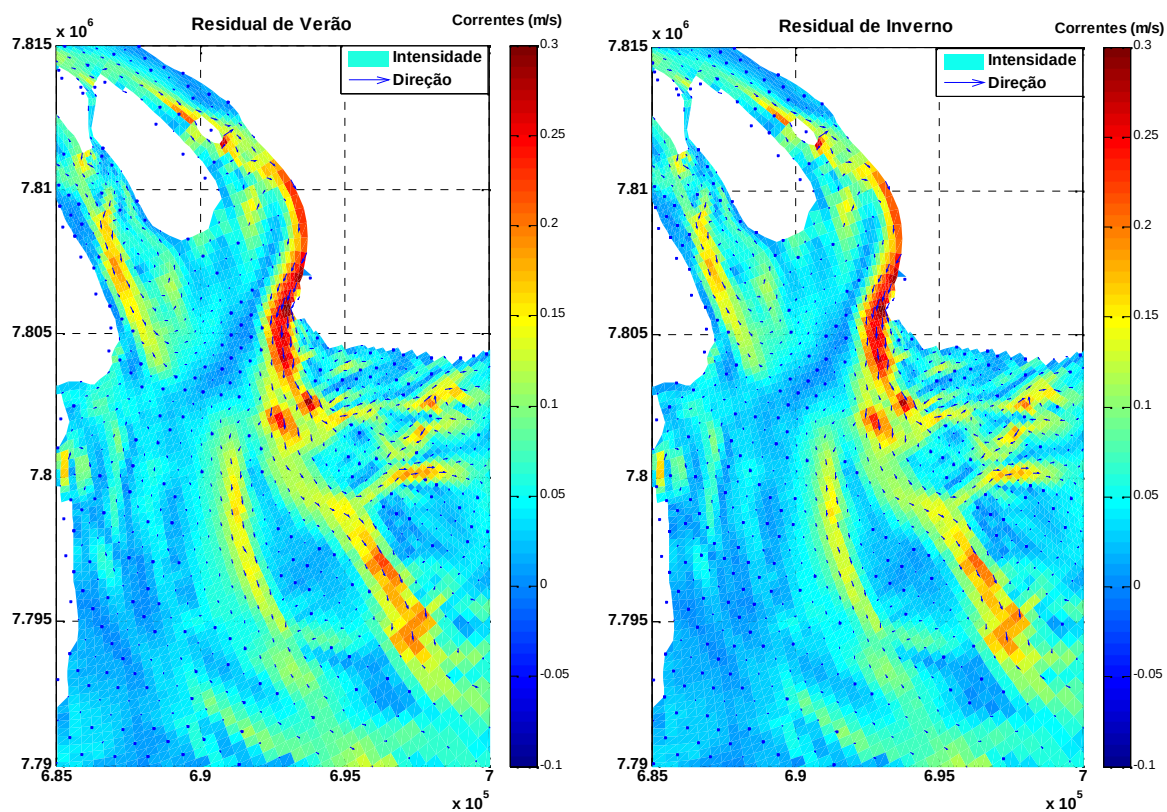


Figura 14 – Campo de correntes residuais no estuário da Beira no período de verão (*úmido*) e seco (*inverno*), calculado pelo modelo Delft3D.



8. Conclusões

Os dados de maré medidos no porto da Beira mostram claramente a ocorrência de uma variabilidade de assimetria nos níveis, sendo positiva na sizígia e negativa durante as quadraturas.

Simulações hidrodinâmicas com a introdução na fronteira aberta de 8 (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1) ou 9 (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_4) constantes harmónicas do FES2004 mostram que a maré já sofre distorção nesta fronteira do modelo que se localiza a 60 km do porto. O estuário da Beira se localiza na região com a maior plataforma continental da costa leste africana, onde a costa e a quebra da costa é de 80 milhas náuticas e com profundidades médias de 20 metros.

Na plataforma continental e área costeira adjacente, a maré oceânica sofre sensíveis deformações com relação às suas características de alto mar tais como, a refração, reflexão e difração de sua onda, associada a efeitos de pequeno fundo, isto é, em profundidades da ordem de grandeza das amplitudes da maré, em que propicia por um lado a redução de celeridade, produzindo aumento da amplitude e por outro sob o efeito do atrito crescente com o fundo a redução da amplitude.

Ao se prescreveram 8 constantes na fronteira aberta do modelo, ocorrem diferenças no comportamento da assimetria nos períodos úmido e seco. No período úmido, a assimetria é positiva na sizígia e negativa na quadratura, sendo que no período seco ela é somente positiva.

A explicação para a ocorrência da variabilidade da assimetria encontrada no período úmido em relação ao seco se relaciona ao fato de a maré no primeiro caso possuir quadraturas inferiores ao segundo, e deste modo, permitir a alternância de assimetrias, ora com vazantes mais longas e correntes de enchente mais intensas quando a amplitude de maré na sizígia for maior a profundidade no nível médio, ou ainda, com vazantes mais intensas quando se inverte o cenário e este apresenta profundidades menores do que a amplitudes nos período de quadratura. O raciocínio se baseia nas formulações de Speer & Aubrey (1985), que relacionam a amplitude da maré/profundidade média e onde a razão ($a/h > 0.3$) caracterizam sistemas do tipo enchente dominante. Valores onde a razão seja inferior a 0.2 caracterizam sistemas de vazante dominante.

Ao adicionar a constante de águas rasas M_4 na fronteira aberta do modelo, se observa de imediato a ocorrência da variabilidade da assimetria na fronteira. Nos dois casos, a assimetria positiva cresce à medida que aumentam as amplitudes da quadratura para a sizígia e decresce com a redução destas amplitudes da sizígia a quadratura. A variabilidade da assimetria de níveis e correntes similar obtida no porto foi encontrada no estuário. Os 4 pontos de medição de níveis e correntes com o Avac em Maio de 2009 mostram uma assimetria negativa na transição da sizígia para a quadratura e positiva ao transitarmos da quadratura para a sizígia. Entretanto, as ligeiras diferenças resultam grandemente do fato de as batimetria usadas no modelo defasarem-se 23 anos do período da campanha de medição de 2009, e onde a batimetria se alterou não somente pela dinâmica sedimentar natural, mas também pelas diversas dragagens que o estuário sofreu desde o início dos anos 80. Os resultados do transporte residual de correntes mostram que sobre a região dos três grandes bancos existem baixíssimas correntes e são circundados por vórtices que circulam sobre os canais mais profundos, possibilitando a deposição de sedimentos.



9. Bibliografia

- AUBREY, DAVID G. AND SPEER, P. E., 1985. *A study on non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems: 1. Observations*, Estuarine, Coastal and shelf Science, 21, 185-206.
- AUBREY, DAVID G. AND FRIEDRICH, CARL T., 1988. *Non-linear Tidal Distortion in Shallow Well-mixed Estuaries: a Synthesis*. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA 02543, U.S.A.
- BOON J. D., 1988., *Temporal variation of shallow-water tides in basin-inlet systems*, in Aubrey D. G. and Weisner L. (Eds.), Hydrodynamics and sediment dynamics of tidal inlets, Springer-Verlag, New York.
- BOOTHROYD, J. C. & HUBBARD, D. K., 1975., *Genesis of bedforms in mesotidal estuaries*. In Estuarine Research, Vol. 2: Geology and Engineering (Cronin, L. E., ed). Academic Press, New York, pp. 217 - 234.
- CONSULTEC, 2007. *Estudo Ambiental Simplificado da Dragagem do Canal de Acesso ao Porto da Beira*. Relatório Final. Editado em Maputo – Moçambique.
- DELFT3D-FLOW, USER MANUAL., 2010. *Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*. Deltares, Rotterdamseweg 185 p.o. box 177. 2600 MH Delft. The Netherlands.
- DRONKERS, J., 1986. *Tidal Asymmetry and Estuarine Morphology*. Netherlands Journal of Sea Research. pp. 117-131.
- DYER, K. R., 1997. *Estuaries: A Physical Introduction*. 2 ed. Baffins Lane, Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd, 4 p.
- DYER, K.R. & HUNTLEY, D.A., 1999. *The origin, classification and modelling of sand banks and ridges*. *Continental Shelf Research*, v. 19, pp. 1285-1330.
- FERNANDES DA SILVA, A., 2011. *Características Hidrográficas do Estuário da Beira, Moçambique*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ Brasil.
- GRAAS¹, S. AND SAVENIJE², H. H. G., 2008. *Salt intrusion in the Pungué estuary, Mozambique: effect of sand banks as a natural temporary salt intrusion barrier*. ¹Department of Management and Institutions, UNESCO-IHE Institute for Water Education, Westvest 7, PO Box 3015, 2601 DA Delft, The Netherlands. ²Water Resources Section, Faculty of Civil Engineering and Applied Geosciences, Delft University of Technology, Stevinweg 1, PO Box 5048, 2600 GA Delft, The Netherlands.
- HAAS, JENNIFER., 2007. *Phase Lags in Alluvial Estuaries. Classification of alluvial estuaries by means of the phase lag*. Final Report, June 2007. Graduation monography. Delft University Technology.
- JICA, 1998, *The Study For Maintenance and Improvement Plan of Access Channel of Beira Port in The Republic of Mozambique*. Final Report, Edited by the Japan International Cooperation Agency (JICA) and Ministry of Transport and Communications of Republic of Mozambique.
- LANZONI, S., SEMINARA, G., 2002. Long-term evolution and morphodynamic equilibrium of tidal channels. *Journal of Geophysical Research* 107 (C1). doi:10.1029/2000JC000468.
- LE PROVOST, C., 2001. *Ocean Tides*. LEGOS/GRGS, UMR CNES - CNRS - UPS. 14 Avenue Edouard Belin. 31401 Toulouse Cedex. France.
- MINISTÉRIO DA DEFESA NACIONAL DE MOÇAMBIQUE., 1986. *Roteiro da Costa da República Popular de Moçambique*. 1ª edição 1986. 83 p.
- NEDECO, 1982a. *Beira Port Study. Access Channel Study. Main Report*. Kingdom of the Netherlands – Ministry of Foreign Affairs. Peoples Republic of Mozambique – Ministry of Port and Surface Transport. September 1982 pp. 1-52.



- NEDECO, 1982b. *Beira Port Study. Access Channel Study. Main Report. Appendix I. Geotechnical Report.* Kingdom of the Netherlands – Ministry of Foreign Affairs. Peoples Republic of Mozambique – Ministry of Port and Surface Transport. September 1982. pp. 18-41.
- PINGREE, R. D., 1978. *The formation of the Shambles and other banks by tidal stirring of the seas.* J. Mar. Biol. Assoc. U.K., 58: 211 - 226.
- PINGREE, R. D. And MADDOCK, L., 1979. *The tidal physics of headland flow and offshore tidal bank formation.* Mar. Geol., 32: 269 – 289.
- POSTMA, H., 1967. *Transport and Accumulation of Suspended Matter in the Dutch Wadden Sea.* Netherlands Journal of Sea Research. pp. 148-190.
- PUGH, DAVID T., 1987. *Tides, Surges and Mean Sea-Level.* Natural Environment Research Council Swindon, UK.
- NZUALO, T. DAS N. M., 2010. *Estudo Hidrodinâmico e Ambiental do Estuário da Beira – Moçambique.* Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ Brasil.
- TOUBALANC, F., BRENON And LE MOINE, O., 2012., *Ebb/flood dominance inversion over a neap/spring tidal cycle in the Charente estuary (France).* Physics of Estuarine and Coastal Seas Conference, New York, USA, 12 -16 August 2012.
- VAN DE KREEKE, J AND ROBACZEWSKA, K., 1993., *Tide-induced residual transport of coarse sediment; application to the Ems estuary,* Netherlands Journal of Sea Research 31, 3, 209-220.
- VAN DE KREEKE, J.; DAY, C.M. AND MULDER, H. P.J., 1997. *Tidal variations in suspended sediment concentration in the Ems estuary: origin and resulting sediment flux.* Journal of Sea Research. pp. 1-16.