

Sistema integrado de simulação de cheias no Estuário do Espírito Santo (Baía de Maputo, Moçambique)

Madalena S. Malhadas (1), P.C. Leitão (1), J. Ribeiro (1), A. Silva (1), P. Leitão (2), T. Cota (1)

(1) HIDROMOD, Rua Rui Teles Palhinha n° 4 1°, 2740-278, Porto Salvo. madalena@hidromod.com

(2) IST-Maretec, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 Lisboa

Resumo: Neste trabalho foi implementado um sistema de modelação integrado para simular o efeito das cheias no Estuário do Espírito Santo/Baía Maputo (Moçambique). O sistema implementado permite sobrepor à escala local a solução de larga escala para simular o efeito de uma onda de cheia considerando como forçamento principal os rios e a maré astronómica. A validação incluiu a comparação dos resultados do modelo com níveis de maré ao longo da Costa de Moçambique, temperatura à superfície obtida com o satélite e perfis verticais de salinidade e temperatura registados através de bóias Argos. Na pequena escala, Baía de Maputo, os níveis e correntes foram validados para diferentes pontos. Dos resultados obtidos conclui-se que o modelo reproduziu bem as variações de nível de maré na larga e pequena escala, observando-se o efeito da onda de cheia gerada pelos Rios Umbeluzi, Tembe e Matola no aumento do nível Estuário do Espírito Santo/Baía de Maputo.

Palavras - chave: Modelação, MOHID, Detecção Remota, maré, Cheias, Moçambique (Baía de Maputo)

1. INTRODUÇÃO

Moçambique situa-se na costa Este do continente Africano, entre as latitudes 10°20' - 26°50' S e as longitudes 30°12' - 40°51' (Fig. 1A). A Baía de Maputo localizada no Canal de Moçambique entre as latitudes 25°55' - 10°26' Sul e as longitudes 32°40' - 32°55' Este, é uma baía pouco profunda (profundidade média ~ 3.0 m) e tem uma área de cerca de 1200 km² (40 km de comprimento e 30 km de largura) (Nhapulo, 2000). A comunicação com o Oceano Índico faz-se através do Canal de Moçambique, ficando a embocadura (largura de ~15 km) da baía posicionada do lado oriental (Fig. 1B).

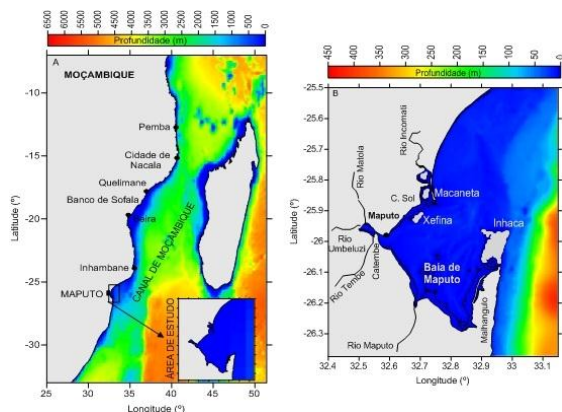


Fig. 1. Localização geográfica de Maputo (A). Baía de Maputo: principais rios afluentes e ilhas (B). O lado oriental da baía é o que corresponde à fronteira com o oceano e o lado ocidental à fronteira com terra.

A topografia é caracterizada por vários bancos de areia e canais com uma orientação Norte/Sul. Os bancos mais importantes são a ilha Inhaca e a península de Machangulo que funcionam como uma barreira natural à protecção das ondas, ventos e correntes oceânicas (Fig. 1B). O Estuário do Espírito

Santo é um braço-de-mar na margem ocidental da Baía de Maputo onde desaguam 3 rios: Tembe, Umbeluzi e Matola. Em situações de cheia existe uma tendência para o aumento do nível no estuário aumentando a probabilidade de inundações nas zonas adjacentes. Este trabalho teve como principal objectivo implementar um sistema integrado de modelos capazes de simular os processos de larga escala e prever o aumento do nível e as zonas susceptíveis de serem inundadas no Estuário do Espírito Santo/Baía de Maputo em condições de cheias extremas.

2. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu na implementação de um sistema de modelos encaixados que integram os processos desde a escala oceânica até à escala local, baseado no sistema MOHID (www.mohid.com). Adicionalmente, foi também acoplado off-line, um modelo de bacia (SWAT, <http://swatmodel.tamu.edu/>) que permitiu gerar as ondas de cheia dos rios em Fevereiro de 2000. O sistema de modelação implementado permite simular o aumento do nível e as zonas susceptíveis de serem inundadas no Estuário do Espírito Santo.

A implementação dos modelos numa primeira fase consistiu na recolha de dados de base e numa segunda fase na configuração do nesting.

3.2. Dados de Base

Os dados de base necessários para este trabalho reportam a: i) batimetria (GEBCO e cartas náuticas 16201_M e c-1016-11), ii) topografia (SRTM e levantamentos efectuados em 2011), iii) hidrografia (caudais históricos) e iv) oceanográficos (dados necessários para a validação). Os dados utilizados na

validação dos modelos à escala oceânica referem-se a dados de nível (<http://www.gloss-sealevel.org/>), detecção remota (<http://www.remss.com/>) e dados de bóias Argo (<http://www.argo.ucsd.edu/>). Para a escala local (Baía de Maputo) a validação foi feita tendo como base um conjunto de dados (nível, correntes, salinidade e temperatura) que advém do plano de monitorização levado a cabo pela Universidade Eduardo Mondlane (UEM) e o Instituto das Pescas de Moçambique (Lencart, 2007) desde Março de 2003 a Maio de 2004.

3.1. Modelos encaixados

O modelo implementado para estudar o efeito das cheias inclui 5 níveis diferentes de modelos encaixados (Fig. 2): i) nível 1 que abrange o Oceano Índico, ii) nível 2 a Costa de Maputo, iii) nível 3 a Baía de Maputo, iv) nível 4A a Baía de Maputo e nível 4B inclui a mais o leito de cheia dos rios e v) nível 5 que abrange o Estuário do Espírito Santo.

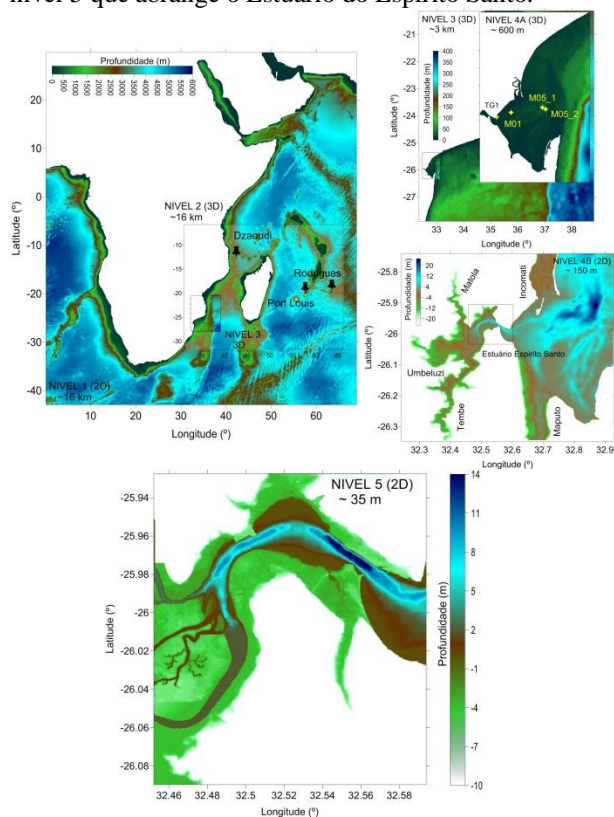


Fig. 2. Modelos encaixados desde a escala oceânica à escala local. O domínio de menor resolução é o Oceano Índico com 16 km e o de maior é o Estuário do Espírito Santo com 35 m.

O modelo de maior nível tem uma resolução espacial de 16x16 km e é forçado pelo modelo global de maré FES2004 em toda a fronteira aberta. O modelo é bidimensional (2-D) assumindo que toda a coluna de água é representada por uma única camada sigma. A sua única função é fornecer as condições de fronteira de oceano aberto para os níveis seguintes até chegar ao domínio de maior resolução, ou seja, o estuário com cerca de 35 m. Os modelos que simulam a circulação à escala oceânica e regional são os modelos de nível 2 (16 km) nível 3

(3km) e nível 4A (600 m) todos tridimensionais com uma discretização vertical composta por camadas sigma até aos 8 m de profundidade e as restantes cartesianas. O efeito da onda de cheia originada pelos rios afluentes à baía é simulado com o nesting da malha do nível 4B (150 m) a qual inclui o leito de cheia dos rios. O estuário é simulado com o nível 5 cuja malha tem uma resolução de 35 m. Estes dois últimos níveis são bidimensionais com uma única camada sigma na vertical.

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos focam-se na validação efectuada à escala oceânica, à escala da baía e ainda nas previsões do nível no estuário para situações extremas de cheia.

3.1. Validação à escala oceânica

3.1.1. Nível de maré

A comparação dos níveis de maré previstos pelo modelo e medidos pela rede de monitorização do GLOSS foi feita para o mês de Junho de 2011 em Dzaoudi, Port Louis e Rodrigues (Fig. 2). Embora existam outras estações de medição de nível de maré, as comparações foram feitas apenas para estas locais porque eram os únicos que tinham dados disponíveis para o período simulado. Os resultados obtidos mostram que o modelo consegue descrever bem a elevação da superfície do mar apresentando coeficientes de correlação (R) superiores a 0.7 (Tabela I). Observa-se uma desigualdade bastante significativa na altura de maré na zona de Dzaoudi relativamente a Rodrigues e Port Louis, devido ao facto de existir uma amplificação da maré no canal de Moçambique (efeito de onda de Kelvin). Esta amplificação das marés ao longo do canal de Moçambique foi observada em trabalhos anteriores (Hoguane, 1999).

Tabela I - Coeficiente de correlação (R) e erro quadrático médio (RMSE) entre as medidas e o modelo para Dzaoudi, Port Louis e Rodrigues. O cálculo das variáveis estatísticas foi efectuado para um período de 1 mês de dados com uma frequência de 10 em 10 minutos.

Estação	R	RMSE
Dzaoudi	0.91	0.37
Port Louis	0.73	0.14
Rodrigues	0.88	0.16

3.1.2. Temperatura à superfície

As previsões do modelo em cada instante (dia e hora) foram comparadas com as imagens de satélite disponíveis para o período de 2 de Junho a 11 de Julho de 2011. Esta validação foi efectuada de um modo sistemático através de um programa que permite ler os dados do satélite e comparar com o formato obtido pelo modelo. Para o período acima referido foi feita uma análise estatística a nível mensal apresentando-se o resultado final em termos

de R, *bias* RMSE na Fig. 3. Os resultados obtidos apontam para um R superior a 0.70 evidenciando uma forte correlação positiva entre as previsões do modelo e as medidas. Esta correlação mostra que, quando a temperatura medida pelo satélite aumenta o modelo consegue prever o mesmo aumento. Globalmente pode-se dizer que o *bias* é muito próximo de 0, com excepção na fronteira superior norte e junto à linha de costa na zona de Maputo, cujos valores são tendencialmente elevados e negativos. Nas zonas em que o *bias* é próximo de 0, significa que não existe enviesamento, e em média, as duas variáveis coincidem. Na fronteira superior norte e ao longo da linha de costa de Maputo, existe um certo viés ou erro sistemático, ou seja, o modelo tende a produzir estimativas sistematicamente desviadas (por excesso) do verdadeiro valor medido. O RMSE é de um modo geral baixo (em média 0.5 °C) o que indica que as previsões do modelo são efectuadas com um grau de precisão elevado. À semelhança do *bias*, as regiões com um erro maior associado (~1.0 - 1.2 °C). O aumento do *bias* e RMSE nos mesmos locais referidos anteriormente estão fortemente associados aos campos de correntes superficiais os quais se descrevem na seguinte secção.

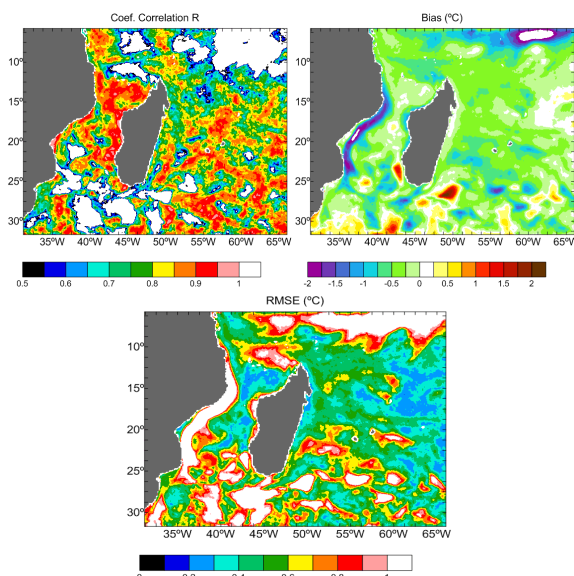


Fig. 3. Coeficiente de correlação, *bias* e erro quadrático médio entre as medidas do satélite e as previsões do modelo para a temperatura à superfície do mar no período de 2 de Junho a 11 de Julho de 2011.

3.1.3. Perfis verticais de salinidade e temperatura

Os perfis verticais de salinidade e temperatura registados através das bóias Argos para o período de 2 de Junho a 11 de Julho de 2011 foram comparados com o modelo no mesmo local e instante (data e hora). À semelhança dos dados de detecção remota as comparações com as bóias Argos também feita de um modo sistemático.

As comparações das bóias e do modelo na vertical foram feitas para profundidades máximas entre 1000 m e 2000 m em vários locais. A título de exemplo

mostra-se a comparação obtida para o local 9.81°S - 52.69°E (extremidade sul do Canal de Moçambique, Fig. 4).

As figuras apresentadas mostram a comparação da salinidade e temperatura na vertical, os diagramas TS e as variáveis estatísticas obtidas (R, *bias* e RMSE). Os resultados mostram que o modelo consegue reproduzir a variabilidade vertical observada nas medidas quer em termos de tendência média quer em termos de grandeza de valor. As correlações obtidas foram elevadas (superiores a 0.90) e os erros baixos evidenciando a fiabilidade das previsões numéricas.

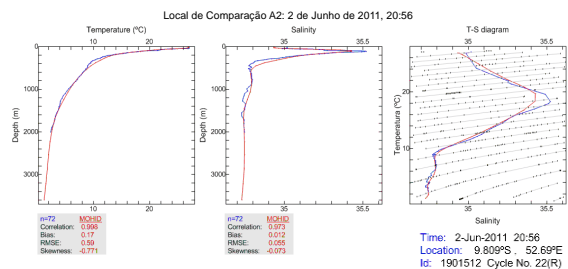


Fig. 4. Perfis verticais de salinidade e temperatura medidos pelas Argo e previstos pelo modelo MOHID para o local 9.81°S, 52.69°E e instante temporal 2 de Junho de 2011, 20:56.

3.1.4. Circulação geral das correntes

O campo de correntes previsto pelo modelo MOHID à superfície ao fim de 2 meses de simulação apresenta-se na Fig. 5. Os resultados obtidos mostram que o modelo consegue reproduzir o padrão geral de correntes descritos na literatura (Lencart, 2007) nomeadamente: Corrente Sul Equatorial (CSE), Corrente Norte de Madagáscar (CNM), Corrente Este de Madagáscar (CEM), Corrente de Moçambique (CM) e Corrente Central Este Africana (CCEA). Junto à costa surge uma corrente costeira para Norte originada pelos ventos locais a qual não se encontra descrita na literatura. Hogueane (2007) confirma a existência desta corrente com base em observações.

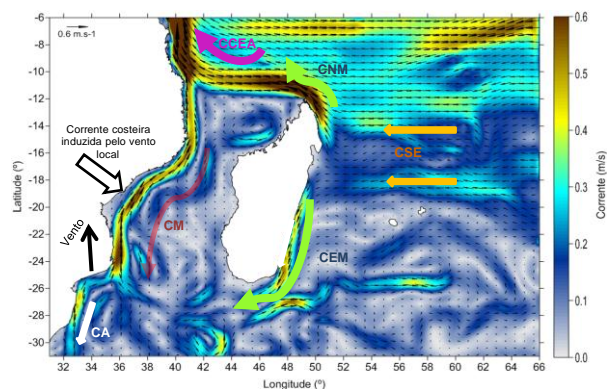


Fig. 5. Campo de correntes em superfície previsto pelo modelo MOHID na Costa de Moçambique.

3.2. Validação à escala da baía de Maputo

3.2.1. Nível de maré

O nível de maré foi analisado através de análise harmónica com o programa T_TIDE (Pawlowicz *et*

al., 2002) às medidas e ao modelo. Os resultados obtidos apontam para uma predominância semidiurna (M2 e S2) em fase e amplitude

A Fig. 6 compara as elipses de maré obtidas para as observações com as previsões do modelo MOHID para as componentes M2 e S2 na estação MO1 e MO5. As elipses de maré demonstram que as componentes M2 e S2 na estação M01 ocorrem predominantemente no eixo zonal, evidenciando a amplitude dessas componentes nessa direcção (e.g., direcção do escoamento predominantemente na horizontal). Na estação M05 as elipses, ocorrem predominantemente no eixo vertical, ou seja, o escoamento é maioritariamente sobre a direcção meridional.

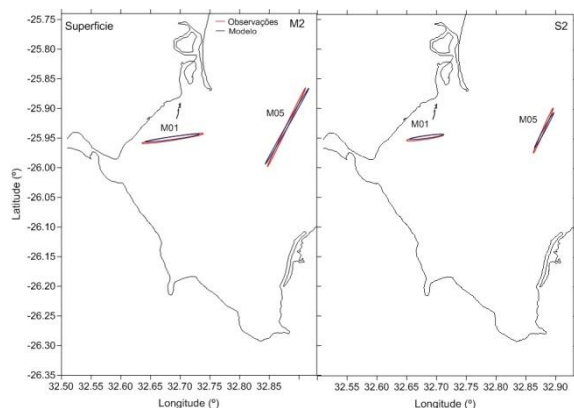


Fig. 6. Elipses de maré das constituintes harmónicas M2 e M3. As observações tiveram como base os dados publicados em Lencart et al, 2010.

3.3. Zonas susceptíveis de ser inundadas

O nível previsto pelo modelo MOHID no Estuário do Espírito Santo para o cenário de referência (maré e caudais médios nos rios afluentes) e cenário 3 (caudais da cheia de 2000 e uma sobrelevação de 0.5 m) apresenta-se na Fig. 6. O nível previsto pelo modelo aponta para um aumento entre 1 e 1.5 m (comparado com a situação de referência) no delta dos rios e no canal principal do estuário. Os resultados apontam para que as zonas susceptíveis de ser inundadas sejam a zona do delta dos rios, a zona da Matola, a margem sul do estuário, a Machava e Catembe.

4. CONCLUSÕES

A metodologia de modelação apresentada permite sobrepor os processos de larga escala com os de escala local, nomeadamente o aumento do nível no Estuário do Espírito Santo/Baía de Maputo numa situação de cheia. O trabalho de validação feito à escala oceânica e local permite verificar não só a qualidade dos resultados em cada um dos modelos como que a informação entre modelos se está a propagar correctamente através da fronteira aberta dos modelos encaixados. A metodologia apresentada permite apoiar situações de emergência a diferentes

escalas (e.g. cheias, derrames de petróleo, busca e salvamento).

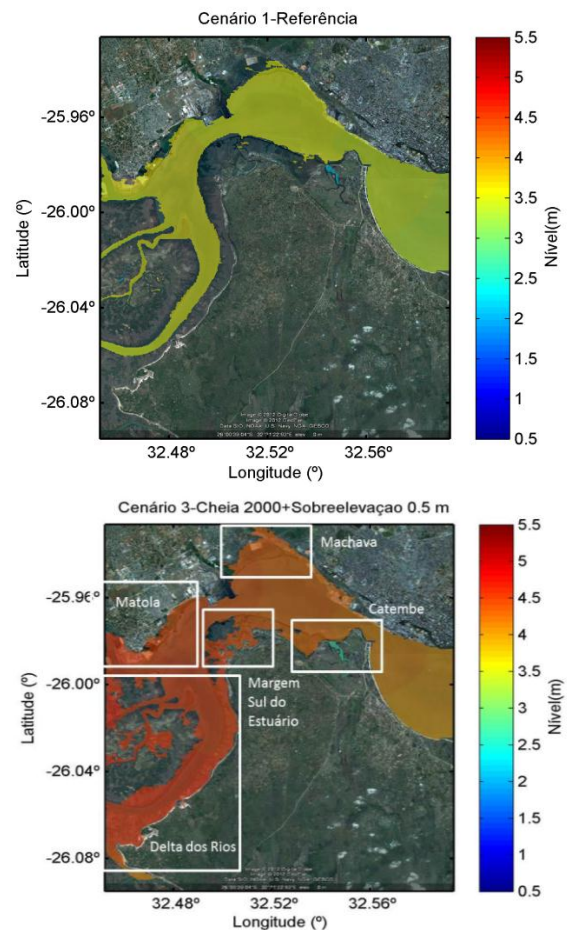


Fig. 6. Nível previsto pelo modelo para a referência (caudais médios e maré) e cenário 3 (caudais de cheia de 2000 e sobrelevação de 0.5 m).

REFERÊNCIAS

- Hoguane, A.M. (1999) - Sea Level Measurement And Analysis. In: *The Western Indian Ocean. National Report :Mozambique*.
- Hoguane, A.M. (2007). Perfil Diagnóstico da Zona Costeira de Moçambique. *Revista de Gestão Costeira Integrada* 7, 1, 69-82.
- Lencart S. J. D. (2007) Controls on exchange in a subtropical tidal embayment, Maputo Bay. School of Ocean Sciences. University of Wales, Bangor. Bangor. PhD.
- Lencart S. J.D., Simpson J.H., Hoguane A.M., Harcourt-Baldwin J-L. (2010) Buoyancy-stirring interactions in a subtropical embayment: A synthesis of measurements and model simulations in Maputo Bay. *African Journal of Marine Science*. 32, 1, 97-107.
- Nhapulo, C.I.S. (2000). Correntes de marés e circulação geral na Baía de Maputo. Trabalho de licenciatura. Universidade Eduardo Mondlane. Pp. 50.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis with errors in matlab using t-tide. *Computers & Geosciences* 28, 929-937.