# Modelação numérica de marés meteorológicas na costa central de Moçambique: um estudo de seguimento

Alberto J. Bié<sup>1\*</sup>, Ricardo de Camargo<sup>2</sup> e Alberto F. Mavume<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Investigação & Extensão, Instituto Superior de Transportes e Comunicações (ISUTC), Prol. Av. Kim Il Sung, Maputo, Moçambique.

<sup>2</sup>Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, Rua do Matão 1226, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>3</sup>Departamento de Física, Faculdade de Ciências, Universidade Eduardo Mondlane, Av. Julius Nyerere, 257, Maputo, Mozambique

\*e-mail de contacto: <u>alberto.bie@live.com</u>

Resumo – A porção costeira central de Moçambique é altamente vulnerável a inundações severas devido a sobre-elevação do nível do mar induzidas por ciclone tropicais (marés meteorológicas) que formam-se ou fazem a sua trajectória pela região oceânica do Canal de Moçambique. Esta vulnerabilidade é ainda mais acentuada devido existência de extensas planícies costeiras e descargas fluviais de rios importantes na região. Casos recentes de ciclones tropicais que induziram a inundações costeiras na região central de Moçambique reforçam a necessidade monitoria e previsão de marés meteorológicas nesta porção da costa moçambicana. No presente trabalho é apresentado um seguimento dos esforços da aplicação do modelo hidrodinâmico de circulação costeira e oceânica Princeton Ocean Model (POM) para prever marés meteorológicas e a elevação total do nível do mar (incluindo a maré astronómica), na região costeira central de Moçambique. Experimentos de sensibilidade foram conduzidos considerando diferentes resoluções horizontais (17 km e 8 km de espaçamento de grade), considerando as versões bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) do modelo. Os resultados mostram as amplitudes e fases das principais componentes diurnas e semidiurnas das marés astronómicas estão em boa concordância com as observações bem como com a referência dada pelo modelo global TPXO, tanto na versão 2D quanto na 3D, particularmente na resolução de 8 km, revelando melhorias importantes na representação das marés astronómicas em comparação à resolução de 17 km. Os resultados das simulações de marés meteorológicas mostram boa concordância com a observação (erros de amplitude inferiores a 10 cm), demonstrando a habilidade do modelo em replicar o fenómeno. Os experimentos de sensibilidade sugerem resultados semelhantes para as configurações 3D/17 km em e 2D/8 km, com ambas a subestimarem a amplitude (em cerca de 4 cm), enquanto a aplicação 8 km 3D subestimou a sobre-elevação (em cerca de 9 cm) durante o pico. A configuração do modelo em 2D e 8 km foi usada para estimar a maré meteorológica induzida pelo ciclone tropical Idai. Embora não existam dados observacionais

para validar esta simulação, sua estimativa (4,34 m) está de acordo com os valores reportados por outros estudos, reforçando assim habilidade desta ferramenta para um potencial uso operacional para a previsão deste fenómeno na região costeira central de Moçambique.

*Palavras-chave* — Marés meteorológicas, Storm surges, Costa de Moçambique, Ciclones tropicais, Modelação numérica.

# I. INTRODUÇÃO

Os ciclones tropicais são um dos sistemas meteorológicos mais destrutivos da Terra. No Sudoeste do Oceano Índico (*SouthWest Indian Ocean* – SWIO; 0 – 40°S; 30 - 90°E), a actividade de ciclones nesta bacia oceânica corresponde a aproximadamente 14% da global, com números que variam entre 10 e 12 ciclones tropicais por ano a se formarem nesta região [1], [2], [3]. Os ciclones tropicais que se formam no SWIO tendem a afectar, com impactos catastróficos, os países do sudeste de África e nações insulares do SWIO (e.g. [4], [5], [6], [7], [8]), onde Moçambique e Madagáscar são os países mais afectados, sendo atingidos, em média, uma e duas vezes por ano, respectivamente, por sistemas que fazem penetram a costa adentro (*landfall*) ou se aproximam o suficiente dela [1], [9].

A época ciclónica 2018/2019 do SWIO foi excepcional em termos de actividade ciclónica e de impactos. Com base nos arquivos do Centro Meteorológico Regional Especializado Reunião da (Regional Specialized Meteorological Center - RSMC-LR), formaram-se 15 sistemas tropicais no SWIO, dos quais 9 deles atingiram o estágio de ciclone tropical intenso (vento igual ou superior a 175 km/h). Destes, 3 penetraram na costa de Moçambique, incluindo o ciclone tropical Kenneth (em Abril de 2019), um dos ciclones mais intensos a atingir Moçambique, e o catastrófico ciclone tropical Idai (em Março de 2019), classificado como o ciclone mais devastador que alguma vez ocorreu no Hemisfério Sul. O Idai fez a sua trajectória penetração continental na região costeira central de Moçambique, com consequências humanitárias dramáticas, afectando cerca de 1,8 milhões de pessoas, mais de 700 mortes e danos estimados em mais de 2 bilhões de dólares norte-americanos [10], [11].

Entre Fevereiro e Março de 2023, o intenso ciclone

tropical Freddy ocorreu sobre o SWIO, com duração superior a um mês, se tornando o ciclone tropical mais duradouro que há registo na Terra [12]. Freddy penetrou a região continental de África a partir da região central de Moçambique e fazendo a sua trajectória para interior, afectando outros países como Malawi e Zimbabwe. Ao longo de sua trajectória, o Freddy foi responsável pela morte de mais 1400 pessoas, a maior parte delas em Malawi e Moçambique. No momento em que este artigo estava a ser concluido, um sistema muito intenso (ciclone tropical Chido) estava prestes a fazer afectar o norte de Moçambique, com potencial para ser catastrófico.

As informações acima expostas elucidam o quão desastrosos os ciclones tropicais para a Moçambique, particularmente a região central, a mais afectada pela penetração continental destes sistemas [1].

As marés meteorológicas (*storm surges*) são um dos fenómenos mais devastadores associados aos ciclones tropicais que atingem a costa [13], [14]. Elas representam a subida anormal do nível médio do mar ao na região costeira, causadas por forçantes meteorológicas extremas, como os ciclones tropicias. Quando combinadas com elevadas descargas fluviais e amplitudes elevadas de marés astronómicas (variações regulares do nível do mar na costa, comumente conhecidas como marés), as marés meteorológicas são responsáveis por massivas inundações costeiras, que podem afectar tanto região costeira assim como regiões interiores [13], dependendo das condições hidrográficas da região.

Mais de metade da população moçambicana habita a região costeira [15]. A costa central do país é a mais afectada por ciclones que se formam ou fazem a sua trajetória através do Canal de Moçambique [1], [16]. Isto, adicionado a (i) planícies costeiras extensas e densamente povoadas, (ii) rios importantes que que fazem a sua descarga na região [15], [17] e (iii) a um dos maiores regimes de marés ao longo da costa africana (com amplitudes de maré astronómica que atingem entre 6 e 7 m durante as marés vivas) [18], [19], torna esta região altamente vulnerável à graves inundações devidos às marés meteorológicas. A desastrosa inundação generalizada induzida pelo ciclone Idai é um dramático deste fenómeno, e realça a necessidade de recente monitorização e previsão de marés meteorológicas nesta região.

As marés meteorológicas representam o nível do mar residual após a remoção das marés astronómicas no nível total de água na costa (nível do mar).

Na costa moçambicana, os dados observados do nível do mar a partir de marégrafos são escassos; os poucos disponíveis estão cheios de lacunas [20], especialmente durante eventos meteorológicos extremos, como os de ciclones tropicias. Embora as marés tenham recebido uma atenção considerável (por exemplo, [18], [19], [21], [22]), pouco se pode encontrar sobre as marés meteorológicas na costa de Moçambique. A informação sobre os períodos de retorno para o nível extremo do mar com base nos dados de marégrafos disponíveis para três portos principais em Moçambique é apresentada no relatório abrangente do Instituto Nacional de Gestão de Calamidades de Moçambique [15]. Muis et al. [23] criaram uma reanálise global de marés meteorológicas com base num modelo oceânico, onde períodos retorno de níveis extremos podem ser encontrados para as regiões costeiras globais, incluindo Moçambique.

As estimativas iniciais, usando algum tipo de modelação, dos níveis de água devido a marés meteorológicas, para casos particulares de CT na costa de Moçambique podem ser rastreadas até Chang-Seng & Jury [24], que calcularam as alturas da maré meteorológica devido à penetração continental de ciclones tropicais, em Madagáscar e Moçambique, em Fevereiro e Abril de 2000, utilizando um modelo analítico bidimensional. Eilander et al. [14] fizeram uma modelação composta inundação, focando em um estudo de caso na região central de Moçambique (Província de Sofala) e estimaram os períodos de retorno para casos extremos. Seus resultados indicaram que a componente costeira da inundação era a mais relevante nesta porção costeira. Bié et al. [13] implementaram e validaram um modelo hidrodinâmico de circulação oceânica e costeira, considerando a estrutura tridimensional do oceano, para simular marés astronómicas e marés meteorológicas (e a suas interações) devido aos ciclones tropicais Bonita (1996) e Lisette (1997) em Moçambique. Neste último estudo, enquanto os níveis de marés meteorológicas foram reproduzidos razoavelmente bem, a representação das marés algumas astronómicas apresentou deficiências, particularmente na costa central de Mocambique, onde o modelo não conseguiu reproduzir com boa precisão a distorção e amplificação das marés astronómicas.

As marés astronómicas são um componente importante da variabilidade do nível do mar e representá-las com precisão é crucial para prever e/ou estimar com precisão a severidade da maré meteorológica, particularmente em regiões como a costa central de Moçambique, onde as amplitudes de maré astronómica são muito elevadas e a sua interação com a maré meteorológica pode actuar para amplificar esta última [13]. Assim, o objectivo deste trabalho é dar seguimento aos esforços iniciados por Bié et al. [13]. Os objectivos do presente estudo incluem: (i) verificar se um aumento da resolução do modelo utilizado por estes autores é capaz melhorar a representação da maré astronómica e, portanto, os níveis totais de água na costa central de Moçambique; (ii) avaliar se existem grandes diferenças na utilização de versões tridimensionais (3D) e bidimensionais (2D) do modelo para prever as marés meteorológicas nesta área específica e (iii) usando a melhor configuração obtida, estimar a maré meteorológica devido ao ciclone tropical Idai. Como os dois primeiros objectivos (i e ii) exigem dados observados para validar os experimentos, estes serão realizados para o caso do ciclone tropical de Lisette (ocorrido em 1997), tal como em Bié et al. [13], uma vez que este ciclone é um dos casos mais raros para o qual existem dados medidos do nível do mar. Realizar o objectivo (ii) é necessário pois a diferenca no custo computacional no uso das versões 2D e 3D do modelo são relevantes, particularmente quando se vislumbram sua aplicação no modo operacional.

# II. DADOS E MÉTODOS

#### 2.1. Descirção do modelo

Sendo um seguimento de Bié et al. [13], este estudo adoptou o *Princeton Ocean Model* (POM; [25]), um modelo hidrodinâmico de circulação oceânica e costeira, desenvolvido para representar realisticamente a física que descreve a evolução temporal dos oceanos em várias escalas, desde o oceano aberto até às escalas estuarinas. Trata-se de um modelo tridimensional, de equações primitivas- dependente do tempo que descrevem a dinâmica dos fluídos (equações de Navier-Stokes), resolvidas em esquemas de diferenças finitas. Ele possui superfície livre e um sistema de coordenada vertical que seguem o terreno (coordenada sigma).

O modelo foi formulado considerando algumas aproximações em suas equações (aproximações hidrostática e de Boussinesq). Uma descrição pormenorizada da formulação física (equações modeladas e submodelos incluídos) e matemática (discretizações numéricas) do modelo pode ser encontrada em Blumberg & Mellor [25]. É importante referir que o POM possui uma técnica de separação de modos resolver as estruturas 3D e 2D separadamente, o que o permite maior eficiência computacional. O código do POM usado neste trabalho é uma versão personalizada do código original, que inclui termos de geração de potencial de maré astronómica e um termo relaxação newtoniana para valores climatológicos dos campos temperatura e salinidade [26]. Os campos de saída do modo 3D do modelo incluem variáveis tridimensionais de temperatura, salinidade e correntes, e variáveis bidimensionais de elevação da superfície do mar, temperatura da superfície do mar, e velocidades verticalmente integradas. O modo 2D apenas fornece este último conjunto de variáveis. De qualquer, em ambos modos/versões (3D e 2D), apenas a elevação da superfície do mar é de interesse.

# 2.2. Configuração do modelo e definição dos experimentos



Figura 1. Área geográfica em que foi configurado o modelo, incluindo a batimetria usada (adaptado de Bié et al. [13]).

O domínio do modelo é apresentado na Figura 1, juntamente com a topografia do fundo oceânico (batimetria) obtida a partir do *Earth Topography Global Relief* com uma resolução espacial de 2-minutos de arco (ETOPO-2; [27]). Apesar deste estudo focar essencialmente na costa central de Moçambique, a extensão geográfica do domínio inclui uma larga porção do SWIO, de 2 a 32°S de latitude e 28 a 85°E de longitude, como em Bié et al. [13]. A razão para uma extensão tão grande é justificada pelo facto de serem necessários domínios maiores em algumas regiões para capturar com precisão alguns efeitos remotos e modos ressonantes da bacia oceânica que podem afectar a representação das marés nas áreas costeiras.

Neste estudo são simulados dois eventos de ciclones tropicais que ocasionaram marés meteorológicas na região costeira central de Moçambique, um devido ao ciclone tropical Lisette (fevereiro de 1997) e o outro ao ciclone tropical Idai (Março de 2019). Uma descrição detalhada destes dois ciclones pode ser encontrada em Bié [16] e Bié [20], respectivamente.

# a) Configurações para o ciclone Lisette

Para o caso do Lisette foram conduzidos quatro experimentos com configurações de modelo distintas. Os quatro experimentos foram feitos em grade (malha) regular com duas resoluções espaciais diferentes  $(1/6^{\circ} e 1/12^{\circ})$  em grade regular e dois modos diferentes (2D e 3D). As resoluções espaciais de  $1/6^{\circ}$  e de  $1/12^{\circ}$  são correspondentes a espaçamentos horizontais de 17 km e 8 km, respectivamente, nos pontos grade. Estas configurações de modelos e suas designações são conforme se apresenta abaixo:

(i) *POM-1/6-3D*: representa a configuração na grade de 1/6° (17 km) usando versão 3D do modelo;

(ii) *POM-1/6-2D*: representa a configuração na grade de 1/6° (17 km) usando versão 2D do modelo;

(iii) **POM-1/12-3D**: representa a configuração na grade de  $1/12^{\circ}$  (8 km) usando versão 3D do modelo;

(iv) **POM-1/12-2D**: representa a configuração na grade de  $1/12^{\circ}$  (8 km) usando versão 2D do modelo.

Nas simulações, em todas as configurações, foi imposta uma forçante atmosférica dada pelo vento (tensão de cisalhamento) a 10 m e gradientes de pressão ao nível do mar (SLP) a cada 6 horas, calculados dos dados obtidos da reanálise atmosférica *NCEP-Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR; [28]). As simulações cujas configurações incluem o modo 3D foram também impostas os fluxos (de radiação solar, sal e calores sensível e latente).

Além da forçante atmosférica, as simulações contam com forçante de marés astronómicas, que duas partes: (i) o potencial gerador de maré astronómica imposto em cada ponto de grade do domínio do modelo e (ii) elevações de maré astronómicas especificadas nas fronteiras abertas do domínio. As elevações incluem 12 componentes harmónicas de maré astronómica (Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2, M3, M4, MN4 e MS4) que foram obtidas a partir do modelo global de marés astronómicas *Topex/Poseidon Global Tidal Model* (TPXO; [29]) versão 7.2, com excepção da componente M3 que foi especificada no potencial gerador de maré astronómica.

As simulações foram inicializadas a partir informações oceânicas (elevação, temperatura, salinidade e correntes) provenientes dos campos médios mensais fornecidos pelo Simple Ocean Data Assimilation (SODA; [30]) versão 2.2.4. As condições oceânicas nas fronteiras abertas do domínio foram fornecidas pela mesma fonte.

Os experimentos foram conduzidos para todo o ano de 1997, mas apenas o período de ocorrência do Lisette foi considerado para análise.

### b) Configuração para o ciclone Idai

Para o caso do ciclone tropical Idai, apenas uma simulação foi conduzida. Com base nos resultados das simulações dos diversos experimentos para o caso do ciclone Lisette (conforme será discutido mais adiante), ficou definido que a melhor configuração para simular as marés meteorológicas era a *POM-1/12-2D*, devido a sua precisão e baixo custo computacional. Por isso, a estimativa da maré meteorológica para o caso do Idai foi feita usando esta configuração.

A simulação foi conduzida considerando a forçante atmosférica (tensão de cisalhamento do vento a 10 m e gradientes de pressão ao nível do mar) calculados a partir dos dados análise do modelo *Global Forecast System* (GFS). As forçantes das marés astronómicas permanecem as mesmas que as simulações do Lisette. As condições iniciais foram os campos médios climatológicos (30 anos) para o mês de Fevereiro, fornecidos também pelo SODA.

#### 2.3. Dados e métricas para avaliação das simulações

#### a) Dados do nível do mar

Os dados usados para avaliar as simulações são informações do nível do mar. Para a avaliação espacial (todo domínio simulado), foram comparadas as principais componentes harmónicas semidiurnas lunar (M2) e solar (S2) das marés astronômicas calculadas a partir das simulações com a referência dada do modelo global TPXO.

Para comparações em pontos específicos, os dados usados foram os do nível do mar medidos por marégrafo. Estes dados são horários e pertencentes ao Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação. Os dados do nível médio do mar medidos na costa contém informações tanto da maré meteorológica quanto da maré astronómica. Para separar estas informações uma filtragem é necessária. Para isso, feita uma análise harmónica usando o pacote T\_TIDE desenvolvido por Pawlowicz et al. [31]. Desta forma, as séries de marés meteorológicas correspondem às séries residuais (filtradas) dos dados do nível total de água na costa, após a remoção da maré astronómica.

#### b) Métricas estatísticas

Neste trabalho, as simulações são comparadas com a referência observacional usando algumas métricas estatísticas como o viés (*bias*) e o erro médio absoluto (*mean absolute error* – MAE) [32] e o índice de concordância (*skill*) [33] conforme as fórmulas abaixo:

$$vi\acute{e}s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (M_i - O_i) \tag{1}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |M_i - O_i|$$
 (2)

$$skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (|M_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$
(3)

onde M representa a informação fornecida pelo modelo e O a informação fornecida pela observação. O viés é uma medida de erro que permite-nos saber se uma dada quantidade está a ser subestimada ou superestimada pelo modelo. O MAE é uma medida de erro que nos fornece a magnitude do erro cometido pelo modelo; valores menores desta métrica são desejáveis. O *skill* (índice de concordância) é uma grandeza que fornece informações sobre a destreza do modelo em relação a opção. Valores ideais de MAE situam-se próximo da unidade, indicada um óptimo ajuste do modelo em relação à observação. Quanto mais distante da unidade os valores de *skill* estuverem, mais fraco é o desempenho do modelo.

### **III. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

#### 3.1. Representação da maré astronómica

As distribuições espaciais das amplitudes e fases das principais constituintes harmónicas semidiurnas (M2 e S2) da maré astronómica, de acordo com a representação dada pela referência do TPXO em comparação com as diversas configurações do modelo, estão ilustradas na Figura 2. É importante notar que para as simulações do modelo, apenas os resultados das configurações do modo 3D foram apresentadas, por estas não diferirem dos resultados das configurações do modo 2D (não ilustrado).

As maiores amplitudes, acima de 100 cm para a componente M2 (Figura 2; painel esquerdo) e acima 60 cm para componente S2 (Figura 2; painel direito) encontram-se distribuídas em uma faixa que se estende ao longo da costa sudeste africana, particularmente na região entre Moçambique e Madagáscar, enquanto que os menores valores encontram-se a sudeste de Madagáscar.

A intercomparação na representação espacial das componentes M2 e S2 pelos diferentes conjuntos relevam aspectos bastante similares, quase indistinguíveis em algumas regiões, conforme ilustra a Figura 2. Contudo, alguns aspectos chamam atenção, como as diferenças notadas na amplitudes das componentes na costa central de Moçambique, entre as latitudes 18°S a 21°S. Os resultados do TPXO apresentam um máximo de amplitude nas duas componentes (Figura 2a e 2b). Este máximo é subestimado configuração do modelo POM com 1/6º (16 km) de resolução. Nesta região, a configuração com resolução reduzida apresenta deficiências em representar a deformação e amplificação da maré astronómica (Figura 2c e 2d), conforme destacado por Bié et al. [13]. Esta deficiência na representação da deformação e amplificação da maré astronómica na região central da costa de Moçambique parece ser resolvida com uma resolução mais refinada da grade do modelo (Figura 2c e 2d), nesta configuração os resultados do modelo ilustram resultados consistentes com a referência do TPXO, onde a amplitude máxima da componente M2 atinge valores máximos, em torno de 180 cm. Esta melhoria na representação é também notável para componente S2.

O impacto do aumento da resolução na representação das marés astronómicas na região central de Moçambique pode

ser notada ao detalhe a partir das informações resumidas na Tabela 1, que ilustra os erros de amplitudes e fases das diferentes configurações do modelo em relação aos dados observados na estação da Beira. Para a componente M2, a configuração POM-1/6 (17 km de resolução) apresenta valores negativos do viés, sendo -0,35 m para o modo 3D e -0,33 m para o modo 2D, indicando subestimativa que representam um erro de 19% e 18%, para os dois modos, respectivamente, em relação ao valor observado de amplitude. Enquanto que para a configuração POM-1/12 (8 km de resolução) os vieses são positivos, 0,13 m para o modo 3D e 0,15 m para o modo 2D, representando um erro de 7% e 9% para os dois modos, respectivamente. É importante notar que enquanto as configurações de menor resolução (17 km) subestimam a amplitude, as de maior resolução (8 km) superestimam, contudo, este o erro das configurações de maior resolução é duas vezes menor que o erro das configurações de menor resolução, revelando melhorias substanciais na representação desta importante constituinte de maré astronómica na costa de Moçambique.

Em relação à constituinte S2 notam-se diferenças desprezíveis quando se comparam as diferentes configurações, com vieses percentuais que variam entre 14% (para POM-1/12) até 17% (para POM-1/6), revelando que tanto o aumento da resolução quanto a escolha do modo

(3D ou 2D) tiveram efeitos mínimos na melhoria da representação da componente S2. Para as componentes diurnas (O1 e K1) os erros (vieses) dos modelos são ainda mais expressivos (superiores a 40%), não sendo distinguível algum padrão de melhoria (Tabela 1).

Para a representação das fases, melhorias significativas são notadas nas configurações de resolução aumentada (POM-1/12), particularmente para as componente semidiurnas (M2 e S2). Para as componentes diurnas, as variações na configuração parecem ter efeitos mínimos. De modo geral, o modelo apresenta vieses negativos para maior parte das componentes, sugerindo a maré astronómica representada pelo modelo adianta ligeiramente.

Com estes resultados, em termos de amplitude, nota-se, principalmente, que a componente M2 é a que apresenta melhoramentos substanciais com o aumento da resolução do modelo. Contudo, como esta componente é a de maior amplitude (1,8 m), sua melhoria implica em melhorias significativas na representação da maré astronómica de modo geral, tal como ilustra a Figura 3. Com a configuração de baixa resolução (Figura 3a; painel superior) o desajuste na representação da maré é notável, não sendo este desajuste detectável na configuração com resolução melhorada (Figura 3b; painel inferior).



Figura 2. Mapas da distribuição espacial das amplitudes (sombreados; em cm) e fases (contornos; °) das principais constituintes harmónicas de semidiurnas lunar M2 (painel esquerdo; **a**, **c**, **e**) e solar S2 (painel direito; **b**, **d**, **f**) da maré astronómica, conforme representação do TPXO (**a**, **b**), POM-1/6-3D (**c**, **d**) e POM-1/12-3D (**e**, **f**).

amplitude observada).								
	M2		S2		01		K1	
	Amplitude (m)	Fase (°)	Amplitude (m)	Fase (°)	Amplitude (m)	Fase (°)	Amplitude (m)	Fase (°)
	Observação							
	1,82	28,55	1,03	138,49	0,02	287,38	<0,01	298,70
Configuração	Viés do modelo (viés percentual)							
POM-1/6-3D	-0,35 (19%)	-16,81	-0,18 (17%)	-19,88	<0,01 (44%)	2,37	<-0,01 (57%)	-185,22
POM-1/6-2D	-0,33 (18%)	-16,05	-0,16 (16%)	-19,21	<0,01 (46%)	1,44	<-0,01 (66%)	-178,13
POM-1/12-3D	0,13 (7%)	-4,73	0,14 (14%)	-6,19	<0,01 (59%)	6,59	<-0,01 (64%)	-154,91
POM-1/12-2D	0,15 (9%)	-0,78	0,15 (14%)	-0,57	<0,01 (55%)	9,40	<-0,01 (59%)	-149,71

Tabela 1. Amplitudes e fases das principais constituintes harmónicas diurnas (O1 e K1) e semidiurnas (M2 e S2) na estação da Beira e os respectivos vieses do modelo em função de sua configuração. Os valores em parênteses representam o viés percentual (normalizado pela amplitude observada).

# 3.2. Representação da maré meteorológica devido ao ciclone tropical Lisette

Nesta subsecção é avaliada a habilidade das diferentes configuração do modelo em representar o nível residual do mar, particularmente em eventos extremos, como ciclones tropicais. O caso do ciclone tropical Lisette foi seleccionado por ser um dos raríssimos casos em que existem informações



Figura 3. Série temporal do nível do mar na estação da Beira conforme representação da observação (linha sólida preta) e do modelo (pontos azuis), de acordo com as configurações POM-1/6-3D (painel superior) e POM-1/12-3D (painel inferior). O eixo vertical representa a elevação (em metros) em relação ao nível médio do mar e o eixo horizontal o tempo (dias de Fevereiro de 1997).

observadas para comparar com as simulações do modelo. O Lisette foi um ciclone de intensidade moderada (categoria 1 na escala de *Saffir-Simpson*), tendo se formado sobre o continente na região central/norte de Moçambique a 25 de Fevereiro de 1997 moveu-se para oceano e posteriormente para a costa central de Moçambique, tendo penetrado o continente no dia 02 de Março pela cidade da Beira com intensidade de tempestade tropical, conforme ilustra a Figura 4.



Figura 4. Mapa com as trajectórias e intensidades dos ciclones tropicais Lisette (1997) e Idai (2019), de acordo com os dados obtidos do RSMC-LR. O triângulo vermelho indica a posição da estação da Beira



Figura 5. Séries temporais do nível do mar residual para o ano de 1997 na estação da Beira, conforme representação da observação e das diferentes configurações do modelo. Os painéis à direita representam uma ampliação das áreas sombreadas nos painéis à esquerda.

A Figura 5 ilustra as séries temporais residuais representadas pela observação, quanto pelas diferentes configurações do modelo para todo o ano de 1997, onde o efeito do ciclone Lisette encontra-se inserido.

Conforme destacado por Bié et al. [13], mesmo com a configuração de menor resolução, o modelo é capaz de representar com boa concordância a variabilidade do nível do mar, causada por diferentes fenómenos. As diferentes configurações do modelo mostram um padrão de evolução similar em suas séries temporais, o que não é surpreendente, uma vez que todas as simulações foram conduzidas usando exactamente a mesma forçante atmosférica. Contudo, a representação de alguns picos estão mais expressivos que algumas séries temporais que noutras, revelando ligeiras diferenças entre as configurações (Figura 5).



Figura 6. Diagrama polar com a distribuição conjunta de MAE (erro absoluto médio; semicírculos com o centro na origem) e do *skill* (índice concordância; rectas que emanam da origem) das várias configurações do modelo em relação à observação.

Para avaliar essas diferenças, a Figura 6 mostra a distribuição conjunta do erro médio absoluto (MAE) e do *skill* (índice de concordância). Todas as configurações mostram desempenhos parecidos, com valores de *skill* em torno de 0,8; contudo é notável que as configurações 3D tendem a apresentar desempenhos ligeiramente melhores, com valores de skill levemente acima de 0,8. Em termos de erro médio, os valores de todas as configurações encontram-se entre 0,06 m a 0,08 m, revelando similaridades entre elas, embora a configuraçõe POM-1/12-3D mostra o maior valor (mais próximo de 0,08 m).

Com relação à sobre-elevação do nível médio do mar causada pelo ciclone Lisette, as Figuras 5b e 5d mostram com detalhe a comparação da simulação das diferentes configurações do modelo com a referência observacional. A observação mostra que o Lisette provocou uma sobrelevação de 0,73 m em relação ao nível médio.do mar durante o pico. As simulações feitas com as 4 configurações conseguem reproduzir esta sobre-elevação, mas cada uma delas com a sua peculiaridade. Todas as simulações apresentam o horário de pico do desfasado em entre 2 até 5 horas, com todos a antecederem a o horário de ocorrência. Quase todas as simulações (3 das 4) subestimaram o pico da sobre-elevação em alguns centímetros. A simulação com a configuração POM-1/6-3D apresentou uma sobre-elevação de 0,53 m, sendo a que mais subestima (0,10 m) o pico do evento, seguida da configuração POM-1/6-3D com 0,67 m de sobre-elevação, subestimando o pico em 0,05 m (Figura 5b). A simulação com o POM-1/12-3D apresentou uma sobre-elevação de 0,82 m, sendo a única simulação que superestimou (0,09 m) o pico do evento (Figura 5c). A simulação POM-1/12-2D apresentou uma sobre-elevação de 0,69 m, subestimando o pico em 0,04 m (Figura 5c).

Com base nos resultados descritos acima, é possível notar que: (i) para uma mesma resolução espacial (1/6º ou 1/12º), as sobre-elevações produzidas pelas configurações no modo 3D tendem a apresentar picos superiores que àqueles das configurações no modo 2D e (ii) para um mesmo modo (2D ou 3D), a configuração com maior resolução espacial tende a apresentar picos de sobre-elevação maiores.

Este comportamento pode ser explicado pelo seguinte:

(i) por um lado, para um mesmo modo, a resolução desempenha um factor crucial. O aumento da resolução espacial conduz a uma representação mais realística das feições batimétricas, que influenciam directamente na acurácia do modelo, tal como notou-se no caso das marés astronómicas da apresentado na subsecção 3.1. Existe uma interação não linear entre as marés astronómicas e a maré meteorológica, e nesta região esta interacção age no sentido de incrementar ainda mais o pico da sobre-elevação, conforme os resultados de Bié et al. [13]. Eventualmente, quanto maior a maré astronómica, maior será impacto desta interação no pico da maré meteorológica. Isto justifica o facto de configurações com maior resolução possuírem picos maiores pois a maré astronómica também possui maior amplitude nestas configurações. E (ii), para uma mesma resolução, diferentes modos (2D ou 3D) reproduzem de formas distintas a sobre-elevação, provavelmente, devido a aos efeitos de dinâmica e termodinâmica interna do oceano. Embora pouco, efeitos termohalinos podem produzem diferenças na superfície do mar devido a fenómenos como estratificação e expansão térmica do oceano, características que são reproduzidas apenas na configuração 3D, onde toda a estrutura vertical do oceano é considerada na solução.

De modo geral, nota-se que, em relação à representação do pico da sobre-elevação do nível do mar relacionado ao ciclone Lisette, as configurações POM-1/6-3D e POM-1/12-2D apresentaram os melhores desempenhos, com diferenças de amplitude bastante próximas, contudo a configuração POM-1/12-2D foi a que representou o pico com a menor desfasagem (2 horas) em termos de horário de ocorrência em relação observação e a que melhor representa a maré astronómica, sendo assim a que melhor reproduz o nível total de água (conjugação da maré astronómica e da maré meteorológica e de suas interações). Por isso, esta última configuração foi usada para estimar a maré meteorológica e o nível total de água relacionados ao devastador ciclone tropical Idai, cujos resultados são apresentados a seguir.

# **3.3.** Estimativa da maré meteorológica devido ao ciclone tropical Idai

Nesta subsecção é usada a configuração POM-1/12-2D para estimar o nível residual (maré meterológica) e total do mar, causado pelo ciclone tropical Idai na estação da Beira. O Idai foi um ciclone tropical intenso (categoria 3 na escala de *Saffir-Simpson*). Ele formou-se sobre o Canal de Moçambique, próximo a costa central de Mozambique (Província da Zambézia) sobre o continente a 04 de Março de 2019. Fez sua trajectória inicial para o continente, de onde retornou para o oceano, seguindo para este em direcção a Madagáscar, tendo revertido sua trajectória novamente para o oeste/sudoeste em direcção a costa central de Moçambique, onde adentrou o continente no dia 15 de Março pela cidade da Beira com uma intensidade de ciclone tropical (categoria 2), conforme ilustra a Figura 4. Informações detalhadas do histórico de evolução do Idai podem ser encontradas em Bié (2022).

A Figura 7 representa as séries temporais do nível do mar reproduzido pela configuração POM-1/12-2D, entre Janeiro e Abril de 2019. A subida e descida regular do nível do mar na costa, dominado pela maré astronómica, é o padrão mais notável na Figura 7c.

Um pico expressivo pode ser tanto no nível do mar residual (Figura 7a) quanto no nível total (Figura 7c). A estimativa do modelo sugere que o ciclone tropical Idai foi responsável por uma sobre-elevação do nível médio do mar (maré meteorológica) de cerca de 4,34 m às 20 horas do dia 14 de Março (Figuras 7a e 7b). Considerando o nível da maré meteorológica e o da maré astronómica, o nível total de água atingiu cerca de 5,62 m de acordo com as estimativas do modelo (Figuras 7c e 7d).



Figura 7. Séries temporais do nível do mar residual (a e b) e total (c e d) na estação da Beira, de acordo com a estimativa do POM-1/12-2D. As áreas sombreadas em cinzento destacam o efeito do Idai sobre o nível do mar. Os painéis (b) e (d) são uma ampliação das áreas sombreadas em cinzento.

Como se pode notar pelas Figuras 7c e 7d, embora o pico da maré meteorológica tenha ocorrido enquanto o nível da maré astronómica prosseguia em direcção a uma baixa-mar (maré baixa) de uma maré astronómica maré morta (quadratura), o Idai conseguiu sobre-elevar o nível total de água (5,62 m) muito além do nível total que uma preia-mar (maré alta) de uma maré astronómica viva (sizígia) é capaz de produzir (menos de 4 m). O resultado foi uma inundação costeira generalizada na região, responsável pela situação catastrófica testemunhada em Março de 2019, que coloca este sistema como um dos mais destrutivos ciclones tropicais que se tem registo no Hemisfério Sul (ver [10], [11] e referências afim).

Infelizmente, informações observacionais do nível do mar não estão disponíveis nesta região para validar as presentes simulações para o interessante caso do ciclone Idai. Não obstante, comparações com resultados de esforços anteriores revelam alguma concordância com trabalhos como de Probst & Annunziato [34], cuja simulação produziu uma estimativa 4,4 m de maré meteorológica. Apesar de não possuir dados para sua validação, o resultado da estimativa da maré meteorológica, devido ao Idai, usando o POM-1/12-2D pode ser dado algum crédito se se considerar o desempenho do modelo POM em simular casos anteriores como o do Lisette, apresentado mais acima, além de outros casos exposto em Bié [20], onde o modelo teve concordância aceitável com as observações.

#### **IV. CONCLUSÕES**

O presente trabalho avaliou a habilidade de algumas configurações, baseadas no modelo oceânico POM, em reproduzir a maré meteorológica e maré astronómica na região costeira central de Moçambique, focando no caso de um ciclone tropical, como estudo de caso. Os resultados levam a concluir que o aumento da resolução espacial do modelo é crucial para uma melhor representação da maré astronómica, e consequentemente, dos níveis totais de água durante a ocorrência de eventos de marés meteorológicas.

A comparação entre os resultados das simulações usando as diferentes configurações, para o caso do ciclone Lisette, forneceu subsídios para a escolha da melhor configuração a ser usada na estimativa da maré meteorológica devido ao emblemático caso do ciclone tropical Idai. Destas, duas configurações emergiram: POM-1/6-3D e POM-1/12-2D. A última foi seleccionada por apresentar os melhores resultados, tanto para a maré meteorológica quanto para maré astronómica, revelando melhor concordância entre a simulação e a observação. Esta configuração, apesar de possuir maior resolução espacial (8 km) em relação a outra (POM-1/6-3D; 16 km), ela é computacionalmente mais eficiente, pelo facto de apenas a estrutura bidimensional do oceano estar a ser resolvida pelo modelo. Isto reforça suas vantagens para uma potencial utilização operacional.

Devido a ausência de dados observados, a estimativa de maré meteorológica para o caso do Idai não pôde ser validada, o que constitui uma das fraquezas desta simulação. Validações indirectas podem ser assumidas considerando o desempenho do modelo em simular outros casos em que existem informações observacionais. Ainda assim, a quantidade de tais casos é insuficiente para estabelecer, com consistência, a acurácia do modelo. Outra fraqueza, é o facto de as estimativas da sobre-elevação do nível do mar estarem limitadas a pontos oceânicos, não sendo possível saber a extensão das áreas de inundação baseando-se apenas nos resultados destas simulações.

Mesmo com estas fraquezas, os resultados deste esforço fornecem subsídios importantes sobre as potencialidades desta ferramenta para monitorização e previsão de marés meteorológicas na costa de Moçambique. Em casos operacionais, os resultados das simulações deste modelo podem ser usadas para gerar informações que podem ser cruciais para os sistemas de aviso prévio, ajudando a minimizar as perdas durante a aproximação de ciclones tropicais na costa Moçambicana, particularmente a sua porção central: a que mais sofre impactos.

# AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao laboratório MASTER do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas por disponibilizar a infraestrutura computacional onde o foram realizadas as simulações usadas neste trabalho. Os autores agradecem também ao revisor anónimo por seus comentários e sugestões, que ajudaram a melhorar o manuscrito final.

# REFERÊNCIAS

[1] Mavume A, Rydberg L, Rouault M, Lutjeharms J (2009) Climatology and landfall of tropical cyclones in the south-West Indian Ocean.West Indian Ocean J Mar Sci 8(1):19–39. https://doi.org/10.4314/wiojms.v8i1.56672;

[2] Griffin, K. S., & Bosart, L. F. (2014). The Extratropical Transition of Tropical Cyclone Edisoana (1990). *Monthly Weather Review*, *142*, 2772–2793. <u>https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00282.1</u>

[3] Bié, A. J., & de Camargo, R. (2023). Tropical cyclones position and intensity in the Southwest Indian Ocean as represented by CFS and ERA5 atmospheric reanalysis datasets. *International Journal of Climatology*, *43*(10), 4532-4551.

[4] Reason CJC, Keibel A (2004) Tropical cyclone Eline and its unusual penetration and impacts over the southern African mainland. *Weather Forecast* (19), 789–805

[5] Klinman MG, Reason CJC (2008) On the peculiar storm track of TC Favio during the 2006-2007 Southwest Indian Ocean tropical cyclone season and relationships to ENSO. *Meteorog Atmos Phys* (100), 233–242. <u>https://doi.org/10.1007/s00703-008-0306-7</u>

[6] Reason CJC (2007) Tropical cyclone Dera, the unusual 2000/01 tropical cyclone season in the south West Indian Ocean and associated rainfall anomalies over southern Africa. *Meteorog Atmos Phys*, (97),181–188. <u>https://doi.org/10.1007/s00703-006-0251-2</u>

[7] Chikoore, H., Vermeulen, J. H., & Jury, M. R. (2015). Tropical cyclones in the Mozambique channel: January–March 2012. *Natural Hazards*, *77*, 2081-2095.

[8] Matyas, C.J. (2015) Tropical cyclone formation and motion in the Mozambique Channel. *International Journal of Climatology*, (35), 375–390. Available from: <u>https://doi.org/10.1002/joc.3985</u>

[9] Leroux, M.D., Meister, J., Mekies, D. & Dorla, A.L. (2018) A climatology of Southwest Indian Ocean tropical systems: their number, tracks, impacts, sizes, empirical maximum potential intensity, and intensity changes. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 57, 1021–1041. Available from: https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0094.1

[10] Devi, S. (2019) Cyclone Idai: 1 month later, devastation persists. *Lancet*, 393(10181), 1585. <u>https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30892-X</u>

[11] WMO. (2019) Reducing vulnerability to extreme hydrometeorological hazards in Mozambique after cyclone IDAI. Geneva: WMO. Available from: <u>https://library.wmo.int/doc\_num.php?explnum\_id=6259</u>, Accessed date September 16, 2021.

[12] Liu, H. Y., Satoh, M., Gu, J. F., Lei, L., Tang, J., Tan, Z. M., ... & Xu, J. (2023). Predictability of the Most Long-Lived Tropical Cyclone Freddy (2023) During Its Westward Journey Through the Southern Tropical Indian Ocean. *Geophysical Research Letters*, *50*(20), e2023GL105729. [13] Bié, A.J., Camargo, R., Mavume, A.F. & Harari, J. (2017) Numerical modeling of storm surges in the coast of Mozambique: the cases of tropical cyclones Bonita (1996) and Lisette (1997). *Ocean Dynamics*, 67(11), 1443–1459. https://doi.org/10.1007/s10236-017-1095-7

[14] Eilander, D., Couasnon, A., Sperna Weiland, F. C., Ligtvoet, W., Bouwman, A., Winsemius, H. C., & Ward, P. J. (2023). Modeling compound flood risk and risk reduction using a globally applicable framework: a pilot in the Sofala province of Mozambique. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(6), 2251-2272

[15] INGC (2009) Main report: INGC Climate Change Report: Study on the Impact of Climate Change on Disaster Risk in Mozambique.[Asante K, Brundrit G, Epstein P, Fernandes A, Marques MR, Mavume A, Metzger M, Patt A, Queface A, Sanchez del Valle R, Tadross M, Brito R (eds.)]. INGC, Mozambique.

[16] Bié, A. J. (2022). Ciclones tropicais no Sudoeste do Oceano Índico: representação em reanálises atmosféricas e experimentos de sensibilidade com modelo regional acoplado. Tese de Doutoramento, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

[17] Nehama FPJ, Reason CJC (2015) Modelling the Zambezi River plume. Afr J Mar Sci 27(4):593–604. https://doi.org/10.2989/1814232X.2015.1113202

[18] Chevane CM, Penven P, Nehama FPJ, Reason CJC (2016)Modelling the tides and their impacts on the vertical stratification over the Sofala Bank, Mozambique. Afr J Mar Sci 38(1):1–15. <u>https://doi.org/10.2989/1814232X.2016.1236039</u>

[19] Nzualo, T. N., Gallo, M. N., & Vinzon, S. B. (2018). Shortterm tidal asymmetry inversion in a macrotidal estuary (Beira, Mozambique). *Geomorphology*, *308*, 107-117

[20] Bié, A. J. (2017). *Estudo numérico de marés meteorológicas na costa de Moçambique*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

[21] Canhanga S, Dias JM (2005) Tidal characteristics of Maputo Bay, Mozambique. J Mar Syst 58:83–97. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2005.08.001

[22] Miguel, L. L. A. J., Castro, J. W. A., & Nehama, F. P. J. (2017). Tidal impact on suspended sediments in the Macuse estuary in Mozambique. *Regional Studies in Marine Science*, *16*, 1-14.

[23] Muis, S., Verlaan, M., Winsemius, H. C., Aerts, J. C., & Ward, P. J. (2016). A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nature communications*, 7(1), 11969

[24] Chang-Seng DS, Jury MR (2010) Tropical cyclones in the SW Indian Ocean. Part 2: structure and impacts at the event scale. Meteorog Atmos Phys 106:163–178. https://doi.org/10.1007/s00703-010-0059-y

[25] Blumberg AF, Mellor GL (1987) A description of a threedimensional coastal ocean circulation model. In: Heaps NS (Ed.), Three- Dimensional Coastal Ocean Models vol. 4 American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 1–16

[26] Camargo, R. De, & Harari, J. (2014). Tides and Wind-Driven Circulation in the Tropical and Southern Atlantic Ocean : The BRAZCOAST System Tides and Wind-Driven Circulation in the Tropical and Southern Atlantic Ocean : The BRAZCOAST System. *Atmospheric and Ocean Science Letters*, 7(5), 476–480. http://doi.org/10.3878/j.issn.1674-2834.14.0013

[27] Smith WHF, Sandwell D (1997) Global Sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 2,1956–1962

[28] Saha S, Moorthi S, Pan HL, Wu X, Wang J, Nadiga S et al (2010) The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull Am Meteorol* Soc 91:1015–1057. <u>https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1</u>

[29] Egbert GD, Bennett AF, Foreman MGG (1994) TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model. J Geophys Res 99:821–852

[30] Carton JA, Giese BS (2008) A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA). Mon Weather Rev 136:2999–3017. <u>https://doi.org/10.1175/2007MWR1978.1</u>

[31] Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S (2002) Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE. Comput Geosci 28:929–937

[32] Wilks DS (2011) Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, 3rd ed (vol 100). Academic Press, San Diego, California

[33] Willmot CJ, Ackleson SG, Davis RE, Feddema JJ, Klink KM, Legates DR et al (1985) Statistics for the evaluation and comparison of models. J Geophys Res 90(5):8995–9005

[34] Probst, P., & Annunziato, A. (2019). Tropical Cyclone IDAI: Analysis of the wind, rainfall and storm surge impact. *European Commission Joint Research Center*.