



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

ESCOLA SUPERIOR DE CIÊNCIAS MARINHAS E COSTEIRAS

Dissertação de Mestrado em Oceanografia Aplicada

**MODELAGEM NUMÉRICA DA DINÂMICA DA MARÉ NO ESTUÁRIO
DOS BONS SINAIS**

Banito Bene Magestade

Quelimane, Janeiro de 2021



ESCOLA SUPERIOR DE CIÊNCIAS MARINHAS E COSTEIRAS

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestrado em
Oceanografia Aplicada

**MODELAGEM NUMÉRICA DA DINÂMICA DA MARÉ NO ESTUÁRIO
DOS BONS SINAIS**

Autor:

Supervisor:

(Lic. Banito Bene Magestade)

(Prof. Doutor Fialho P. J. Nehama)

Co-supervisor:

(Mestre Teófilo M. P. F João)

Quelimane, Janeiro de 2021

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à Deus Elohim por me haver dado saúde e ânimo para prosseguir com os meus estudos;

Em segundo lugar, agradeço à minha esposa Nura Cipriano, minha filha Claydine Cipriano Magestade, minha sobrinha Mariano António, assim como aos meus pais, Domingos Magestade Chaguruca e Chica Razão Bene, e irmãos, Hipólito, Celina, Baptista, Izilda e Atanásio, pela compreensão, paciência, encorajamento e tolerância nos momentos mais difíceis ao longo desta jornada;

Seria um descuido não endereçar meus profundos agradecimentos à família de Sião de Quelimane pelo indizível amor e aconchego desde o primeiro dia até hoje.

Ao meu supervisor, Prof. Doutor Fialho P. J. Nehama e Co-supervisor, MSc. Teófilo M. P. F. João, pela orientação, paciência, compreensão, amizade, encorajamento e apoio, apresento o meu muitíssimo obrigado;

De referir que esta jornada que termina com este trabalho contou com o contributo directo/indirecto de diferentes órgãos e colaboradores da Universidade Eduardo Mondlane, Corpo Técnico e Administrativo e Docentes, em especial ao MSc. Noca B. Furaca, a quem apresento o meu sincero agradecimento;

De um modo especial, endereço sinceros agradecimentos a todos os Docentes que ministraram este curso de Mestrado em Oceanografia Aplicada, pela dedicação, compreensão, amizade e paciência, com o objectivo de lapidação;

Aos meus colegas do Mestrado em particular aos de classe, Carlota Alves, Cristécio Mundulai, Anabela Cafermane, Humberto Mabota, pela atmosfera criada, muito embora, de forma geral, já estivéssemos juntos antes do Mestrado, vão os meus sinceros agradecimentos.

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Banito Bene Magestade, declaro que esta Dissertação nunca foi apresentada para a obtenção de qualquer grau ou num outro âmbito, que a mesma constitui o culminar do meu labor individual. Esta Dissertação é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Oceanografia Aplicada, na Universidade Eduardo Mondlane, pela Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras.

(Lic. Banito Bene Magestade)

RESUMO

A dinâmica da maré nos estuários ou simplesmente hidrodinâmica estuarina é regida basicamente por três factores, a descarga do rio, as correntes de maré e a tensão do vento, sujeita a modificações pela rotação da Terra e pela batimetria e geometria do estuário. Deste modo, o objectivo da presente pesquisa é de compreender as variações na dinâmica da maré no estuário dos Bons Sinais com ênfase nas variações/modificações da onda da maré devidas a interacção desta com a batimetria e geometria estuarina enquanto a maré se propaga estuário acima. Para tal, foi simulada a hidrodinâmica do estuário dos Bons Sinais para um período de 30 dias usando o modelo de circulação de circulação hidrodinâmica tridimensional ELCOM (*Estuary Lake and Coastal Ocean Model*), configurado com dados *in situ* e remotos. Depois seguiu-se o processo de validação dos resultados do modelo ELCOM onde a maré e a corrente de maré produzidas pelo modelo foram comparadas às medições de campo. Para analisar a dinâmica da onda de maré decorrente da interacção com a batimetria e geometria estuarina, foi usado o pacote *t_tide* (Pawlowicz *et al.*, 2002), para remoção da componente da onda de maré resultante de outros factores. Resultados da validação do modelo ELCOM indicaram uma boa aproximação da realidade, com *RMSE* (*Root Mean Square Error*) de 0.03 e 0.2, e R^2 (*Squared Correlation Coefficient*) de 0.99 e 0.77, para a altura e corrente de maré, respectivamente. De acordo com os resultados inerentes aos factores morfológicos, a convergência das margens e o atrito do fundo, há zonas ao longo do estuário classificadas como hipossincrônicas (atenuação da onda de maré) e zonas classificadas como hipersincrônicas (amplificação da onda de maré). Para a assimetria os resultados mostraram dominância da combinação M_2 e M_4 , seguida de S_2 e S_4 , caracterizada, no geral, pela dominância de vazante. Por último, a dissipação da energia da maré ao longo do estuário está associada às correntes, as quais mostram, no geral, uma relação directa com a largura da secção transversal, sugerindo dessa forma menor influência do atrito do fundo a dissipação da energia de maré.

Palavras-chave: Hidrodinâmica estuarina, Batimetria e geometria estuarina, Modelo ELCOM, Estuário dos Bons Sinais, Marés e correntes de maré.

ABSTRACT

The tidal dynamics in the estuaries or simply estuarine hydrodynamics are basically governed by three factors, the discharge of the river, the tidal currents and the wind tension, subject to changes by Earth's rotation by bathymetry and estuarine geometry. In this way, the aim of the present research is to understand the variations in tidal dynamics in the Bons Sinais estuary with emphasis on the variations/modifications of tidal wave due to its interaction with the bathymetry and estuarine geometry while the tide propagates up estuary. For this purpose, the hydrodynamics of the Bons Sinais estuary was simulated for a period of 30 days using the three-dimensional hydrodynamic circulation model ELCOM (*Estuary Lake and Coastal Ocean Model*), set up with both in situ and remote data. Then, the process of validation of the ELCOM model results was performed, in which the tide and tidal current produced by the model were compared to field measurements. In order to analyze the dynamics of the tidal wave resulting from the interaction with the bathymetry and estuarine geometry the t_tide package (Pawlowicz et al., 2002) was used to remove the non-tidal component which comes from other factors. Results from the validation of the ELCOM model indicated a good approximation to reality, with calculated RMSE (*Root Mean Square Error*) of 0.03 and 0.2, and R^2 (*Squared Correlation Coefficient*) of 0.99 and 0.77, for height and tidal current, respectively. According to the results related to morphological factors, the convergence of the margins and the friction of the bottom, there are zones along the estuary classified as hyposynchronous (attenuation of the tidal wave) and other ones classified as hypersynchronous (amplification of the tidal wave). For tidal asymmetry, the results showed dominance of the M_2 and M_4 combination, followed by S_2 and S_4 combination, characterized, in general, by ebb dominance. Finally, the dissipation of tidal energy along the estuary is associated with currents, which show, in general, straight relation with the width of the cross section, thus suggesting less influence of bottom friction in tidal energy dissipation.

Keywords: Estuarine hydrodynamic, Bathymetry and estuarine geometry, ELCOM Model, Bons Sinais Estuary, Tides and tidal currents.

LISTA DE ABREVIATURAS

ELCOM	Estuary Lake and Coastal Ocean Model
INAHINA	Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação
TMD	Tide Model Driver
INAM	Instituto Nacional de Meteorologia
RMSE	Root Mean Square Error
AMSDS	Amplitude máxima da maré semidiurna com contribuição diurna, na sizígia
AMSDQ	Amplitude máxima da maré semidiurna com contribuição diurna, na quadratura
TVA	Taxa de variação de amplitude

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo com o ponto de colecta de dados de maré (triângulo).	5
Figura 2: Médias mensais das descargas do rio Licuari referentes a uma série temporal de 11 anos, 1961-81.....	6
Figura 3: Médias mensais da precipitação na Cidade de Quelimane ao longo de 30 anos, 1987-2016. 8	
Figura 4: Médias mensais da intensidade do vento ao longo do estuário dos Bons Sinais para o ano de 2011	8
Figura 5: Configuração melhorada do ELCOM, apresentando os dois rios.	11
Figura 6: Resultado da calibração qualitativa do modelo ELCOM, aplicada à maré na boca do estuário dos Bons Sinais.....	16
Figura 7: Resultado da calibração qualitativa do modelo ELCOM, aplicada à corrente de maré na boca do estuário dos Bons Sinais.	17

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Conjunto de dados obtidos através de medições in situ e remotas usados para configurar o modelo ELCOM.....	10
Tabela 2: Combinações usadas para aferir o contributo de cada combinação na assimetria total da maré.....	14
Tabela 3: Performance do ELCOM de 1 e 15 dias para maré e correntes.	18
Tabela 4: Taxa de variação da amplitude máxima da elevação da maré ($m km^{-1}$) e corrente de maré ($m s^{-1} km^{-1}$) de 30 dias entre estações ao longo do estuário dos Bons Sinais.	20
Tabela 5: Contribuição de cada combinação na γ_N calculada a partir de dados horários de elevação de maré, de 30 dias ao longo do estuário dos Bons Sinais.....	20
Tabela 6: Dissipação da energia da maré ($W m^{-2}$) e taxa de dissipação ($W m^{-2} km^{-1}$) ao longo do estuário dos Bons Sinais, num período de 30 dias.....	21

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Root Mean Square Error.....	12
Equação 2: Squared Correlation Coefficient.....	12
Equação 3: Amplitude máxima da maré semidiurna com contribuição diurna na sizígia.	13
Equação 4: Amplitude máxima da maré semidiurna com contribuição diurna na quadratura	13
Equação 5: Taxa de variação da maré entre duas estações.	13
Equação 6: Assimetria da maré de dois constituintes harmônicos relacionados.	13
Equação 7: Assimetria da maré de três constituintes harmônicos relacionados.	13
Equação 8: Contribuição da combinação de dois constituintes na assimetria total da maré	14
Equação 9: Contribuição da combinação de três constituintes na assimetria total da maré.	14
Equação 10: Assimetria total da maré.....	14
Equação 11: Dissipação da energia da maré.	15

Índice

AGRADECIMENTOS	i
DECLARAÇÃO DE HONRA	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE ABREVIATURAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE EQUAÇÕES	viii
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objectivos	4
2. CAPÍTULO II: METODOLOGIA	5
2.1. Localização e descrição da área de estudo	5
2.2. Material	8
2.3. Métodos	11
2.3.1. Configuração do ELCOM ao estuário dos Bons Sinais	11
2.3.2. Importância dos factores morfológicos na elevação da maré e corrente de maré	12
2.3.3. Distorção da maré	13
2.3.4. Impacto da fricção do fundo na perda da energia da onda da maré	14
3. CAPÍTULO III: RESULTADOS	16
3.1. Configuração do ELCOM ao estuário dos Bons Sinais	16
3.2. Elevação e corrente de maré	18
3.3. Distorção da maré	18
3.4. Impacto da fricção do fundo na perda da energia da onda da maré	19
4. CAPÍTULO IV: DISCUSSÃO	22
5. CAPÍTULO V: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	30
5.1. Conclusões	30
5.2. Recomendações	30
6. Referências bibliográficas	31
7. Apêndices	35

1. CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO E OBJECTIVOS

1.1. Introdução

A definição mais conhecida de um estuário é a sugerida por Cameron e Pritchard (1963), que considera um estuário como sendo um corpo de água costeiro semifechado, com uma conexão livre com o oceano aberto e dentro do qual as águas oceânicas são mensuravelmente diluídas pela água doce da drenagem continental (Dyer, 1997; Dolgoplova e Isupova, 2010; Paula e Silva 2014). Entretanto, este conceito não toma em consideração a influência da maré, sendo que o alcance da onda de maré rio acima ultrapassa o limite da intrusão salina. Dione (1963) enfatizou o efeito da maré definindo o estuário como sendo uma entrada do oceano rio acima que se estende até ao limite superior da elevação da maré, sendo dividido em três sectores: a) marinho ou baixo estuário, com conexão livre com o oceano aberto; b) médio estuário, sujeito a fortes misturas de água doce e salgada; e c) superior ou estuário fluvial, caracterizado pela água doce mas sujeito a acção diária da maré (Dyer, 1997). Conhecer os padrões de circulação estuarina é importante para se compreender os processos físicos, químicos, biológicos e sedimentológicos desses sistemas, principalmente considerando a sua importância ambiental, económica e social decorrente do facto dos estuários serem uma zona de confluência de águas fluviais e marinhas. A circulação da água nos estuários e os processos de mistura que dela resultam condicionam a distribuição e o transporte de parâmetros ambientais no sistema, como nutrientes, poluentes, salinidade e sedimentos.

Pelo facto dos estuários serem os únicos sistemas aquáticos onde ocorre a interacção dinâmica entre as águas doces e marinhas, e os sistemas terrestre e atmosfera, estabelece-se uma circulação que é regida basicamente por três factores: a descarga do rio, as correntes de maré e a tensão do vento (Pond e Pickard, 1983; Segundo, 2007; Paula e Silva, 2014). A descarga do rio induz a circulação gravitacional que é causada por diferenças de densidade entre a água doce e a água do mar, dando origem a gradientes verticais e longitudinais de densidade nos corpos de água costeiros. Os ventos actuam na interface ar-água, criando camadas bem misturadas, turbulentas e correntes superficiais, enquanto as correntes de maré actuam em toda coluna de água dando origem a circulação residual estuarina (Segundo, 2007; Paula e Silva, 2014).

Esta circulação pode ser modificada pela rotação da Terra e pela topografia e geometria do estuário (Kowawleska-Kalkowska e Marks, 2015). A rotação da Terra dá origem ao efeito de Coriolis que em baías e estuários extensos a semelhança do mar aberto, é responsável pela deflexão das linhas de corrente de escoamento provocando um efeito global de circulação em sentido direito no Hemisfério

Norte e em sentido esquerdo no Hemisfério Sul. Como consequência disso, as linhas de corrente de escoamento seguem uma órbita mais ou menos elíptica do que um simples movimento de vai-e-vem (Duarte e Vieira, 1997; The Open University, 1999). Todavia, se tratando de baías e estuários menos extensos, a circulação é tal que na vazante as correntes aproximam-se à margem direita e na enchente à margem esquerda (Duarte e Vieira, 1997). A batimetria e a geometria dos estuários modificam as fortes correntes de maré através de suas interações resultando numa circulação residual que geralmente se manifesta como pequenas diferenças na força das correntes máxima da enchente e da vazante (Dos Santos, 2008).

A interação da onda de maré com a batimetria e geometria estuarina acima referida pode ser usada como critério para classificar estuários uma vez que a maré, na sua propagação, pode ser amortecida ou amplificada. Associado a isso pode ocorrer a deformação da onda de maré resultando em tempos de enchente e vazante desiguais, ao que se chama assimetria da maré (Dos Santos, 2008; Bier, 2018; Guo *et al.*, 2019). Esta por sua vez, pode ser analisada considerando [1] a interação dos constituintes harmônicos puros, e [2] a interação destes com os constituintes harmônicos de maior frequência, gerados pelas distorções dentro do estuário (Nidzieko, 2010; Guo *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2020). Geralmente, em estuários com pouca influência fluvial os tempos de enchente são curtos, associados a correntes mais fortes (Dos Santos, 2008; Bier, 2018; Guo *et al.*, 2019). Com isso, estuários dominados pela enchente tendem a ser de macro-marés (amplitude de maré > 4 metros) e hipsincrônicos, referente a amplificação da onda de maré. Ao contrário, os estuários dominados pela vazante tendem a ser de micro-marés (amplitude de maré entre 0 e 2 metros) e hipossincrônicos, referente ao amortecimento da onda de maré (Dos Santos, 2008). No tocante a deformação da onda de maré, como referido, esta dever-se à interação da maré com a batimetria e geometria estuarina, porém, adicionalmente, outros factores independentes da maré como a descarga do rio e ondas de tempestade podem modificar a propagação e deformação da maré, alterando dessa forma a assimetria também. Ondas de tempestade afectam ondas de maré em águas rasas nas suas comparáveis escalas de tempo e espaço. A descarga do rio é, geralmente, não estacionária e pode elevar o nível médio da água, reduzir a amplitude da maré, retardar a fase da maré e acentuar a deformação das ondas dentro dos estuários (Gallo e Vinzon, 2016; Guo *et al.*, 2019).

Outro aspecto relacionado a propagação da onda de maré é a perda de energia (dissipação) devido a interação friccional com o fundo e a geometria do estuário. A dissipação de energia da maré por sua vez pode ser descrita em termos de decaimento da amplitude dos principais constituintes de maré (Mazzilli, 2015; Coelho, 2016; Cook e Lippmann, 2017; Bier, 2018). Contudo, nem toda energia é dissipada devido aos efeitos friccionais, parte dela é transferida para constituintes harmônicos

secundários de maior frequência (marés altas como por exemplo M_4 e M_6) através de interacções não lineares que criam a assimetria da maré (Coelho, 2016; Cook e Lippmann, 2017). Porquanto a energia da onda de maré em qualquer ponto consiste de duas partes: a energia potencial, representada pela altura da onda acima do nível médio, e a energia cinética, representada pela velocidade da água (The Open University, 1999; Bier, 2018), a dissipação da energia da onda de maré pode ser tratada de duas formas considerando os dois tipos de energia (Seim *et al.*, 2006; Bier, 2018).

Para melhor compreender os fenómenos/processos associados a essa interacção da onda de maré com a batimetria e geometria do estuário aquando da sua propagação, várias pesquisas fazem uso de modelos numéricos, tal como é na presente pesquisa. O emprego de modelos numéricos para compreensão da hidrodinâmica estuarina é relevante, uma vez que estes permitem, por meio de simplificações, a representação de fenómenos no mundo real e complexo como é o caso dos estuário, em que existe a possibilidade de controlar as variáveis e olhá-las de forma singular no tempo. A modelagem para o estudo de fenómenos em ambientes costeiros agrega valor às pesquisas para uma melhor compreensão dos sistemas e funciona como ferramenta de apoio à tomada de decisão na análise de possíveis alternativas em diferentes campos do conhecimento como na oceanografia, na engenharia e na gestão ambiental (Barbosa, 2008). Todavia, os modelos aplicáveis a estudos hidrodinâmicos nos estuários podem ser categorizados em três: modelos tridimensionais (3D), bidimensionais (2D) e unidimensionais (1D). Modelos tridimensionais possuem todas as dimensões (x, y, z, t), sendo z a dimensão vertical e subdividem-se em, modelos tridimensionais gerais (3Dg), e tridimensionais simples (3D) (Barbosa, 2008). Os modelos 3Dg como é o ELCOM (*Estuary Lake and Coastal Ocean Model*), incluem forçantes baroclínicas e barotrópicas (Barbosa, 2008; João, 2014; Mazzilli, 2015), sendo assim aplicam-se a qualquer caso, como corpos de água estratificados, sujeitos a factores ambientais externos tais como, cisalhamento dos ventos, aquecimento e resfriamento da superfície de água (Barbosa, 2008; João, 2014).

Neste contexto de modelagem numérica aplicada a corpos de água costeiros, em Moçambique encontram-se trabalhos como o de João (2014), Mazzilli (2015) e de Cumbi (2019), todos eles versando sobre a hidrodinâmica do estuário dos Bons Sinais, com recurso ao modelo ELCOM. Contudo, apesar destas pesquisas abordarem diferentes aspectos inerentes a hidrodinâmica do estuário dos Bons Sinais não há ainda pesquisas realizadas no contexto de dissipação da energia da onda de maré, contribuição de diferentes combinações dos constituintes harmónicos na assimetria da maré, e até análises mais detalhadas das variações da maré e correntes de maré. Estes são os objectivos da presente pesquisa haja vista o facto de estes aspectos figurarem subsídios importantes na compreensão da hidrodinâmica no estuário dos Bons Sinais e também fornecerem informação

importante à navegação e engenharia costeira ao longo do estuário. Ora, o propósito desta pesquisa é de compreender a hidrodinâmica do estuário dos Bons Sinais da boca a montante dos rios Cúacúa e Licuari, em regiões que ainda fazem parte do estuário dos Bons Sinais. Porém, a configuração disponível de Mazzilli (2015) não possui os dois rios, por esta razão neste trabalho foi melhorada a configuração de Mazzilli (2015) de modo a acomodar nela os dois rios. Desta forma, nesta pesquisa são consideradas três perguntas relacionadas a propagação da maré estuário dentro. [1] De forma varia a importância relativa dos factores morfológicos ao longo do estuário? [2] Como a assimetria criada pelos constituintes harmónicos de maior frequência contribui na assimetria total? [3] De que maneira a geometria e batimetria estuarina afectam a dissipação da energia da maré? Ademais, este trabalho está estruturado, no geral, em quatro capítulos a saber, capítulo um, referente a introdução e objectivos; capítulo dois, no qual se faz a descrição dos métodos empregues na análise; capítulo três, referente a descrição e apresentação dos resultados; por fim quarto capítulo, no qual apresenta-se a discussão dos resultados.

1.2. Objectivos

Objectivo Geral

O objectivo geral desta pesquisa é de compreender as variações na dinâmica da maré no estuário dos Bons Sinais.

Objectivos Específicos

- Melhorar a configuração do ELCOM proposta por Mazzilli (2015) para compreender as variações na dinâmica da maré no estuário dos Bons Sinais.
- Determinar a importância relativa dos factores morfológicos (i.e., atrito do fundo e convergência das margens) na elevação e corrente de maré;
- Identificar a contribuição de diferentes constituintes na determinação da distorção da maré;
- Descrever o impacto da fricção do fundo na perda da energia da onda da maré.

2. CAPÍTULO II: METODOLOGIA

2.1. Localização e descrição da área de estudo

O Estuário dos Bons Sinais está localizado na província central da Zambézia, separando o distrito de Quelimane do distrito de Inhassunge, limitado pela confluência dos rios Cúacúa e Licuari a $17^{\circ} 54' S$ e $36^{\circ} 49' E$ e conectado ao Oceano Índico a $18^{\circ} 01' S$ e $36^{\circ} 58' E$ (figura 1). Essa delimitação do estuário dos Bons Sinais não toma em consideração o limite de influência da maré tal como definido por Dyer (1997). Este estuário apresenta uma profundidade média de cerca de 14 m, um comprimento de 30 km e largura média de 2 km, perfazendo uma área de 60 km^2 . Assume-se que a área da secção transversal decresce exponencialmente desde a boca com cerca de $10\,000 \text{ m}^2$ até a confluência com cerca de $3\,000 \text{ m}^2$. De modo geral, a presença de ilhas ao longo do canal estuarino é um factor que reduz ainda mais essa área da secção transversal. Quanto as margens do canal, ocorre erosão do lado do assentamento urbano, i.e., cidade de Quelimane e sedimentação do lado do distrito de Inhassunge. A erosão na margem do lado da cidade de Quelimane é resultado do número de canais que existe deste lado em detrimento do outro uma vez que estes, como consequência, aumentam a velocidade das correntes de maré aquando da vazante (N. Furaca, 2020, comunicação oral).

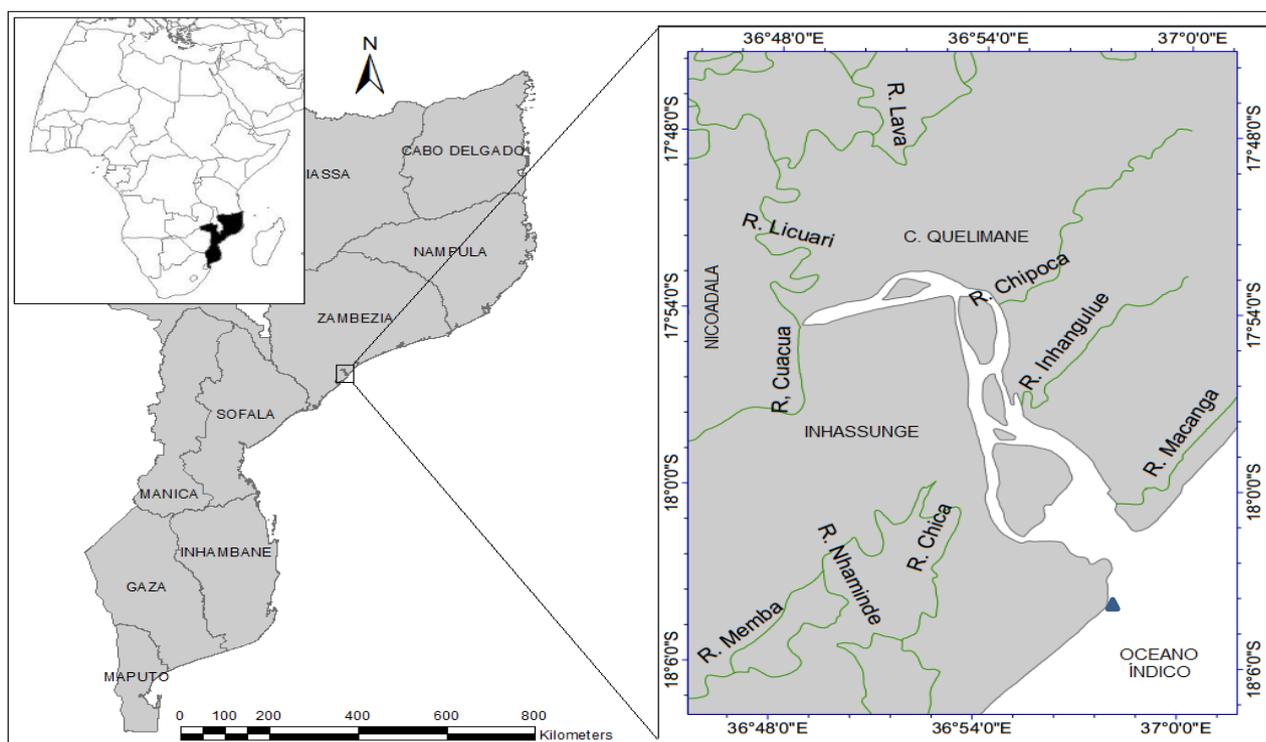


Figura 1: Localização da área de estudo com o ponto de colecta de dados de maré indicado por um triângulo. A área populacional mais importante é a cidade de Quelimane e próxima do local de estudo, onde está situada a estação meteorológica de onde provem os dados atmosféricos descritos mais adiante.

Os rios Cuácuá e Licuari localizados a montante do estuário são ambos, de acordo com a constância de escoamento, rios perenes com escoamento durante todo o ano hidrológico, período compreendido entre 1 de Outubro de um ano à 30 de Setembro do ano seguinte. O regime dos rios é torrencial, com caudais elevados durante o período chuvoso, de Outubro à Março, e baixos durante o período seco, de Abril a Setembro. A bacia do rio Licuari tem uma extensão de 3775 km² sendo que sua descarga é maior no fim comparativamente ao início da época chuvosa, como se pode ver na figura 2. Tal informação do rio Cuácuá é desconhecida pelo que Mazzilli (2015) estimou a descarga deste rio tendo observado que a descarga do rio Cuácuá é cerca de três vezes a do Licuari. Contudo, o na época seca o a descarga o rio Cuácuá é bastante reduzida, pois nessa época este rio deixa de receber águas do rio Zambeze, coisa que acontece aquando da época chuvosa. O rio Cuácuá é mais largo que o Licuari, porém menos profundo. Nas regiões próximas a confluência dos dois rios o Licuari apresenta uma profundidade média de cerca de 12 m e uma largura média de 166 m que é cerca de duas vezes menor que a do Cuacua com 384 m e uma profundidade média de cerca de 6 m.

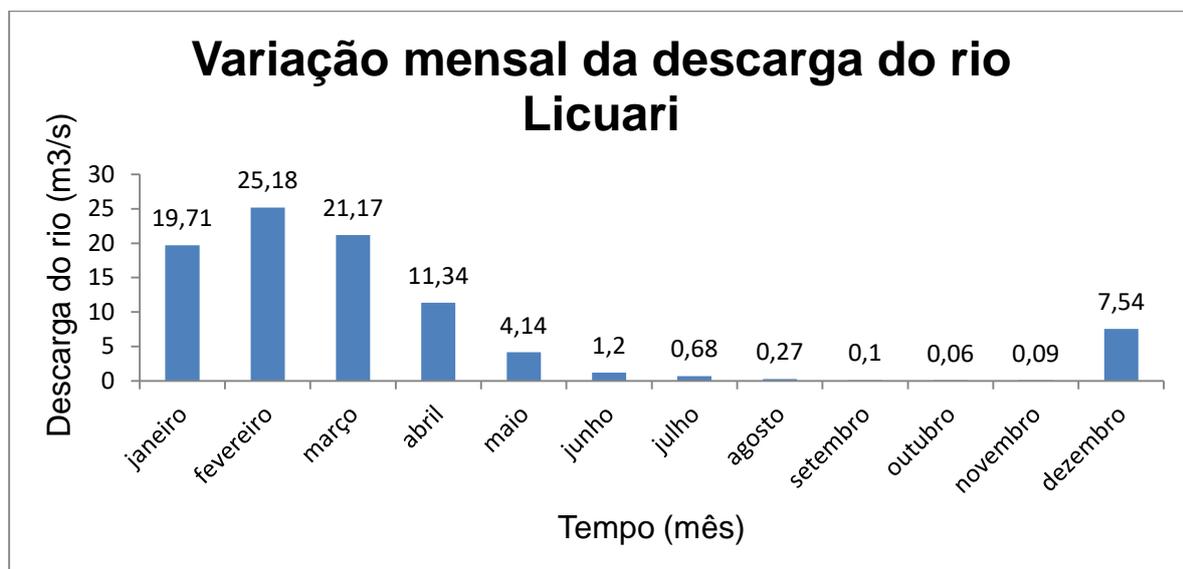


Figura 2: Médias mensais das descargas do rio Licuari referentes a uma série temporal de 11 anos, 1961-81. Fonte: Roest (2008).

Caracterização hidrodinâmica

A temperatura da água no estuário dos Bons Sinais apresenta variações diurnas enquanto as variações da salinidade são fortemente dominadas pelas marés. As marés por sua vez são do tipo semidiurna com amplitudes que variam de 0.6 m a 2.2 m nas marés de quadratura e de sizígia, respectivamente, sendo maiores na boca e menores em direcção a confluência. A propagação da maré da boca à confluência leva cerca de 30 minutos, este facto faz com que as marés no estuário estejam em fase com as marés em mar aberto. A magnitude das correntes varia entre 0 e 1,2 m s⁻¹ sendo ligeiramente

maiores na superfície em relação ao fundo. Durante o verão e inverno as correntes são dominadas pela vazante e enchente da maré, respectivamente. O perfil da circulação devido ao gradiente do vento mostra um predomínio de correntes de enchente durante o verão, com amplitudes de cerca de $0,04 \text{ m s}^{-1}$ e gradiente de densidade de cerca de $0,25 \text{ kg m}^{-3}$ por quilómetro (António, 2012). No tocante a intrusão salina da confluência rio acima regista-se uma variação em função das estações, nesse contexto a intrusão salina no rio Cuácuá na época intermédia, no mês de Julho, alcança cerca de 30 km. Na época chuvosa, no mês de Abril, o alcance da intrusão salina no rio Licuari é de cerca de 12 km, na mesma época no rio Cuácuá não se regista intrusão salina (Canivete, 2019).

Os processos hidrodinâmicos que influenciam as fronteiras do estuário dos Bons Sinais podem ser classificados em quatro componentes principais. Primeiro, são as correntes oceânicas que estabelecem uma condição de fronteira de maré e salinidade da troca de águas costeiras na margem do estuário em direcção ao oceano. De seguida, a entrada de água doce dos rios Cúacúa e Licuari que determina as correntes residuais e o gradiente de salinidade dentro do canal estuarino. O terceiro é a salinidade na boca do estuário que pode também influenciar a salinidade no estuário, dada a proximidade da pluma do rio Zambeze ao estuário dos Bons Sinais. Por último, a dinâmica de ondas e marés na margem em direcção ao oceano aberto contribui directamente nas variações do transporte de sedimentos dentro do estuário (Mazzilli, 2015).

Caracterização de variáveis atmosféricas

A província da Zambézia apresenta um clima tropical húmido com duas estações, verão (Novembro a Abril) e inverno (Maio a Outubro) em que a precipitação é maior no verão e menor no inverno. Em Quelimane a estação com maior precipitação é de céu quase encoberto, ao passo que a estação seca apresenta-se sem nuvens. Ao longo do ano o clima é quente, em geral a temperatura varia de 19°C à 34°C , raramente é inferior a 17°C e superior a 38°C (<https://pt.weatherspark.com/>). A forma de precipitação mais comum ao longo do ano é chuva em que o mês mais seco é Outubro com cerca da 20 mm e o mês de Janeiro apresenta maior precipitação com cerca de 303 mm, não obstante o gráfico da precipitação mostrar uma distribuição com dois picos ao longo do ano, Janeiro e Dezembro, segundo ilustrado na figura 3 referente a precipitação média mensal ao longo de 30 anos (1987-2016). A época de ventos fortes dura 3 meses, de Setembro a Novembro com ventos acima de 4m/s enquanto a época calma dura 9 meses, de Dezembro a Agosto com ventos abaixo de 3.8m/s conforme ilustrado na figura 4.

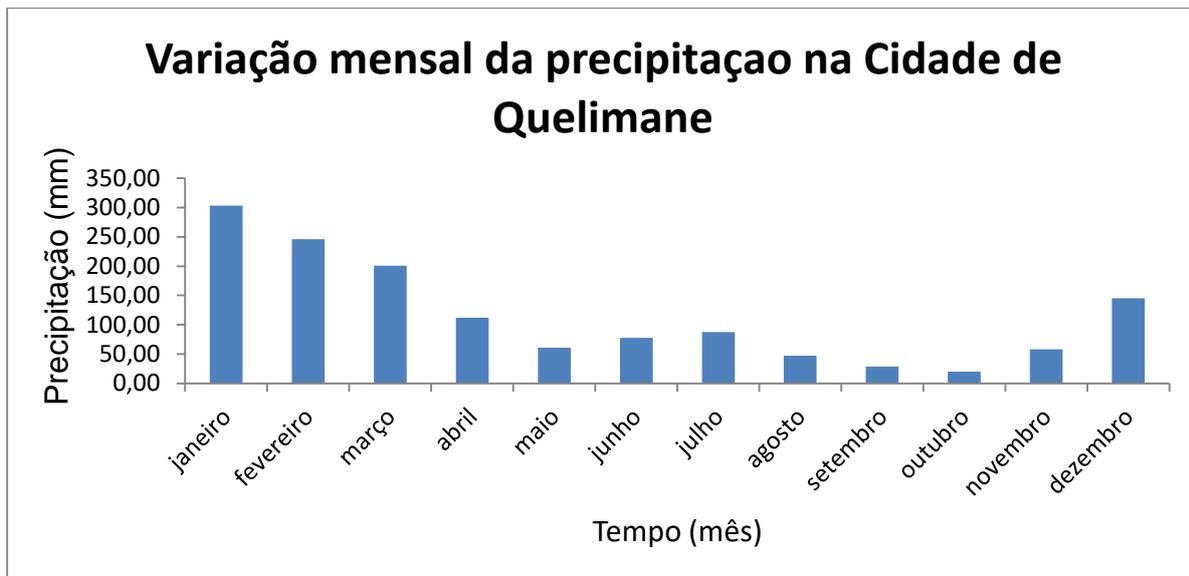


Figura 3: Médias mensais da precipitação na Cidade de Quelimane ao longo de 30 anos, 1987-2016. Fonte: INAM (2016).

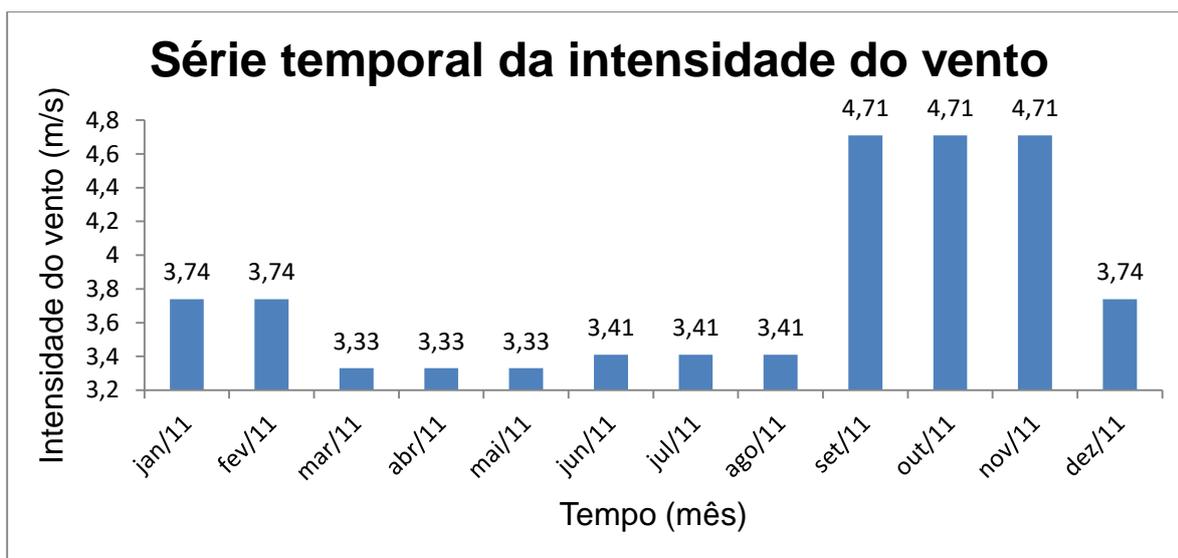


Figura 4: Médias mensais da intensidade do vento ao longo do estuário dos Bons Sinais para o ano de 2011. Fonte: apdrc.soest.hawaii.edu (2011).

2.2. Material

A pesquisa foi feita com recurso ao ELCOM (Estuary and Lake Computer Model), que é uma ferramenta de modelagem numérica tridimensional (Apêndice 1), que aplica princípios hidrodinâmicos e termodinâmicos, para simular o comportamento espacial e temporal de parâmetros físicos (temperatura, salinidade, correntes e poluentes) em lagos, estuários e reservatórios estratificados, sujeitos a factores ambientais externos, tais como cisalhamento dos ventos,

aquecimento e resfriamento da superfície. De acordo com o princípio de execução do ELCOM (Apêndice2) foram usados diversos dados para configurar o modelo. Nesse conjunto de dados necessários ao ELCOM figura a batimetria da área de estuado, assim sendo, a informação relativa à batimetria do estuário dos Bons Sinais foi extraída da carta náutica M14959 do Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação (INAHINA) do ano de 2015, cuja escala é de 1:50.000. De igual modo foram usados dados de vazão dos rios Cúacúa e Licuari, sendo os dados do rio Licuari obtidos no trabalho de Roest (2008) e os do rio Cúacúa provenientes de estimativas feitas por Mazzilli (2015). Através do modelo global *Tide Model Driver* (TMD) com $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ de resolução espacial, foram extraídos dados da elevação da maré na desembocadura do estuário (ponto com triângulo na figura 1) considerando constituintes lunares e solares (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm e M4). Informação mais detalhada acerca do modelo TMD pode ser encontrada em Padman e Erofeeva (2005). Dados de temperatura da água, salinidade, vento e radiação solar foram extraídos do repositório do Asia-Pacific Data-Research e dados de temperatura do ar e precipitação fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia – Delegação da Zambézia (INAM). A informação da fonte, resolução espacial e série temporal dos dados usados neste trabalho encontra-se sumarizada na tabela 1. A maré e corrente de maré ao longo do estuário, resultados do ELCOM, foram submetidos à análise harmónica feita no pacote *t_tide* (desenvolvido em Matlab por Pawlowicz *et al.*, 2002) para determinar a importância relativa do atrito do fundo e convergência das margens na amplitude da maré e corrente de maré, identificar a contribuição de diferentes constituintes na determinação da distorção da maré, e para descrever o impacto da fricção do fundo na perda da energia da onda da maré.

Tabela 1: Conjunto de dados obtidos através de medições *in situ* e remotas usados para configurar o modelo ELCOM.

Parâmetro	Fonte	Resol. espacial	Série Temporal	Tipo/plataforma
Elevação da maré	TMD	1°/4x1°/4	Horária 2010-2011	
Salinidade	Hadley Centre EN4 doi:10.1002/2013JC009067	1°x1°	Mensal 2001-2018	Reanálise de obs.
Temperatura da água	MODIS Aqua SST http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod25.pdf	1/24°x1/24°	Mensal 2002-2019	Obs. por satélite
Descarga do rio Licuari	Roest (2008)	pontual	Mensal 1967-1976/ 1979-1981	Med. <i>in situ</i>
Temperatura do ar	INAM	pontual	Mensal 1987-2016	Med. <i>in situ</i>
Precipitação	INAM	pontual	Mensal 1987-2016	Med. <i>in situ</i>
Vento	WHOI AO Air-Sea Fluxes (OAFlux) http://oaflex.whoi.edu/pdfs/OAFlux_TechReport_3rd_release.pdf	1°x1°	Mensal 1984-2009	Reanálise de obs.
Radiação solar	WHOI AO Air-Sea Fluxes (OAFlux) http://oaflex.whoi.edu/pdfs/OAFlux_TechReport_3rd_release.pdf	1°x1°	Mensal 1984-2009	Reanálise de obs.

2.3. Métodos

2.3.1. Configuração do ELCOM ao estuário dos Bons Sinais

A configuração do modelo (Apêndice 3) ao estuário dos Bons Sinais foi feita em duas fases, a primeira consistiu na produção da batimetria numérica. Tal batimetria foi produzida a partir da combinação da carta náutica M14959 referente ao estuário dos Bons Sinais digitalizada em Mike 21, contornos das margens dos rios Cucua e Licuari extraídos de uma imagem do Google Earth (Apêndice 4) e leituras topográficas feitas por Canivete (2019) usando uma sonda na área não abrangida pela carta náutica M14959 e em falta na configuração de Mazzilli (2015). O processo de produção da batimetria digital envolveu igualmente a definição da geometria do estuário, que compreende dois afluentes, diversas ilhas, e o um braço principal do estuário, contendo três fronteiras abertas, duas correspondentes aos rios Cúacúa e Licuari, nas quais foram introduzidos dados de vazão e uma correspondente à interface com o oceano, na qual foi introduzida a onda de maré. Nas três fronteiras também foram introduzidos dados de temperatura da água e salinidade. Na fronteira água-atmosfera foram introduzidos dados meteorológicos, nomeadamente temperatura do ar, precipitação, vento e radiação solar. Na fronteira água-fundo marinho foi considerado o coeficiente de atrito (C_d) e a turbulência.

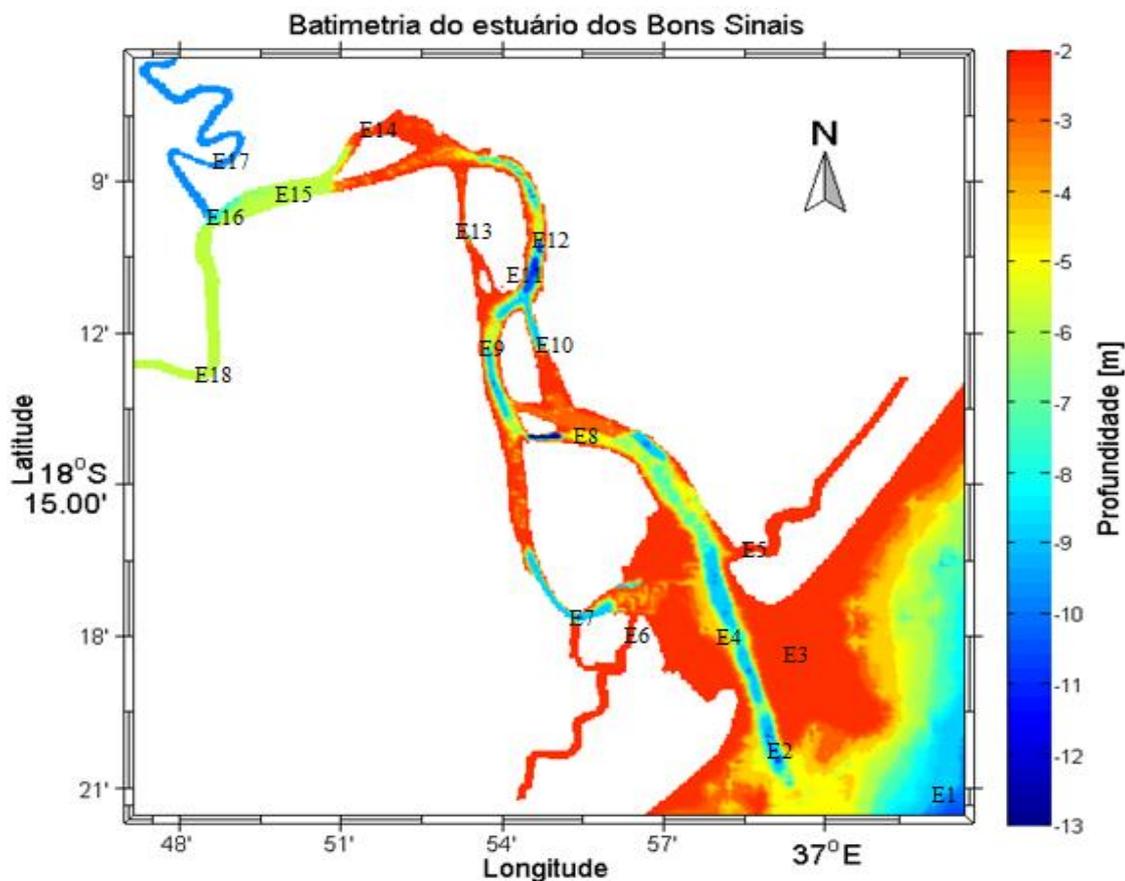


Figura 5: Configuração melhorada do ELCOM, apresentando os dois rios.

A configuração ilustra também as estações definidas para análise de dados.

A segunda fase da configuração do ELCOM está voltada à calibração e validação dos resultados do modelo. Esta fase é imprescindível haja vista a modelagem numérica ser, por definição, uma tentativa de reproduzir e aproximar um fenómeno real. Neste contexto, as aproximações e parametrizações agregadas nos modelos levam a discrepâncias e desvios dos resultados dos modelos relativamente aos dados observados, por isso antes de aplicar um modelo a um determinado local deve-se calibrar e validar (Dias, 2013). Neste trabalho, seguiu-se a metodologia de Dias (2013) que consiste numa calibração inicial qualitativa seguida da quantificação da acurácia do modelo, e foi dividida em três passos:

- i) Corrida do modelo com diferentes combinações de coeficiente de arrasto C_d e difusidade horizontal k_s para 1 dia, com o intuito de alcançar a melhor simulação de marés possível.
- ii) Cálculo de dois parâmetros estatísticos nomeadamente “*Raiz do Erro Quadrático Médio* do inglês *Root Mean Square Error (RMSE)* (equação 1) e o *Quadrado do Coeficiente de Correlação* do inglês *Squared Correlation Coefficient (R^2)* (equação 2)” entre a maré observada e modelada.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde x_i são dados observados, y_i são dados modelados e N é o número de dados das séries temporais em comparação.

$$R^2 = \frac{[N(\sum_{i=1}^N x_i y_i) - (\sum_{i=1}^N x_i)(\sum_{i=1}^N y_i)]^2}{[N(\sum_{i=1}^N x_i^2) - (\sum_{i=1}^N x_i)^2][N(\sum_{i=1}^N y_i^2) - (\sum_{i=1}^N y_i)^2]} \quad \text{Eq. 2}$$

- iii) Corrida do modelo para 30 dias, sendo que a maré modelada pelo ELCOM foi comparada à maré observada e calculados os parâmetros estatísticos para 16 dias. A validação também foi feita para a corrente de maré de 1 dia.

2.3.2. Importância dos factores morfológicos na elevação da maré e corrente de maré

A importância dos factores morfológicos na dinâmica da elevação da maré e corrente de maré estuário acima foi calculada mediante as equações 3 à 5. Para tal, a maré simulada pelo ELCOM foi submetida a análise harmónica em MatLab através do pacote `t_tide` que permitiu conhecer as amplitudes e fases dos constituintes de maré com relação a elevação e a corrente de maré. Deste modo, foi calculada a amplitude máxima da maré semidiurna com contribuição diurna, na sizígia (*AMSDS*) (equação 3) em que os quatro principais constituintes estão em fase e a correspondente amplitude máxima da maré semidiurna com contribuição diurna, na quadratura (*AMSDQ*) (equação 4) onde os principais

constituintes estão em oposição de fase. Estes cálculos foram feitos considerando a elevação de maré assim como a corrente de maré. Uma vez conhecidas tais amplitudes foi calculada a taxa de variação da amplitude (*TVA*) ao longo de duas estações pela equação 5 (Miyao e Harari, 1989; Soares, 2013). Essas equações foram empregues para o alcance deste objectivo porquanto em ambientes estuarinos, para além das oscilações devidas as forçantes astronómicas, a maré sofre oscilações devidas a morfologia.

$$AMSDS = (H_{M2} + H_{S2}) + (H_{O1} + H_{K1}) \quad \text{Eq. 3}$$

$$AMSDQ = (H_{M2} - H_{S2}) + (H_{O1} - H_{K1}) \quad \text{Eq. 4}$$

$$TVA = [A_{n+1} - A_n] / [x_{n+1} - x_n] \quad \text{Eq. 5}$$

Onde *A* é a amplitude máxima da maré/corrente de maré, *x* é a distância, *n* é o contador da estação e *H* a amplitude do constituinte harmónico.

2.3.3. Distorção da maré

A assimetria da maré reflecte a desigualdade na duração da enchente relativamente à vazante, causada pela distorção da onda de maré durante a propagação em águas rasas, ao longo de plataformas costeiras e sua entrada nos estuários. A geração do primeiro harmónico *M₄* e sua adição ao principal lunar semidiurno *M₂* é, geralmente, a principal causada assimetria da maré em águas rasas, contudo, outras combinações dos constituintes harmónicos podem gerar assimetria. (Friedrichs e Aubrey, 1988; Miyao e Harari, 1998; Dias *et al.* 2013). Deste modo foi determinado o parâmetro *skewness* (γ) que denota a assimetria da maré, referente a 2 e 3 constituintes de frequências relacionadas tal que $2w_1 = w_2$ e $w_1 + w_2 = w_3$ (tabela 2), respectivamente de acordo com as equações à seguir (Song *et al.*, 2011). As frequências dos constituintes estão apresentadas no apêndice 5.

$$\gamma_2 = \frac{\frac{3}{4}a_1^2w_1^2a_2w_2\sin(2\varphi_1-\varphi_2)}{\left(\frac{1}{2}\sum_{i=1}^N a_i^2w_i^2\right)^{3/2}} \quad \text{Eq. 6}$$

$$\gamma_3 = \frac{\frac{3}{2}a_1w_1a_2w_2a_3w_3\sin(\varphi_1+\varphi_2-\varphi_3)}{\left[\frac{1}{2}(a_1^2w_1^2+a_2^2w_2^2+a_3^2w_3^2)\right]^{3/2}} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde *a*, *w* e φ são amplitude, frequência e ângulo de fase de um determinado constituinte harmónico. De acordo com as equações, valores de $\gamma < 0$ reflectem menor duração da vazante da maré e valores de $\gamma > 0$ reflectem menor duração da enchente da maré. Por outro lado, quando o valor da diferença de fase dos constituintes envolvidos estiver no intervalo de 0° à 180° indica menor duração da

enchente e no intervalo de 180° à 360° indica menor duração da vazante. Quando essa diferença for exactamente de 0° ou 180° há equilíbrio entre os tempos de enchente e vazante indicando ausência da assimetria da maré (Friedrichs e Aubrey, 1988; Song *et al.*, 2011; Guo *et al.*, 2019).

Tabela 2: Combinações usadas para aferir o contributo de cada combinação na assimetria total da maré.

Relação da frequência dos constituintes	Dupla combinação		Tripla combinação		
		$2w_{M2}$ $= w_{M4}$	$2w_{S2} =$ w_{S4}	$w_{M2} + w_{M4}$ $= w_{M6}$	$w_{M2} + w_{S2}$ $= w_{MS4}$
Diferença de fase dos constituintes	$2\varphi_{M2}$ $- \varphi_{M4}$	$2\varphi_{S2} - \varphi_{S4}$	φ_{M2} $+ \varphi_{M4} - \varphi_{M6}$	$\varphi_{M2} + \varphi_{S2}$ $- \varphi_{MS4}$	$\varphi_{M2} + \varphi_{N2}$ $- \varphi_{MN4}$

Para determinar a contribuição de uma combinação de 2 e 3 constituintes e comparar o papel de diferentes combinações na assimetria total da maré foi introduzido o símbolo β , conforme as equações abaixo (Nidziedo, 2010; Song *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2020).

$$\beta_2 = \frac{\frac{3}{4}a_1^2w_1^2a_2w_2\sin(2\varphi_1-\varphi_2)}{\left(\frac{1}{2}\sum_{i=1}^N a_i^2w_i^2\right)^{3/2}} = \gamma_2 \cdot \left(\frac{a_1^2w_1^2+a_2^2w_2^2}{\sum_{i=1}^N a_i^2w_i^2}\right)^{3/2} \quad \text{Eq. 8}$$

Para dupla combinação e

$$\beta_3 = \frac{\frac{3}{2}a_1w_1a_2w_2a_3w_3\sin(\varphi_1+\varphi_2-\varphi_3)}{\left(\frac{1}{2}\sum_{i=1}^N a_i^2w_i^2\right)^{3/2}} = \gamma_3 \cdot \left(\frac{a_1^2w_1^2+a_2^2w_2^2+a_3^2w_3^2}{\sum_{i=1}^N a_i^2w_i^2}\right)^{3/2} \quad \text{Eq. 9}$$

para tripla combinação. Deste modo, o *skewness* total da maré em cada ponto é o somatório do β individual, de acordo com a equação 10.

$$\gamma_N = \sum \beta_i \quad \text{Eq. 10}$$

2.3.4. Impacto da fricção do fundo na perda da energia da onda da maré

O impacto da fricção do fundo na perda da energia da onda da maré foi examinado com recurso a equação de Taylor (1919) (equação 11) para o cálculo da energia cinética dissipada em cada estação assumindo a camada de fronteira com o fundo (Seim *et al.*, 2006). Com vista a determinar a variação dessa energia considerando e distância da que separa as estações ao longo do estuário dos Bons Sinais, foi calculada a taxa de dissipação da energia de maré com o emprego da equação 5.

$$D = \langle \rho C_d [U^2]^{3/2} \rangle \quad [Wm^{-2}] \quad \text{Eq. 11}$$

Onde η é a flutuação do nível da água, u é a velocidade da água sobre uma profundidade h , ρ é a densidade da água, g é a aceleração de gravidade, n é um contador de estação, os parênteses $\langle \rangle$ representam a média ao longo de um período, C_d é o coeficiente de arrasto, usado também na calibração do modelo e U é a velocidade da corrente de maré na camada de fronteira com o fundo.

3. CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Configuração do ELCOM ao estuário dos Bons Sinais

A figura 6 ilustra a maré observada, modelada e a diferença (resultado da subtração da maré observada pela modelada) para o período de 16 dias. Ademais, nota-se, pelo período de 16 dias a ocorrência de uma maré de sizígia e uma de quadratura para ambas marés, sendo elas de regime semidiurno caracterizadas por duas preia-mar e duas baixa-mar ao longo de um dia lunar. A amplitude máxima (distância vertical que separa o ponto máximo do mínimo consecutivo e vice-versa) ocorre na maré de sizígia com 3.58 m e 3.37 m para a maré observada e modelada, respectivamente. Contudo, esses máximos diferem no tempo de sua ocorrência, ao passo que a amplitude mínima ocorre na maré de quadratura com 0.88 m e 0.58 m para a maré observada e modelada, respectivamente. As diferenças nas alturas das marés têm uma amplitude máxima global (distância que separa o ponto mais alto do ponto mais baixo da série) de 0.05 m. A comparação entre a corrente observada e a corrente modelada para 1 dia (figura 7) mostra diferenças consideráveis nas suas amplitudes resultando numa diferença máxima de amplitudes de 0.18 m s^{-1} , sendo a amplitudes neste contexto a distância vertical de zero até um determinado valor instantâneo. Contudo o intervalo de variação de ambas correntes é similar na medida em que a corrente observada varia entre 0.03 m s^{-1} e 0.5 m s^{-1} e a simulada entre 0.02 m s^{-1} e 0.48 m s^{-1} .

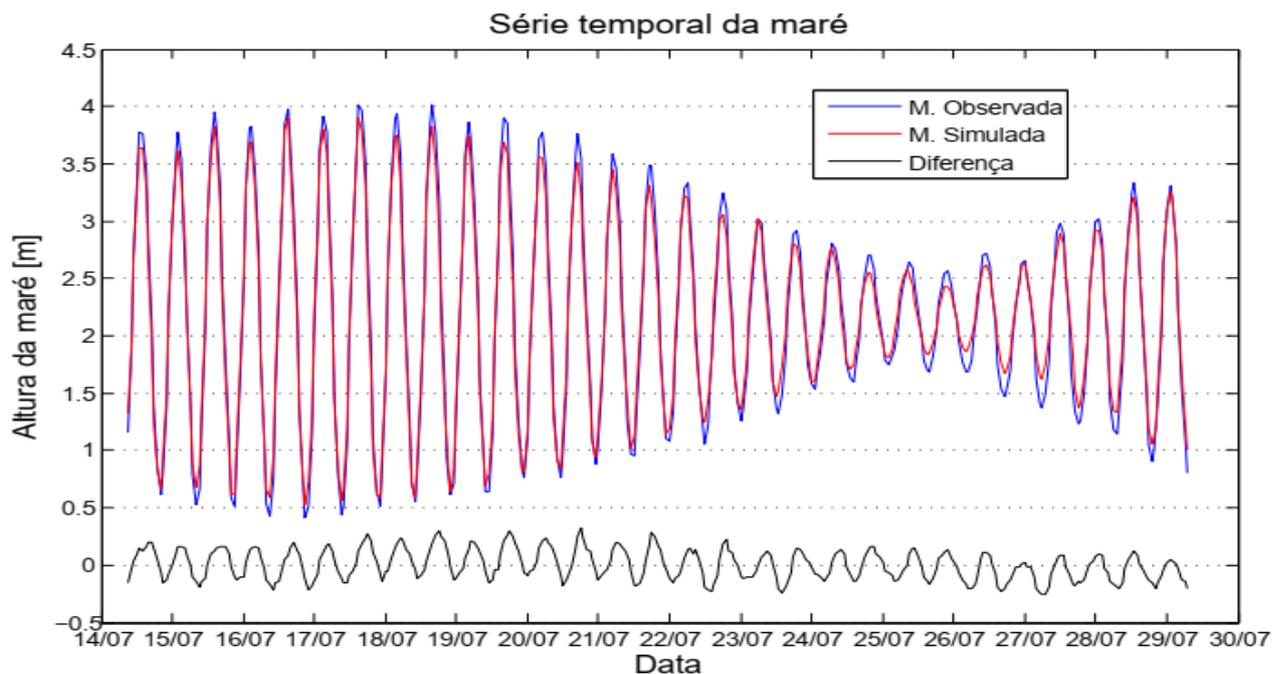


Figura 6: Resultado da calibração qualitativa do modelo ELCOM, aplicada à maré na boca do estuário dos Bons Sinais.

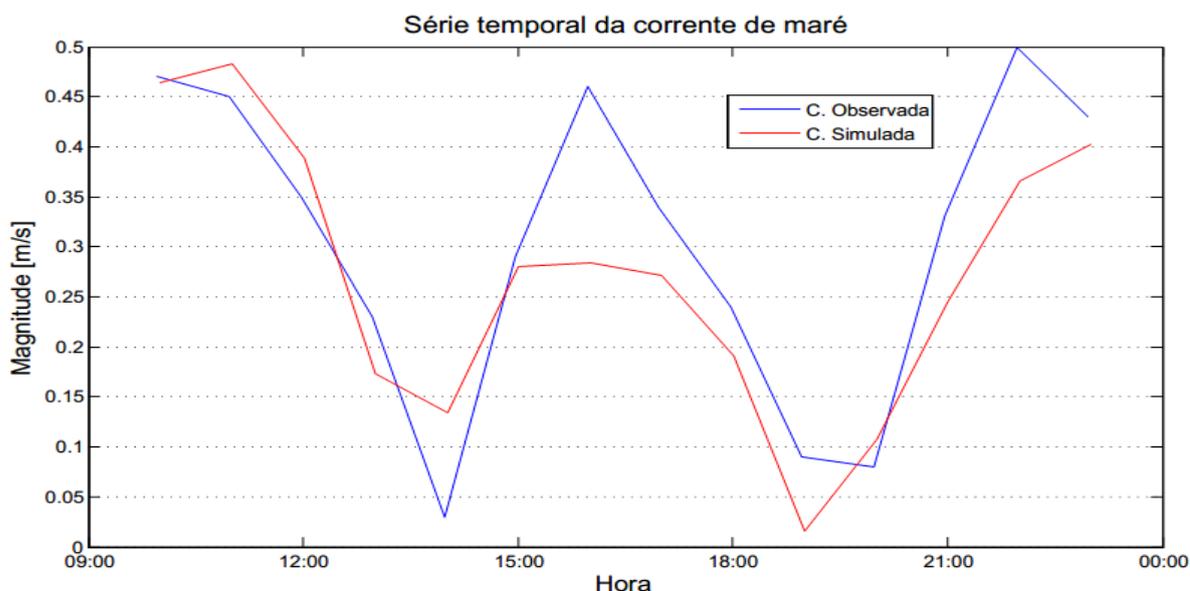


Figura 7: Resultado da calibração qualitativa do modelo ELCOM, aplicada à corrente de maré na boca do estuário dos Bons Sinais.

De acordo com os parâmetros estatísticos, todos os experimentos com as diferentes combinações do coeficiente de arrasto C_d e difusidade horizontal k_s tiveram o mesmo valor de R^2 foi de 0.99, ao passo que valor de $RMSE$ foi de 0.12 e 0.13. Deste modo, foi usada para 15 dias de corrida uma das combinações com menor valor de $RMSE$ ($C_d = 0.003$ e $k_s = 0.02$). Como se pode ver na tabela 2, o resultado dos parâmetros estatísticos considerando tal combinação foi de 0.03 para $RMSE$ e 0.99 para R^2 . A mesma combinação foi usada para 1 dia de corrida do modelo e calculados os parâmetros estatísticos que apresentaram valores de 0.2 para $RMSE$ e 0.77 para R^2 .

Tabela 3: Performance do ELCOM de 1 e 15 dias para maré e correntes.

Altura de Marés (1 dia)			
	k_s (m ² /s)	$RMSE$	R^2 (%)
$C_d = 0.003$	0.0	0.12	0.99
	0.02	0.12	0.99
	0.06	0.12	0.99
$C_d = 0.0003$	0.0	0.13	0.99
	0.02	0.13	0.99
	0.06	0.13	0.99
$C_d = 0.00003$	0.0	0.13	0.99
	0.02	0.13	0.99
	0.06	0.13	0.99
Altura de Marés (15 dias)			
	k_s (m ² /s)	$RMSE$	R^2 (%)
$C_d = 0.003$	0.02	0.03	0.99
Correntes de Marés (1 dia)			
	k_s (m ² /s)	$RMSE$	R^2 (%)
$C_d = 0.003$	0.02	0.2	0.77

3.2. Elevação e corrente de maré

Considerando a distância que separa uma estação da outra (tabela 3) nota-se que nem sempre o perfil da variação da amplitude máxima da elevação de maré concorda com o perfil da variação da amplitude máxima da corrente de maré, não obstante, no geral, haver uma tendência das amplitudes diminuírem estuário acima. A taxa de variação das amplitudes (i.e., valor absoluto) na maré de sizígia está entre 0 e 0.030 m km^{-1} e $0.002 \text{ m s}^{-1} \text{ km}^{-1}$ e $0.148 \text{ ms}^{-1} \text{ km}^{-1}$ para a elevação e corrente de maré, respectivamente. Na maré de quadratura a taxa de variação é mais inferior e encontra-se entre 0 e 0.005 m km^{-1} e entre 0 e $0.030 \text{ m s}^{-1} \text{ km}^{-1}$. Por outro lado, a maior taxa de variação da amplitude da elevação de maré está entre as estações 4 e 5 e entre 12 e 13 na maré de sizígia e de quadratura, respectivamente. Para a corrente de maré a maior taxa de variação tanto na maré de sizígia quanto na de quadratura está entre as estações 4 e 5. No que diz respeito a menor taxa de variação, verifica-se um nulo ao longo de duas zonas (intervalos entre estações) na maré de sizígia e ao longo de sete zonas na maré de quadratura. Olhando para a taxa de variação da corrente de maré, o menor valor na maré de sizígia está entre as estações 7 e 8 e entre 8 e 9. Na maré de quadratura o menor valor absoluto da taxa de variação está entre as estações 8 e 9 e entre 14 e 15. Note que na região da estação 16 o canal estuarino bifurca de tal modo que a estação 17 encontra-se no rio Licuar e a estação 18 no rio Cuácuá (figura 1), por esta razão nas análises entre estações encontra-se a notação 16-17 e 16-18.

3.3. Distorção da maré

A assimetria da maré pode ser originada a partir das interações não lineares dos constituintes ou a partir de constituintes puramente astronómicos (tabela 5). De modo geral, a assimetria é dominada primariamente pela combinação M_2 e M_4 seguida por S_2 e S_4 . As combinações M_2, S_2, MS_4 ; M_2, M_4, M_6 ; K_1, Q_1, N_2 ; e O_1, K_1, M_2 desempenham um papel secundário e terciário. Porém, avaliando o papel da cada combinação em cada estação nota-se que essa sequência nem sempre prevalece, tal é evidente, por exemplo, nas estações 7 e 8. A assimetria total γ_N revela, em termos de valor absoluto, que esta é mais forte na estação 10 e menos forte na estação 13. Ademais, o valor da assimetria na tabela 5 parte de 0 à 0.643, o nulo é verificado na estação 4 resultado da combinação M_2, M_4, M_6 e nas estações 14 e 17 como resultado da combinação O_1, K_1, M_2 . Nota-se que a combinação O_1, K_1, M_2 apresenta, ao longo das estações, valores quase uniformes.

3.4. Impacto da fricção do fundo na perda da energia da onda da maré

Na tabela 6 está ilustrado o perfil da distribuição espacial da dissipação média da energia de maré devido à interacção com o fundo (definida no ELCOM pelo C_d) em cada estação por metro quadrado, assim como da taxa da dissipação da energia de maré no estuário dos Bons Sinais ao longo de 30 dias. O maior valor da dissipação é de cerca de 4 W m^{-2} encontrado na estação 4, e o menor valor, de zero, encontrado nas estações 11, 16 e 18. Por outro lado, a taxa de dissipação da energia de maré entre duas estações é maior, de cerca de $1 \text{ W m}^{-2} \text{ km}^{-1}$ entre as estações 4 e 5, e menor, de zero entre as estações 16 e 18. É notória a tendência das correntes assim como da dissipação e da taxa de dissipação da energia da maré de diminuir de intensidade da boca à montante do estuário. De acordo com os resultados, em média a dissipação da energia da maré e a taxa de dissipação dessa energia no estuário dos Bons Sinais no período em causa é de cerca de 0.75 W m^{-2} e $0.15 \text{ W m}^{-2} \text{ km}^{-1}$.

Tabela 4: Taxa de variação da amplitude máxima da elevação da maré ($m km^{-1}$) e corrente de maré ($m s^{-1} km^{-1}$) de 30 dias entre estações ao longo do estuário dos Bons Sinais. Valores sublinhados são os maiores em cada linha. O sinal negativo é referente a taxa de atenuação e o sinal positivo é referente a taxa de amplificação, de acordo com a equação 5.

Intervalo das estações	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	16-18
Profundidade Média (m)	4.920	3.070	5.650	6.430	4.400	7.850	5.580	3.170	3.790	3.860	4.300	6.400	<u>9.330</u>	6.080
Largura média do canal (km)	<u>1.060</u>	0.430	0.410	0.690	0.870	0.640	0.320	0.240	0.240	0.350	0.580	0.730	0.180	0.290
Distância (km)	3.370	5.890	3.050	<u>8.650</u>	4.510	3.700	3.190	1.320	4.260	6.290	3.060	2.770	4.880	5.990
AMSDS (mkm^{-1})	-0.027	0.017	<u>-0.030</u>	-0.006	-0.020	-0.005	0.006	0	-0.023	-0.008	0	0.007	0.002	0.002
AMSDS ($ms^{-1}km^{-1}$)	<u>-0.148</u>	-0.007	-0.010	-0.002	-0.002	0.040	-0.069	0.114	0.007	-0.014	0.020	-0.043	0.023	-0.003
AMSDQ (mkm^{-1})	0	0.002	-0.003	0	-0.004	0	0.003	0	<u>-0.005</u>	-0.002	0	0.004	0	0
AMSDQ ($ms^{-1}km^{-1}$)	<u>-0.030</u>	-0.005	-0.003	-0.001	0	0.008	-0.009	0.008	0.005	-0.003	0	-0.004	0.002	-0.003

Tabela 5: Contribuição de cada combinação na γ_N calculada a partir de dados horários de elevação de maré, de 30 dias ao longo do estuário dos Bons Sinais. O sinal em cada combinação β e no somatório γ_N , reflecte, para o sinal negativo, assimetria dominada, e para o sinal positivo, assimetria dominada pela enchente.

Estação	γ_N	Comb. 1	β_1	Comb. 2	β_2	Comb. 3	β_3	Comb. 4	β_4	Comb. 5	β_5	Comb. 6	β_6
E4	-0.505	M2, M4	-0.291	S2, S4	-0.082	M2, M4, M6	0	M2, S2, MS4	-0.129	O1, K1, M2	0.001	K1, Q1, N2	-0.004
E5	0.402	M2, M4	0.380	S2, S4	0.177	M2, M4, M6	-0.001	M2, S2, MS4	-0.149	O1, K1, M2	0.001	K1, Q1, N2	-0.006
E6	0.142	M2, M4	0.235	S2, S4	-0.116	M2, M4, M6	0.001	M2, S2, MS4	0.028	O1, K1, M2	0.001	K1, Q1, N2	-0.007
E7	0.242	M2, M4	0.210	S2, S4	0.217	M2, M4, M6	0.002	M2, S2, MS4	-0.195	O1, K1, M2	0.001	K1, Q1, N2	0.007
E8	0.332	M2, M4	-0.062	S2, S4	0.228	M2, M4, M6	-0.001	M2, S2, MS4	0.172	O1, K1, M2	0.001	K1, Q1, N2	-0.006
E9	0.828	M2, M4	0.401	S2, S4	0.210	M2, M4, M6	0.005	M2, S2, MS4	0.205	O1, K1, M2	0.001	K1, Q1, N2	0.006
E10	-0.942	M2, M4	-0.436	S2, S4	-0.324	M2, M4, M6	0.007	M2, S2, MS4	-0.195	O1, K1, M2	0.001	K1, Q1, N2	0.005
E11	0.077	M2, M4	0.337	S2, S4	-0.192	M2, M4, M6	-0.008	M2, S2, MS4	-0.065	O1, K1, M2	0.001	K1, Q1, N2	0.004
E12	0.258	M2, M4	0.381	S2, S4	-0.310	M2, M4, M6	-0.009	M2, S2, MS4	0.199	O1, K1, M2	0.001	K1, Q1, N2	-0.004
E13	-0.033	M2, M4	-0.289	S2, S4	0.269	M2, M4, M6	-0.003	M2, S2, MS4	-0.006	O1, K1, M2	0.001	K1, Q1, N2	-0.005
E14	-0.062	M2, M4	-0.532	S2, S4	0.250	M2, M4, M6	-0.005	M2, S2, MS4	0.218	O1, K1, M2	0	K1, Q1, N2	0.007
E15	-0.346	M2, M4	-0.624	S2, S4	0.315	M2, M4, M6	0.004	M2, S2, MS4	-0.032	O1, K1, M2	-0.001	K1, Q1, N2	-0.008
E16	-0.419	M2, M4	-0.622	S2, S4	0.345	M2, M4, M6	-0.027	M2, S2, MS4	-0.121	O1, K1, M2	-0.001	K1, Q1, N2	0.007
E17	-0.529	M2, M4	-0.298	S2, S4	-0.317	M2, M4, M6	-0.026	M2, S2, MS4	0.100	O1, K1, M2	0	K1, Q1, N2	0.012
E18	-0.509	M2, M4	-0.643	S2, S4	0.266	M2, M4, M6	-0.018	M2, S2, MS4	-0.120	O1, K1, M2	-0.001	K1, Q1, N2	0.007

Tabela 6: Dissipação da energia da maré ($W m^{-2}$) e taxa de dissipação ($W m^{-2} km^{-1}$) ao longo do estuário dos Bons Sinais, num período de 30 dias.

Estações	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18
Distância da boca (<i>km</i>)	0.00	3.37	4.51	5.22	8.03	12.14	10.89	14.14	14.81	16.31	22.73	24.52	27.27	32.15	<u>33.26</u>
Profundidade (<i>m</i>)	8.34	2.34	2.36	8.91	5.00	4.41	8.91	2.31	11.00	10.00	2.64	5.70	7.41	<u>9.65</u>	5.70
Largura (<i>km</i>)	<u>2.14</u>	0.15	0.12	0.52	1.50	0.61	0.50	0.05	0.68	0.24	0.21	0.89	0.39	0.12	0.21
$[U^2]^{\frac{3}{2}}$ (<i>m s⁻¹</i>)	<u>1.28</u>	0.39	0.17	0.23	0.38	0.29	0.16	0	0.15	0.30	0.27	0.04	0	0.02	0
<i>D</i> ($W m^{-2}$)	<u>3.92</u>	1.20	0.52	0.70	1.16	0.87	0.48	0	0.46	0.93	0.83	0.13	0	0.06	0
Intervalo das estações	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	16-18	
Distância (<i>km</i>)	3.37	5.89	3.05	8.65	4.51	3.70	3.19	1.32	4.26	<u>6.29</u>	3.06	2.77	4.88	5.99	
<i>D</i> ($W m^{-2} km^{-1}$)	<u>-0.81</u>	-0.12	0.06	0.05	-0.06	-0.11	-0.15	0.35	0.11	-0.02	-0.23	-0.05	0.01	0	

4. CAPÍTULO IV: DISCUSSÃO

Características das marés no EBS

Os resultados da validação (figura 6) mostram que o modelo ELCOM simulou uma maré de regime semidiurno que está em concordância com a maré observada, i.e., nos períodos oscilatórios e frequências, entretanto, com ligeiras diferenças nas alturas e fases. Essas diferenças são explicadas pelo facto da modelagem numérica por si só acarretar discrepâncias e desvios dos resultados dos modelos relativamente aos dados observados, uma vez que a reprodução e aproximação de um fenómeno real implicam aproximações e parametrizações agregadas nos modelos (Dias, 2013). A validação do modelo ELCOM usando as correntes superficiais (figura 7) mostra que de forma geral há concordância da corrente simulada com a corrente observada na frequência de oscilação. Os períodos de oscilação e as fases estão aproximados um do outro, contudo, diferenças consideráveis são encontradas nas amplitudes das correntes. Numa primeira aproximação tais diferenças poderiam estar associadas a discrepância no intervalo de tempo entre dados observados e simulados. Uma vez que tal factor foi observado com rigor, as diferenças provavelmente estejam relacionadas à qualidade da informação batimétrica fornecida ao modelo com relação as correntes, uma vez que quanto maior for a precisão na batimetria inserida com respeito ao local e respectivo valor da profundidade, maior é a concordância dos resultados (Roversi, 2012).

O regime de maré encontrado neste trabalho concorda com Hoguane (2007) no seu trabalho referente ao perfil diagnóstico da zona costeira, corrobora também com António (2012), João (2014) e Mazzilli (2015) nos seus trabalhos versando acerca da hidrodinâmica do estuário dos Bons Sinais segundo os quais a maré no estuário dos Bons Sinais é de regime semidiurno. Neste trabalho assim como no trabalho de João (2014) o modelo usado foi o ELCOM e os dados de maré usados para configurar o modelo foram extraídos do TMD. Todavia, a maré simulada neste trabalho, sem o zero hidrográfico, tem uma elevação máxima de 1.71m e a de João (2014) tem uma elevação máxima entre 2.2 à 2.5m. Tal deva-se provavelmente a série temporal que é diferente, pois, neste trabalho a série temporal é do mês de Julho ao passo que no trabalho de João (2014) a série parte de Dezembro de um ano à Fevereiro do outro. A magnitude da corrente aqui encontrada está dentro do que António (2012) obteve como resultado, uma vez que para si a magnitude da corrente variou entre 0 e 1.2m/s. O mesmo se pode dizer do trabalho de Mazzilli (2015) que encontrou um mínimo da corrente de cerca de 0.4m/s na maré de quadratura da época seca de 2011 e um máximo de 1.48m/s na maré de sizígia da época chuvosa de 2012. De referir que os resultados de Mazzilli (2015) dizem respeito a região da boca do estuário que é a mesma região dos resultados deste trabalho.

Não obstante as diferenças encontradas na validação com a maré assim como com a corrente superficial, a avaliação quantitativa com recurso aos índices estatísticos revela uma boa performance do modelo ELCOM com R^2 igual a 0.99 e 0.77 e $RMSE$ igual a 0.03 e 0.08 para a maré e corrente de maré, respectivamente. Tal prende-se ao facto de R^2 variar de 0 à 1 e por sua vez valores próximos de 1 denotam que a variabilidade do dados reais é fortemente explicada pelos dados extraídos do modelo e assim melhor se ajusta aos dados observados (Mariano *et al.*, 2017). Para os valores de $RMSE$ entende-se que para uma melhor acurácia do modelo este índice deve estar próximo de zero (Kamidis *et al.*, 2011; Mariano *et al.*, 2017). A comparação de dados observados e simulados e a quantificação da performance de modelos usando os índices estatísticos $RMSE$ e R^2 foi feita em outros estudos como o de Jiang *et al.* (2011) e Balños *et al.* (2014). Para Jiang *et al.* (2011) o modelo reproduziu bem a elevação de maré, com melhor precisão, do que correntes em todas as estações por si definidas. O R^2 variou entre 0.97 e 0.98, e entre 0.63 e 0.90 para a elevação de maré e corrente de maré, respectivamente, ao passo que o $RMSE$ variou entre 0.09 e 0.12, e entre 0.04 e 0.08 para a elevação de maré e corrente de maré, respectivamente. Este cenário de melhor reprodução da elevação de maré em detrimento às correntes é similar ao reproduzido neste trabalho. Balños *et al.* (2014) no seu estudo relativo às correntes tiveram uma boa reprodução pelo modelo com valores de R^2 em torno de 0.90 em todas as estações definidas e $RMSE$ entre 0.12 e 0.13.

No geral, a configuração do modelo ELCOM ao estuário dos Bons Sinais mostrou-se boa, não obstante a melhor precisão na validação com a elevação da maré do que com a corrente de maré.

Variação da elevação da maré e corrente de maré

As amplitudes máximas da elevação e corrente de maré tanto na fase de maré de sizígia quanto na de quadratura diminuem estuário acima, tal como ilustra a tabela 3. O decaimento da amplitude da maré é denominado de atenuação da maré caracterizando um estuário hipossíncrono, esta atenuação é por sua vez devida ao facto do efeito do atrito dominar sobre o efeito da convergência (Mazzilli, 2015; Coelho, 2016; Bier, 2018). Estes dois factores, a convergência e o atrito, estão envolvidos nas oscilações harmónicas de curto período devidas a morfologia estuarina a que a onda de maré é submetida. Deste modo, a convergência das margens do estuário comprime a onda de maré de tal modo que resulta no aumento da sua amplitude. No entanto, ao se propagar estuário acima o atrito com o fundo dissipa a energia da onda resultando na redução da amplitude (Mazzilli, 2015; Coelho, 2016; Cook e Lippmann, 2017; Bier, 2018). Assim sendo, ao se propagar pelo estuário a onda de maré pode ser substancialmente deformada, o que dependendo da importância destes factores o estuário pode ser classificado como hipersíncrono, síncrono ou hipossíncrono (Mazzilli, 2015;

Coelho, 2016; Bier, 2018). Não obstante o perfil da amplitude máxima revelar atenuação da mesma há locais ao longo do estuário em que a amplitude aumenta e outros em que a amplitude é constante. A luz da convergência e do atrito, os locais onde a amplitude aumenta apresentam, geralmente, uma forma afunilada e a convergência domina o atrito, o que faz com que a maré e a corrente de maré aumentem (amplificação da maré), sendo assim classificadas como zonas do estuário hipersíncronas. Mas nos locais onde a amplitude não varia há equilíbrio dos dois efeitos e a amplitude permanece constante, caracterizando zonas do estuário síncronas (Mazzilli, 2015; Coelho, 2016; Bier, 2018). Ademais encontram-se situações em que no mesmo intervalo entre estações a amplitude da elevação de maré aumenta mas a amplitude da corrente diminui e vice-versa. Este comportamento denota, provavelmente, o efeito contrário que a geometria do estuário tem relativamente a maré em comparação a corrente de maré ou a possível influência de outros factores na sua dinâmica que não foram aqui analisados.

De acordo com a tabela 4, das 14 zonas marcadas pelos intervalos entre estações ao longo do estuário, na maré de sizígia 7 delas apresentam sinal negativo para a elevação de maré e 9 para a corrente de maré, o que indica a importância do atrito na dinâmica desses parâmetros. Em 5 zonas tanto para a elevação quanto à corrente de maré o efeito da convergência das margens excede o efeito do atrito com o fundo, nessas zonas o sinal é positivo. Nessa fase de sizígia, apenas para a elevação de maré existem duas zonas de equilíbrio desses efeitos, nestas zonas não há variação da maré. Na fase de quadratura existem 4 e 8 zonas de dominância do efeito do atrito com o fundo sobre a convergência das margens para a elevação de maré e corrente de maré, respectivamente. Existem ainda 3 e 4 zonas de dominância do efeito das margens sobre o efeito do atrito, nas restantes zonas tanto para a elevação como para a corrente de maré há equilíbrio desses efeitos. Esse facto evidencia a flutuação da importância desses factores na dinâmica da onda de maré ao longo do ciclo de maré (sizígia-quadratura) de tal modo que as mesmas zonas, tanto para a elevação como para a corrente de maré variam de hipersíncrono /hipossíncrono à síncrono. O valor absoluto revela o grau de importância relativa entre os factores de forma que quanto maior for o valor, maior é sua influência sobre a onda de maré. Entretanto, esta análise só é aplicável naquelas zonas, i.e., em intervalos entre estações, cuja distância de separação é aproximadamente a mesma. Com efeito, nas zonas cuja distância de separação aproximada é de 3 km (4-5, 6-7, 10-11, 14-15, 15-16), na maré de sizígia o efeito do atrito sobre a onda de maré é ligeiramente importante no intervalo 6-7, para a elevação da maré, e mais importante no intervalo 4-5 e corrente de maré. No período da maré de quadratura o efeito da convergência sobre a onda de maré é ligeiramente importante no intervalo 15-16 para a elevação da maré, ao passo que para a corrente de maré o efeito do atrito sobre a onda de maré é mais importante no intervalo 4-5. Nos intervalos com 4 km de separação aproximada (9-10 e 12-13), na maré de sizígia

o efeito do atrito sobre a onda de maré mais importante no intervalo 12-13 para a elevação da maré, para a corrente de maré o efeito da convergência sobre a onda da maré é mais importante no intervalo 9-10. Na maré de quadratura, existe apenas um intervalo de desigualdade destes factores para a elevação da maré, sendo que para a corrente de maré a o feito da convergência sobre a onda de maré é ligeiramente maior no intervalo 9-10. Em locais com 5 km de separação aproximada (8-9 e 16-17), na maré de sizígia o efeito do atrito sobre a onda de maré é mais importante no intervalo 8-9 para a elevação da maré, por outro lado para a corrente de maré, o efeito da convergência sobre a onda de maré é mais importante na estação 16-17. Na maré de quadratura, tanto para elevação de maré como para a corrente de maré existe apenas um intervalo de desigualdade do efeito de um ou do outro factor sobre a onda de maré. Por último, são os locais com 6 km de distância de separação aproximada (5-6, 13-14 e 16-18), na maré de sizígia o efeito da convergência sobre a onda de maré é mais importante no intervalo 5-6 para a elevação da maré, para a corrente de maré é mais importante o efeito do atrito sobre a onda de maré no intervalo 13-14. Na maré de quadratura, os efeitos da convergência sobre a onda de maré no intervalo 5-6 e do atrito sobre a onda de maré no intervalo 13-14 são equiparáveis para a elevação da maré. Para a corrente de maré, o efeito do atrito sobre a onda de maré é ligeiramente importante no intervalo 5-6. No geral, o efeito do atrito sobre a onda de maré é mais importante na maré de sizígia, devendo-se por sua vez à conjugação das forças atractivas do Sol e da Lua que intensificam a força geradora de marés que resultante dessa conjugação.

A tendência geral de atenuação da onda de maré estuário acima tem implicações no alcance da intrusão salina, visto que a diminuição das amplitudes da maré dentro do canal estuarino é um dos factores que contribuem para a diminuição da intrusão salina (Eslami *et al.*, 2019). Esta tendência geral foi também identificada em vários outros trabalhos, tal como no trabalho de Bier (2018) no Canal da Barra da Lagoa em Florianópolis, Mao *et al.* (2004) no estuário do rio Pearl na China e Freitas *et al.* (2012) no estuário do rio Amazonas em Brasil. Por outro lado difere de outros como é o de Eslami *et al.* (2019) no Delta do rio Mekong na China e Mazzilli (2015) no estuário dos Bons Sinais em Moçambique.

Sabe-se que a dinâmica da onda de maré nos estuários é determinada, entre outros aspectos, pela geometria dos estuários. Neste âmbito, verificaram-se variações espaciais e temporais dos efeitos morfológicos na amplitude da maré e da corrente de maré, sem descuidar do facto do efeito da fricção com o fundo prevalecer sobre o efeito da convergência das margens do canal.

Assimetria da onda de maré

De modo a identificar o papel dos diferentes constituintes harmónicos na geração da assimetria da maré foram usadas séries temporais da elevação da maré com registos horários, das diversas estações ao longo do estuário dos Bons Sinais, produzida pelo modelo ELCOM. Pelo facto do tempo de corrida do modelo ter sido de 30 dias quando aplicada a análise harmónica através do pacote *t_tide* (Pawlowicz *et al.*, 2002) foram identificados 29 constituintes harmónicos de maré. Como se pode depreender, esse tempo de corrida por si só reduz o número de constituintes a serem resolvidos. Com a aplicação das equações 6 e 7 o número de possíveis combinações que contribuem na assimetria reduz na medida que apenas duplas e triplas combinações são aplicáveis às equações 6 e 7. Contudo, apesar da assimetria ser o resultado de duplas, triplas e quadruplas combinações dos constituintes harmónicos (Song *et al.*, 2011), as combinações usadas neste trabalho dão uma ideia realística e próxima da assimetria global, aquela que seria obtida com um tempo de corrida de um ano. A assimetria é resultado das interacções não lineares dos constituintes de águas rasas (sobremarés e marés compostas) e constituintes puramente astronómicos, contudo, observa-se que a distorção deve-se principalmente às interacções não lineares na medida que sobremarés e marés compostas são envolvidas nas combinações acima mencionadas. De acordo com a tabela 5 a assimetria varia espacialmente ao longo das estações no estuário dos Bons Sinais tanto no tipo (assimetria positiva e negativa) como na magnitude (valor absoluto), sendo mais forte na estação 10, e fraca na estação 13, negativa em ambas estações. Apesar das oscilações no tipo de maré ao longo das estações o estuário como um todo é caracterizado com assimetria negativa. Tal assimetria cuja duração da vazante é menor reflecte maior velocidade das correntes na vazante em detrimento da enchente, e o inverso acontece na assimetria positiva.

O domínio da corrente resultante da assimetria tem impacto no transporte de sedimentos do fundo e, a longo termo, na morfologia dos estuários, uma vez que maiores correntes na enchente tendem a abastecer os estuários com sedimentos grossos, ao passo que maiores correntes na vazante tendem a evacuar a carga de sedimentos do fundo em direcção ao oceano (Dronkers, 1986; Friedrichs e Aubrey, 1988; Florence *et al.*, 2015; Guo *et al.*, 2019). Esta alteração da morfologia estuarina por seu turno altera de forma significativa a assimetria da maré, especialmente quando a intervenção humana for maior em resultado de actividades como dragagem, extracção de sal e construção de barragens (Zhang *et al.*, 2018). De acordo com os resultados da assimetria deste trabalho espera-se que nos locais de assimetria positiva haja entrada de sedimentos, e saída de sedimentos nos locais de assimetria negativa, em que as zonas intermédias entre os locais de assimetria positiva e negativa seriam propensas a acumulação de sedimentos. Tal acumulação de sedimentos pode, a escala longa, resultar em bancos de areia que por sua vez podem demandar cuidados acrescidos relativamente à navegação

no canal estuarino dos Bons Sinais. Esta presunção não leva em consideração as inversões, na escala temporal, da assimetria na área de estudo, uma vez que podem existir inversões quinzenais da assimetria por conta de um ciclo de maré (sizígia-quadratura) (Florence *et al.*, 2015). Contudo, nem sempre menor duração da vazante ou enchente implica maiores correntes na mesma fase, existe o que se chama de dupla dominância da vazante (do inglês *double ebb-dominance*) em que tanto a duração quanto as correntes são maiores na vazante, e também dupla dominância da enchente (do inglês *double flood-dominance*) em que tanto a duração quanto as correntes são maiores na enchente (Jiang *et al.*, 2011). Este tipo de assimetria não pode ser aferido neste trabalho pelo facto de se não haver usado a corrente de maré para tal propósito, de tal modo que não podemos afirmar categoricamente que a assimetria negativa encontrada no estuário dos Bons Sinais acarreta menor duração e maior velocidade da corrente aquando da vazante.

No estuário dos Bons Sinais, em 13 das 15 estações a assimetria da maré é determinada pela combinação de M_2 e M_4 , sendo nas outras 2 estações dominada por S_2 e S_4 . Resultados similares foram encontrados por Song *et al.* (2011) que identificaram a dominância da combinação M_2 e M_4 , em 16 de 18 estações semidiurnas, sendo que nas outras 2 estações a assimetria foi dominada por M_2 , S_2 e MS_4 . Resultados encontrados por Zhang *et al.*, (2018) também reflectem dominância de M_2 e M_4 em 13 estações num total 15, sendo nas 2 restantes dominada pela combinação de K_1 , O_1 e M_2 . Compreende-se a dominância de M_2 e M_4 na maior parte das estações nestes estudos pelo facto de em muitas zonas costeiras onde a maré é semidiurna o constituinte dominante ser M_2 e por conseguinte o constituinte de águas rasas mais significativo ser o primeiro harmónico M_4 , sendo que a geração de M_4 e sua adição à M_2 é, geralmente, a principal causa da assimetria em águas rasas (Friedrichs e Aubrey, 1988; Miyao e Harari, 1998; Dias *et al.* 2013; Arménio *et al.*, 2017). Relativamente a assimetria no estuário dos Bons Sinais, Mazzilli (2015) identificou uma tendência geral de dominância de correntes de vazante estuário acima aumentando da boca do estuário à confluência dos rios Licuar e Cúacúa. O facto de Mazzilli (2015) ter identificado um único tipo de assimetria ao longo do estuário deve-se ao número de estações usadas para essa análise, uma vez que ele usou 3 estações com uma grande separação entre si quando no presente estudo foram usadas 15 estações cuja separação entre si é muito menor comparativamente à separação entre as estações de Mazzilli (2015). O aumento da assimetria da boca do estuário à confluência dos rios Licuar e Cúacúa como resultado da diminuição da profundidade que Mazzilli (2015) observou não condiz com o encontrado neste trabalho, pois a assimetria total neste trabalho não apresenta relação com a geometria do estuário. Contudo, uma análise do perfil de cada uma das combinações β_1 , β_2 , β_3 e β_6 ao longo do estuário revela um aumento da assimetria com a distância da boca do estuário na qual β_2 apresenta maior correlação com a distância da boca do estuário com R^2 de 0.62, seguido de β_3 com R^2 de 0.59, β_1 com

R^2 de 0.43 e β_6 com R^2 de 0.33. As restantes combinações apresentam uma relação inversa e insignificante com a distância da boca do estuário. A diferença do perfil da assimetria total deste trabalho com o perfil de Mazzilli (2015) deve-se, provavelmente, ao emprego da análise harmónica com o pacote *t_tide* para obtenção de dados de modo a analisar a assimetria. Isso emana do pacote *t_tide* considerar a variação dos constituintes de maré em função da geometria estuarina apenas, ao passo que no pacote *ns_tide*, resultado da modificação do *t_tide* (Pawlowicz *et al.*, 2002) feita por Matte *et al.* (2013), outros factores como a descarga do rio alteram a dinâmica da maré (Zhang *et al.*, 2018).

Contudo, apesar da sequência da dominância das combinações dos constituintes harmónicos relacionados entre si pela frequência variar ao longo das estações, a assimetria da maré no estuário dos Bons Sinais recebe maior contribuição da interacção entre M2 e M4 seguida da relação entre S2 e S4.

De acordo com a equação 11, valores da dissipação da energia de maré aumentam, no geral, associados a áreas com maior intensidade de correntes assim como a áreas rasas com maior impacto da fricção do fundo, pelo facto de profundidades maiores tornarem o efeito da fricção do fundo negligenciável. Por outro lado, a convergência das margens é um factor que também concorre para o aumento das correntes de maré. Consequentemente, o efeito conjugado do afunilamento do canal e a redução da profundidade podem fazer com que a fricção do fundo e as correntes aumentem, resultando no aumento da dissipação da energia de maré (Dias *et al.* 2013). Deste modo, mudanças na batimetria estuarina e na geometria podem ter um efeito substancial não apenas na distorção da onda de maré mas também na dissipação da energia de maré. A dissipação média da energia de maré nos Bons Sinais apresentou-se maior na estação 4 perto da boca do estuário com cerca de 4 W m^{-2} e decresce até zero nas estações 11, 16 e 18, apresentando um perfil de redução da dissipação da energia de maré da boca estuário acima. Este perfil pode ser justificado pelo perfil das correntes que, no geral, também diminui estuário acima e apresenta forte correlação com o da dissipação da energia de maré. Ademais, existe uma relação proporcional que não se pode desprezar entre a largura do canal e as correntes, e por conseguinte entre a largura e a dissipação, o que sugere que no estuário dos Bons Sinais a largura do canal é que regula a variação das correntes em detrimento a profundidade. Este resultado não concorda tanto com o de Dias *et al.* (2013) como com o de Seim *et al.* (2006) na medida em que em ambos trabalhos a dissipação ao longo do canal estuarino é governada pela profundidade local, havendo no geral, uma relação proporcional também.

O conhecimento das condições da onda, no caso em apreço, a dissipação da energia de maré no estuário dos Bons Sinais é de elevada importância para o desenho de portos e trabalhos de protecção

costeira na medida em que faculta subsídios relativos aos locais ao longo do estuário propensos a maior dissipação de energia e por conseguinte a maiores correntes. Além disso, a dissipação de energia sugere a perda do poder de transporte de sedimentos pela onda o que resulta na sua deposição, com isso quanto mais intensa a dissipação da energia da onda mais sedimentos depositados esperam-se.

A taxa de dissipação média da energia de maré também diminui estuário acima, contudo, evidenciam-se locais de aumento da taxa de dissipação da energia de maré tomando em consideração os sinais, negativo para a redução e positivo para o aumento. Este perfil por sua vez difere do perfil encontrado por Seim *et al.* (2006) que tende a aumentar estuário acima. Ignorando o sinal, a taxa de dissipação da energia de maré quantifica a variação da dissipação da energia de maré por unidade de distância entre duas estações. Deste modo, comparando a taxa de dissipação da energia de maré entre zonas com distância de separação aproximada de 3 km (estações 4-5, 6-7, 10-11, 14-15, 15-16), o maior valor absoluto é de $0.81 \text{ W m}^{-2} \text{ km}^{-1}$ no intervalo entre as estações 4 e 5. Em intervalos com 4 km de separação aproximada (9-10 e 12-13) a taxa de dissipação da energia de maré é a mesma de cerca $0.11 \text{ W m}^{-2} \text{ km}^{-1}$. O maior valor em locais com 5 km de separação aproximada (8-9 e 16-17) é de $0.06 \text{ W m}^{-2} \text{ km}^{-1}$, referente ao intervalo 6-7 e $0.12 \text{ W m}^{-2} \text{ km}^{-1}$ no intervalo 5-6 referente aos locais com 6 km de distância de separação aproximada (5-6, 13-14 e 16-18). Portanto, a taxa de dissipação da energia de maré ao longo do estuário dos Bons Sinais está na ordem de $0.2 \text{ W m}^{-2} \text{ km}^{-1}$, similar à taxa de dissipação encontrada por Seim *et al.* (2006) que está na ordem de $0.6 \text{ W m}^{-2} \text{ km}^{-1}$.

Os resultados da dissipação da energia de maré encontrados neste trabalho mostram uma relação da dissipação com a largura do canal e não com a profundidade, sugerindo assim que no estuário dos Bons Sinais a fricção do fundo tem um impacto negligenciável na dissipação da energia da onda de maré.

5. CAPÍTULO V: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

- Na segunda fase do processo de configuração do ELCOM ao estuário dos Bons Sinais foi feita a calibração e validação dos resultados do modelo. Este processo foi satisfatório, apesar da melhor precisão na validação ter sido com a elevação da maré do que com a corrente de maré.
- A dinâmica da onda de maré nos estuários é determinada, entre outros aspectos, pela geometria dos estuários. Neste âmbito, verificaram-se variações espaciais e temporais dos efeitos morfológicos na amplitude da maré e da corrente de maré, contudo, o efeito da fricção com o fundo prevalece sobre o efeito da convergência das margens do canal.
- A sequência da dominância das combinações dos constituintes harmônicos relacionados entre si pela frequência varia ao longo das estações, porém, a assimetria da maré no estuário dos Bons Sinais recebe maior contribuição da interação entre M_2 e M_4 seguida da relação entre S_2 e S_4 .
- Os resultados da dissipação da energia de maré encontrados neste trabalho mostram uma relação da dissipação com a largura do canal e não com a profundidade, deste modo, no estuário dos Bons Sinais a fricção do fundo tem um impacto negligenciável na dissipação da energia da onda de maré.

5.2. Recomendações

- Recomenda-se para estudos futuros simulações longas da hidrodinâmica associada à dispersão de larvas, uma vez que a hidrodinâmica é responsável pela variação de vários parâmetros, entre eles, parâmetros biológicos.
- Recomenda-se também no que diz respeito à dissipação da energia de maré avaliar o impacto de parâmetros como o perímetro húmido, área da secção transversal, ou o raio hidráulico na dissipação da energia da maré.
- Com vista a aprofundar a compreensão da hidrodinâmica recomenda-se estudar possíveis inversões na escala temporal na assimetria da maré e a ocorrência da dupla assimetria usando o método desenvolvido por Nidzieko (2010).

6. Referências bibliográficas

- António, M. H. (2012). Hydrodynamic of the Bons Sinais Estuary. Dissertação de Mestrado. Universidade Eduardo Mondlane, Quelimane.
- Barbosa, L. P. (2008). Aplicação da Modelagem Hidrodinâmica na Circulação do Estuário do rio Maracanã (Ne do Pará) . Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém.
- Bier, F. B. (2018). Aspectos Hidrodinâmicos e Sedimentológicos em um Canal de Maré: Estudo de caso do Canal da Barra da Lagoa, Florianópolis - SC. Dissertação Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Canivete, G. D. (2019). Avaliação da Influência das Descargas Fluviais na Distribuição da Salinidade no Estuário Bons Sinais-Zambézia. Tese de Licenciatura. Universidade Eduardo Mondlane, Quelimane.
- Coelho, A. d. (2016). Método de Previsão de Maré Oceânica, utilizando Análise Harmônica em séries de 18,69 anos. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Cook, S., & Lippmann, T. (2017). Tidal Energy Dissipation in three Estuarine Environments. *Coastal Dynamics*, 20.
- Costa, D. d. (2016). Uso de Dados Termais Orbitais no Modelo ELCOM para a região de Guapé (MG) do Reservatório de Faunas. Dissertação de Mestardo. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José de Campos.
- Cumbi, A. J. (2019). Influência das Marés e Correntes de maré no Tempo de Renovação da Água no Estuário dos Bons Sinais. Tese de Licenciatura. Universidade Eduardo mondlane, Quelimane.
- Dallimore, B. H. (2007). Estuary, Lake and Coastal Ocean Model:ELCOM. Austrália: Livro 53.
- Dias, J. M., Valentim, J. M., & Sousa, M. C. (2013). A Numerical Study of local Variations in Tidal Regime of Tagus Estuary, Portugal. Portugal.
- Dronkers, J. (1986). Tidal Asymmetry and Estuarine Morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, 15.
- Duarte, A. A., & Vieira, J. M. (1997). Caracterização dos Ambientes Estuarinos. Mistura em estuários. Braga.

- Fey, J. D. (2019). Caracterização e Modelagem Hidrodinâmica da Circulação do Sistema Estuarino do rio Guaratuba (Bertioga - SP). Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, São Vicente.
- Florence, T., Isabelle, B., T, C., & Olivier, L. M. (2015). Fortnightly Tidal Asymmetry inversions and perspectives on Sediment Dynamics in a Macrotidal Estuary (Charente, France). France: Continental Shelf Research.
- Freitas, P. T., Silveira, O. F., & Asp, N. E. (2012). Tide Distortion and Attenuation in an Amazonian tidal river. *Brazilian journal of oceanography*, 18.
- Friedrichs, C., & Aubrey, D. G. (1988). Non-linear Tidal Distortion in Shallow well-mixed Estuaries: A Synthesis. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 14.
- Gallo, M., & Vinzon, S. B. (2016). Generation of Overtides and Compound Tides in Amazon Estuary. *Ocean Dynamics*, 9.
- Guo, L., Wang, Z. B., Townend, I., & He, Q. (2019). Quantification of Tidal Asymmetry and Its Nonstationary Variations. *Journal of Geophysical Research*, 15.
- Harari, R. d. (1998). Resultados de Modelagem Numérica Hidrodinâmica no Complexo Estuarino de Paranaguá (PR). São Paulo.
- Jiang, A. W., Ranasinghe, R., & Cowell, P. (2011). Tidal Asymmetry of a Shallow, well-mixed Estuary and the Implications on net Sediment Transport: A Numerical Modelling Study. *Journal of Civil Engineering*, 34.
- João, T. M. (2014). Estudo da Hidrodinâmica e Renovação da Água no Estuário dos Bons Sinais. Quelimane. Dissertação de Mestrado. Universidade Eduardo Mondlane, Quelimane.
- Kowalewska-Kawkowska, H., & Marks, R. (2015). Estuary, Estuarine Hydrodynamics. Polónia: Spring Science+Business Media Dordecht livro.
- Lucas L. A. J. Miguel, F. P. (2017). A Mecânica do Transporte de Sedimentos em Suspensão no Estuário do rio Macuse, Moçambique, Sudeste de África. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 17.
- Mao, Q., Yin, K., Shi, P., Gan, J., & Qi, Y. (2004). Tides and Tidal Currents in the Pearl River Estuary. *Continental Shelf Research*, 13.

- Mariano, E. B., Cavalcanti, E. P., & Beserra, E. A. (2017). Análise Comparativa da Velocidade do Vento Simulado Pelo BRAMS com Dados Observados e de Reanálises. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 8.
- Mazzilli, S. (2015). Understanding Estuarine Hydrodynamics for Decision Making in data-poor Coastal Environments. Tese de Doutorado. Universidade de Cambridge, Inglaterra.
- Miyao, S. Y., & Harari, J. (1989). Estudo preliminar da Maré e das Correntes de maré da Região Estuarina de Cananéia (25°S -48°W). São Paulo.
- Nidzieko, N. J. (2010). Tidal Asymmetry in Estuaries with mixed semidiurnal/diurnal Tides. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 14.
- Paula, N. d., & Silva, F. (2014). Dinâmica de uma canal Estuarino fracamente Estratificado. Vitoria Dissertação Mestrado.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical Tidal Harmonic Analysis with Error Analysis in MaTLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 9.
- Pond, S., & Pickard, G. L. (1983). Introductory Dynamical Oceanography. Canada: Elsevier - Butterworth Heinemann.
- Roversi, F. (2012). Estudo Hidrodinâmico e de Renovação das Águas do Sistema Estuarino de Santos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Samaritano dos Santos, L. A. (2008). Modelagem numérica da dinâmica do sistema estuarino Caravela-Peruípe, BA. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Segundo, G. H. (2007). Processos Oceanográficos na Região Costeira e Estuarina do rio Caeté, Pará, Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense, Niterói.
- Seim, H., Blanton, J., & Elston, S. (2006). Tidal Circulation and Energy Dissipation in a Shallow, sinuous Estuary. *Ocean Dynamics*, 17.
- Simbine, E. A. (2016). Comportamento de Marés e Correntes de maré na Baía de Nacala a partir do modelo ELCOM. Quelimane.
- Soares, J. d. (2013). Análise da Variabilidade espaço-temporal de Dados de nível ao longo do Litoral Brasileiro. Florianópolis monografia bachelor.

Song, D., Wang, X. H., Kiss, A. E., & Bao, X. (2011). The Contribution to Tidal Asymmetry by different combinations of Tidal constituents. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 13.

The Open University. (1999). *Waves, Tides and Shallow Water Processes (Vol. 2)*. Young Publisher, Londres. 12pp.

Yu, X., Zhang, W., & Hoitink, A. J. (2020). Impact of river Discharge seasonality change on Tidal duration Asymmetry in the Yangtze River estuary. *Scientific Reports*, 17.

Apêndice 1 Carta náutica do estuário dos Bons Sinais



Apêndice 2 MODELO ELCOM

ELCOM (Estuary and Lake Computer Model) é uma ferramenta tridimensional de modelagem numérica que aplica princípios hidrodinâmicos e termodinâmicos, para simular o comportamento espacial e temporal de parâmetros físicos (temperatura, salinidade, correntes e poluentes) em lagos, estuários e reservatórios estratificados, sujeitos a factores ambientais externos, tais como cisalhamento dos ventos, aquecimento e resfriamento da superfície. O modelo foi desenvolvido pelo *Centre for Water Research (CWR)* da *University of Western Australia (UWA)* (Dallimore e Hodges, 2007; João, 2014; Lucas *et al.*, 2017; Simbine, 2016; Costa, 2016; Cumbi, 2019). O modelo resolve as equações dinâmicas de Navier-Stokes, com as aproximações de Boussinesq e hidrostática (Reynolds-averaged Navier Stokes-RANS), e as equações de transporte para escalares (temperatura, salinidade e traçadores). Por exemplo, o modelo pode ser configurado para auxiliar a compreensão da influência dos parâmetros que controlam a hidrodinâmica no estuário ou configurado para a realização de pesquisas mais complexas a partir de uma selecção detalhada de variáveis (Dallimore e Hodges, 2007; João, 2014; Costa, 2016). As equações que governam a hidrodinâmica no ELCOM estão sumarizadas na tabela 1.

Tabela 1: Equações utilizadas no modelo ELCOM (fonte: Costa, 2016).

Transporte de *momentum*:

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_j} = -g \left(\frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_z^\eta \rho' dz \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(v_1 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(v_2 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(v_3 \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_3} \right) - \varepsilon_{\alpha\beta\gamma} f U_\beta$$

Transporte de escalares:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (C U_i) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(k_1 \frac{\partial C}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(k_2 \frac{\partial C}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left(k_3 \frac{\partial C}{\partial x_3} \right) + S_c$$

Elevação da superfície livre:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_0^\eta U_\alpha dz$$

Cisalhamento do vento na superfície:

$$u_*^2 = C_{10} W_\beta^2 W_\alpha \frac{\rho_{ar}}{\rho_{\acute{a}gua}} \frac{1}{2}$$

Adição de *momentum* fornecido pelo vento:

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial t} = \frac{(U_*)_\alpha^2}{h}$$

onde:

α, β : Espaço horizontal bidimensional;
 i, j, k : Espaço tridimensional;
 U : Velocidade média da água (Reynolds Averaged);
 g : Aceleração de gravidade;
 ρ_0, ρ' : Densidade de referência e anomalia de densidade;
 ν : viscosidade;
 $\varepsilon_{\alpha\beta}$: Tensor de permutação para as componentes α e β do espaço bidimensional;
 f : Parâmetro de Coriolis;
 C : Concentração de escalares;
 S_c : Número de Prandtl para temperatura;
 z : Altura média a partir do fundo (positivo para cima);
 η : Altura média da superfície livre;
 W_α, W_β : Velocidade do vento;
 u_* : Velocidade de cisalhamento do vento;
 C_{10} : Coeficiente de troca de momentum a 10 metros;
 $\rho_{ar}, \rho_{\acute{a}gua}$: Densidade do ar e da água.

Este modelo tem como finalidade viabilizar os estudos de sistemas aquáticos em escalas temporais que compreendem desde horas até meses, embora o limite de aplicabilidade dependa do tamanho da malha e dos recursos computacionais disponíveis. É adequado para estudos comparativos de padrões de circulação de verão e de inverno, eventos de cheia e seca ou dispersão de poluentes (João, 2014; Cumbi, 2019). O modelo roda em ambiente *Linux* (podendo rodar em ambiente *Windows* a partir de um emulado do sistema *Linux* como, por exemplo, o *Cygwin*, que pode ser encontrado gratuitamente em seu *site* comercial). A saída do modelo é composta por uma série de arquivos tanto no formato ASCII como no formato netCDF que é dedicado a interfaces gráficas tais como o *Matlab*, ou outras específicas tais como as desenvolvidas pelo CWR em linguagem Java, como o *Modeller*. O ELCOM utiliza o método de diferenças finitas, que resolve as equações diferenciais com aproximação baseada nas séries de Taylor e esquema dessas diferenças finitas tem como base aspectos de modelação acima descritos em que as variáveis dependentes são calculadas de uma forma explícita em cada parte de tempo e noutra parte de tempo de forma implícita (Simbine, 2019).

O modelo permite a definição dos elementos da grade numérica com profundidades variadas (no eixo z), por exemplo, neste trabalho foram criadas 16 camadas com 1.5 metros de profundidade cada. O usuário é livre de definir valores de dz de forma arbitrária, contudo, a precisão e estabilidade da

simulação podem ser afectadas pelo grau de irregularidade das camadas. No geral, a simulação corre melhor (i.e. com melhor precisão) usando uma grade com dz uniforme (Dallimore e Hodges, 2007). As dimensões horizontais x e y , podem possuir dimensões quadradas ($x = y$) ou rectangulares ($x \neq y$), neste trabalho foram utilizadas 160 000 células com dimensões quadradas $x = y = 70$ metros (figura 2).

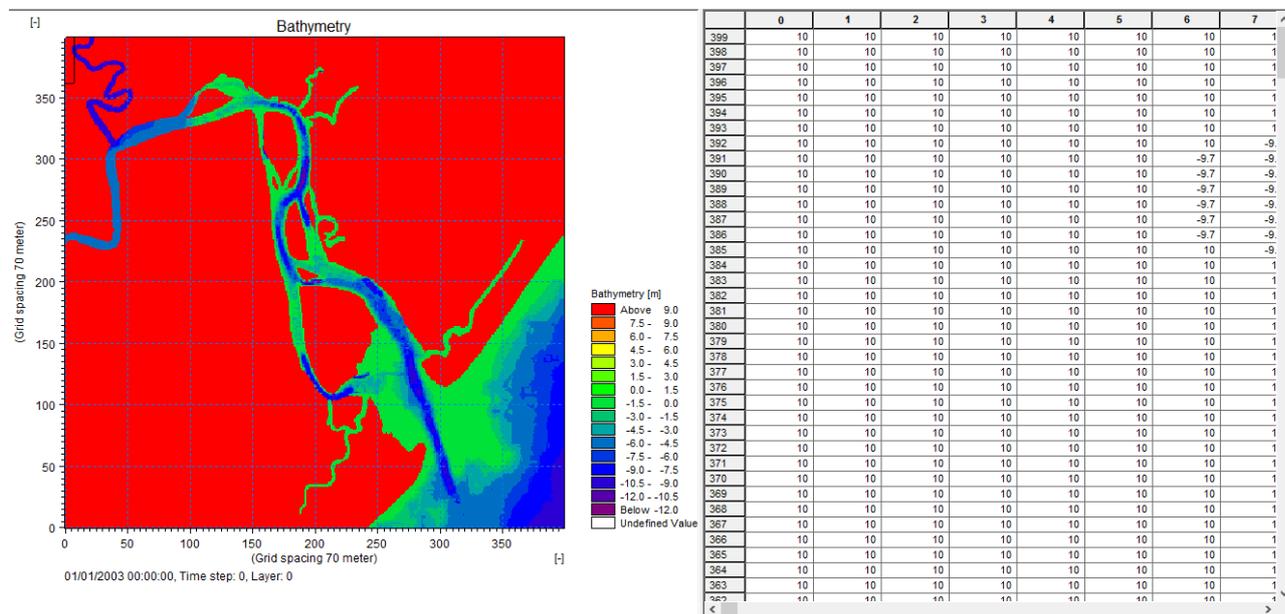


Figura 2: Formato de entrada da grade batimétrica com espaçamento de 70m.

A execução do modelo ELCOM, compreende várias etapas, conforme ilustrado na figura 3, onde o código numérico da componente principal (ELCOM) está regido na linguagem Fortran 90. O esquema resume as variáveis chave do modelo que envolve: o pré-processamento de dados, que consiste na preparação da batimetria, definição das condições de fronteira e iniciais, preparação de dados meteorológicos e descargas fluviais (Costa, 2016; Lucas *et al.*, 2017). Os dados definidos no ELCOM são processados para a produção de ficheiros NetCDF. Neste trabalho foram produzidos três tipos de ficheiros: perfis verticais, horizontais em cortina e em malha. A fase do pós-processamento corresponde aos resultados em formato NetCDF que podem posteriormente ser convertidos e lidos para sua visualização e seu consumo pelos usuários através de comandos estruturados no *Maltas*, *OceanDataview*, ELCOM, no molde *CWRModeller*, entre outros (João, 2014; Simbine, 2016; Cumbi, 2019).

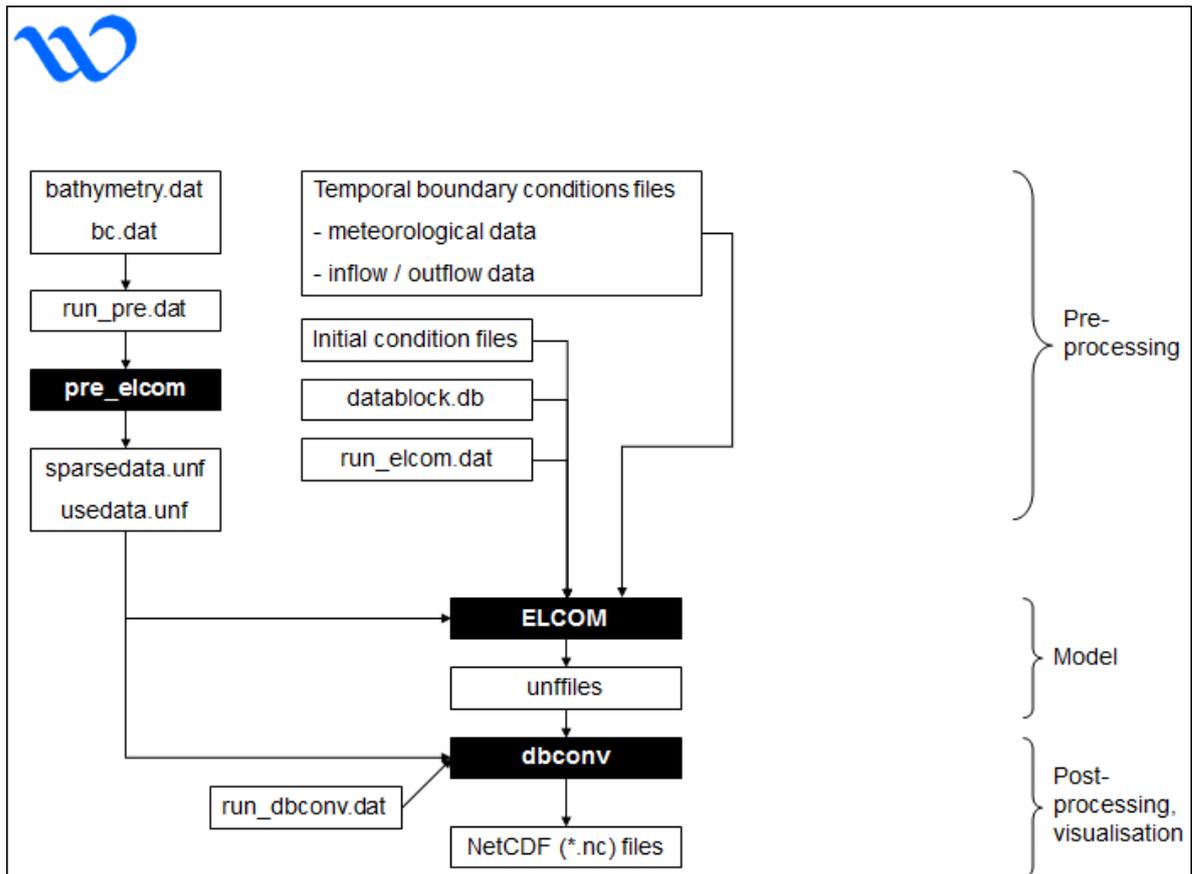


Figura 3: Fluxograma dos módulos do ELCOM.

Apêndice 3 Ficheiro de configuração do ELCOM

```
! -----!  
!  
FILE      run_elcom.dat  
!  
! -----!  
!  
'BioHydrodynamic Model of Bons Sinais'      TITLE  
'Banito B. Magestade'          ANALYST  
'ESCMC-UEM '                    ORGANIZATION  
'Quelimane 2011'                COMMENT  
!  
! -----!  
! time controls                    !  
!  
2011195.375      start_date_cwr ! CWR Julian day  
60               del_t        ! Time step (s)  
21600            iter_max     ! Number of time steps  
! -----!  
! file directories (require quote marks around)      !  
! (note that incomplete quotes can cause code to hang)  !  
!  
'infiles'       infile_dir  
'unfiles'       outfile_unf_dir  
'txtfiles'      outfile_txt_dir  
! -----!  
! input file names (include exact file extension)      !  
!  
sparsedata.unf   3D_data_file  
usedata.unf      preprocessor_file  
openScalars1.dat boundary_condition_file  
river_cuacua.dat boundary_condition_file  
river_licuari.dat boundary_condition_file  
descargasl.dat   boundary_condition_file  
descargasc.dat   boundary_condition_file
```

```

datablock_Banito.db      datablock_file

PredictedTideHeight.dat  boundary_condition_file
metdata.dat              boundary_condition_file
WIND_SPEED.dat           boundary_condition_file
WIND_DIR.dat             boundary_condition_file
! save_2011y_181d_0h_0m_0s.unf  restart_final
! -----!
! initial condition file names (include exact file extension)      !
!                               !
! initialProfileTemperature.dat  initial_profile_file delete
! initialHorizontalSalinity.dat  initial_horiz_file delete
!                               !
! -----!
! simulation modules (0=OFF,1=ON)                                     !
6      iclosure           ! closure model
1      iheat_input        ! surface thermodynamics
0      iatmstability      ! atmospheric stability
1      iflow              ! inflow/outflow
1      itemperature       ! temperature
1      isalinity          ! salinity
1      idensity           ! density (baroclinic forcing)
1      irain              ! rainfall input
0      ibubbler           ! bubble plume destrat
0      ijet               ! jet destrat
0      ifilter            ! scalar diffusion filter
1      iretention         ! track retention time
0      ICAEDYM            ! water quality module
1      icoriolis          ! turn off/on coriolis forcing
2      ntracer            ! number of tracers
0      ndrifters          !sets the number of drifters or particles which will be simulated
0      inonhydrostatic    !controls whether or not the non-hydrostatic appoximations of
Botelho et al are used are used.
!                               !
! -----!

```

```

! default boundary conditions
!
! 1 = noslip all
! 2 = freeslip all
! 3 = drag all
! 4 = neumann all
! 5 = slip sides, noslip bottom
! 6 = slip sides, drag bottom
! 7 = slip sides, neumann bottom
! 8 = header values
! 9 = turbulent benthic boundary layer
!
9      DEFAULT_BC
!-----!
! bottom drag
!
0.003  drag_btm_cd
!-----!
! default values (superseded by inputs in elcom_setup.f90)
!
10.0   WIND_SPEED_HEIGHT  ! Wind sensor height
10.0   SCALAR_HEIGHT      ! Met sensor height
!-----!
! default values (superseded by inputs in elcom_setup.f90)
!
0.0    DEFAULT_HEIGHT    ! Initial uniform water level
24.0   DEFAULT_WTR_TEMP  ! Initial uniform temperature
25.0   DEFAULT_SALINITY  ! Initial uniform salinity
0.0    DEFAULT_TRACER_1  ! Initial uniform tracer conc
0.0    DEFAULT_TRACER_2  ! Initial uniform tracer conc
0.0    DEFAULT_WIND_SPEED ! Uniform wind speed
0.0    DEFAULT_WIND_DIR   ! Uniform wind direction
0.25   DEFAULT_PAR_EXTINCTION ! PAR extinction coefficient 45% of SW
1.00   DEFAULT_NIR_EXTINCTION ! NIR extinction coefficient 41% of SW
1.00   DEFAULT_UVA_EXTINCTION ! UVA extinction coefficient 3.5% of SW

```

```

2.50    DEFAULT_UVB_EXTINCTION  ! UVB extinction coefficient 0.5% of SW
0.08    mean_albedo            !
!
!-----!
! horizontal diffusivities      !
!
0.02    DEFAULT_DIFFUSIVITY    ! Default horizontal diffusivity for all scalars
!
!-----!
'NONE'  CASE_KEYWORD
!
!-----!
! initialization options        !
!
0        irestart              ! start from restart file (yes=1/no=0)
0        user_init_u_vel        ! 1 = use stub routine in elcom_user.f90
0        user_init_v_vel
0        user_init_w_vel
0        user_init_temperature
0        user_init_salinity
0        user_init_tracer
0        user_init_height
0        user_init_extinction
0        latitude              !Simulation latitude (optional). Overrides value set in bathymetry file.
!-----!
! user options                  !
!
0        user_update_data       ! 1 = use stub routine in elcom_user.f90
0        gravity_angle          ! Use varying gravity angle
2        idatablock            ! Datablock style (use 2)
!
!-----!
! model settings and controls   !
!
1.0     model_grav_damp_x       ! damping of gravity for x baroclinic term

```

```

1.0      model_grav_damp_y      ! damping of gravity for y baroclinic term
!
! -----!
! debug output controls
!
1      debug_check      ! level of error checking
1      debug_print      ! level of debug printing
0      debug_point      ! point for debug output
1      debug_baroclinic_x    ! error trapping on = 1, off = 0
1      debug_baroclinic_y    ! error trapping on = 1, off = 0
!
! -----!
! scalar max and min
!
0      IHARDLIMIT      ! 1 = Limit scalars to min/max values
10.0   min_WTR_TEMP
40.0   max_WTR_TEMP
1.0    min_SALINITY
38.6   max_SALINITY
!
! -----!
! filter options
!
0.0    DEFAULT_FILTER
0.1    FILTER_WTR_TEMP
!
! -----!
! frequency of outputs
!
20     iter_out_monitor    ! monitoring output to screen
1440   iter_out_save      ! saving separate restart files
2880   iter_out_restart    ! overwriting restart output!
!
! -----!
! start of outputs
!
```

```
!                                     !
1      start_output_monitor  ! monitor output to screen
0      start_output_save    ! saved restart files
!                                     !
! -----!
! conjugate gradient iteration controls          !
!                                     !
1.e-16  CGM_TOL           ! CGM tolerance
60      CGM_MIN           ! minimum iterations of CGM
1000    CGM_MAX           ! maximum iterations of CGM
!                                     !
! -----!
! restart file names (do not include file extension)      !
!                                     !
save    restart_save_file
restart_final restart_out_file
```

Apêndice 4 Carta náutica do estuário dos Bons Sinais anexada à uma imagem do Google Earth



Apêndice 5 Frequência dos constituintes harmônicos

Constituinte	frequência
MSF	0.002822
2Q1	0.035706
Q1	0.037219
O1	0.038731
NO1	0.040269
K1	0.041781
J1	0.043293
OO1	0.044831
UPS1	0.046343
N2	0.078999
M2	0.080511
S2	0.083333
ETA2	0.085074
MO3	0.119242
M3	0.120767
MK3	0.122292
SK3	0.125114
MN4	0.159511
M4	0.161023
MS4	0.163845
S4	0.166667
2MK5	0.202804
2SK5	0.208447
2MN6	0.240022
M6	0.241534
2MS6	0.244356
2SM6	0.247178
3MK7	0.283315
M8	0.322046