



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Curso de Licenciatura em Oceanografia

Monografia para obtenção do grau de licenciatura em Oceanografia

**Influência das marés e correntes de marés no tempo de
renovação da água no estuário dos Bons Sinais**

Autor

António Jeremias Cumbi

Quelimane, Abril de 2019



Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras

Curso de Licenciatura em Oceanografia

Monografia para obtenção do grau de licenciatura em Oceanografia

Influência das marés e correntes de marés no tempo de renovação da água no estuário dos Bons Sinais

Autor

António Jeremias Cumbi

Supervisor

Co-Supervisor

MSc. Teófilo Mateus Pio Ferraz João

dr. Banito Bene Magestade

Quelimane, Abril de 2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, especialmente, aos meus pais: Jeremias V. Cumbi e Isabel Marrengula, por depositar confiança e sempre garantirem a minha estabilidade frente as dificuldades académica impostas; aos meus irmãos Rabeca, Vicente e Donaldo por, simplesmente, serem o que eles são para mim e, incondicionalmente, tem dado força em todo momento; e aos meus tios: Francisco e Pedro, pelo suporte e monitoria prontificada em torno do progresso académico.

Todos vós sois fonte da minha inspiração para tudo que almejo tornar-me. Portanto, a toda minha família que indirectamente tem apoiado nas decisões e proporcionando um triunfo no trilhar do meu percurso, meu muito kxanimambo (Obrigado).

AGRADECIMENTOS

1. Ao Senhor dos senhores, Deus, pela bênção em tudo que eu tenho feito, por salvaguardar minha vida e me proteger neste período recheado de muito aprendizado.
2. Ao Estado, por ter concedido uma bolsa de estudo que facultou a consumação plena da minha licenciatura.
3. A MCT, que brindou com Bolsa de Iniciação Científica, tendo ajudado na colmatação das necessidades que requeriam um fundo monetário.
4. Ao Supervisor, Teófilo Ferraz, que mostrou-me que a verdadeira ciência não resume-se somente nas auscultações mas, também, a prática é um aperitivo indispensável na percepção da Ciência.
5. Ao Co-supervisor, Banito Magestade, que dum ou de outra forma, mostrou prontificado a ajudar, contribuindo positivamente e sempre que necessário para melhor elaboração das ideias.
6. A minha metade; Célia J. G. Augusto, e aos meus cunhados Lusineide Augusto e Augusto Gil, por fazer parte do meu futuro, que considero promissor.
7. Ao Nélio das Neves, por ter ajudado, sempre que necessitasse de um computador que suporta os programas usados para colmatação do trabalho, meu muito e sincero obrigado.
8. A Ana Jordão, que mesmo não sabendo o quão ela apoiou e significou para possíveis prognóstico deste trabalho, muito obrigado pelo suporte miúda.
9. Ao meu grande “comparsa”, Chakanga, que ganhei durante a formação e dia após dia mostrou-me que a verdadeira essência da vida reside nos nossos sonhos.
10. A todos colegas: Buci, Juliasse, Sibia, (Oc.); Cadeado, Chambela, da Cândida, Ofiçane, (BM); Cabazar, Carsindasse, Muhate, (GM); Belginia, Sheide, Matusse, (QM); que de forma indirecta me apoiaram.
11. Aos colegas que ganhei recentemente no último ano da conclusão do curso: Elton, Tomas, Fanuel e Fernando.

Posso todas as coisas em Cristo que me fortalece. (Fl. 4:13)

Declaração de Honra

Declaro que esta monografia nunca foi apresentada para obtenção de qualquer grau e que ela constitui o resultado do meu labor individual. Esta monografia é apresentada em cumprimento parcial dos requisitos de obtenção do grau de Licenciatura em Oceanografia, da Universidade Eduardo Mondlane.

(António Jeremias Cumbi)

RESUMO

O conhecimento da ecologia da fauna e flora estuarina, e do transporte de sedimento, nutrientes e poluentes é adquirido quando se tem o entendimento prévio dos padrões de circulação hidrodinâmica do estuário. Esta circulação hidrodinâmica é controlada principalmente pela descarga fluvial, pelas correntes de maré, pelo cisalhamento do vento e pela geometria do estuário. Este estudo tem como objectivo Investigar/compreender a influência das marés e correntes de marés no tempo de renovação da água no estuário dos Bons Sinais, através do modelo ELCOM, simulado num período de 20 dias. Portanto, os dados, principalmente de mares foram extraídos do modelo TMD e as descargas fluviais foram adquiridas numa serie de 11 anos, usados para forçar o modelo nas fronteiras abertas.

Os resultados mostram que o tempo máximo de renovação obtido no modelo de prisma de marés foi de 5.62 dias, quanto ao factor de retorno de 0.9, mínimo na ordem de 13.49 horas com um factor de retorno de 0.1 e 0.5 de factor correspondeu ao tempo de renovação de 1.12 dias. A partir da simulação feita com modelo ELCOM obteve como resultado do tempo máximo de renovação não superior a 17.99 dias para a região da confluência, 14.72 dias na região do porto e 8.87 dias para a região da boca.

As marés contribuíram significativamente para a renovação da água, principalmente, na região da boca que mostraram sua influência directa ao longo das suas oscilações. Na confluência mostrou flutuações muito baixas quando comparadas com as da boca. Portanto a zona da confluência é mais influenciadas pelas descargas fluviais que agem como principais para exudação desta área. E, as velocidades das correntes mostraram ser fortes na região central da foz do estuário do que nas bermas e em direcção ao estuário a dentro. Os módulos das velocidades foram máximos de 0.8m/s na região da boca decrescendo quando adentra, obtendo, na confluência velocidade máxima na ordem de 0.05m/s, actuando inversamente com TR, que aumenta da boca à montante, sendo influenciadas pelo afunilamento do canal, convergência com as descargas fluviais e *stress* dos ventos.

Palavras-chaves: Marés, Modelos hidrodinâmicos, Tempo de renovação, Estuário dos Bons Sinais.

ABSTRACT

Knowledge of the ecology of estuarine fauna and flora and the transport of sediment, nutrients and pollutants is obtained when there is a previous understanding of the hydrodynamic circulation patterns of the estuary. This hydrodynamic circulation is controlled mainly by fluvial discharge, tidal currents, wind shear and estuary geometry. The objective of this study was to investigate / understand the influence of tides and tidal currents on the water renewal time in the estuary of the Bons Signals, using the ELCOM model, simulated over a period of 20 days. Therefore, mainly sea data were extracted from the TMD model and the river discharges were acquired in an 11-year series, used to force the model at open borders.

The results show that the maximum renewal time obtained in the tide prism model was 5.62 days for the return factor of 0.9, minimum on the order of 13.49 hours with a return factor of 0.1 and 0.5 factor corresponded to the time of 1.12 days renewal. From the simulation made with ELCOM model obtained as a result of the maximum renewal time not exceeding 17.99 days for the confluence region, 14.72 days in the port region and 8.87 days for the mouth region.

The tides contributed significantly to the renewal of water, mainly in the region of the mouth that showed its direct influence throughout its oscillations. At the confluence showed very low fluctuations when compared to those of the mouth. Therefore the confluence zone is more influenced by the fluvial discharges that act as main for exudation of this area. And, the velocities of the currents showed to be strong in the central region of the mouth of the estuary than in the berms and towards the estuary in the inside. The velocity modules were maximum of 0.8m / s in the mouth region, decreasing when it entered, obtaining at the confluence maximum velocity in the order of 0.05m / s, acting inversely with TR, which increased from the upstream mouth, being influenced by the bottleneck of the channel, convergence with river discharges and wind stress.

Key words: Tides, Hydrodynamic models, Retention time, BonsSinais Estuary.

Lista de Figuras

Figura 1. Localização geográfica do Estuário dos Bons Sinais.	9
Figura2. Fluxograma dos módulos do ELCOM. (Fonte: Hodges, 2003)	11
Figura3. Batimetria do Estuário dos Bons sinais digitalizados no Mike Zero com barra de profundidades representativas	12
Figura5.Médias mensais da intensidade dos ventos referentes ao ano de 2012	14
Figura6. Mares simuladas pelo ELCOM e as Observadas no campo na região da boca do Estuário dos Bons Sinais, para Agosto de 2012.	18
Figura7.Temperaturas simuladas pelo ELCOM e observadas no campo na região da boca do Estuário dos Bons Sinais, referente a Agosto de 2012	19
Figura8. Distribuição dos tempos de renovação em três pontos (boca, porto e confluência) do E. B. Sinais.	20
Figura9. Distribuição dos parâmetros (tempo de renovação, salinidade e temperatura) médios de acordo com a sua posição no Estuário dos Bons Sinais.	21
Figura10. Distribuição dos tempos de renovação superficial do estuário, no último dia da simulação	22
Figura11. Influência da maré em relação ao tempo de renovação na região da boca do estuário dos Bons Sinais	23
Figura 12. Comportamento do TR em função das velocidades (u e v) no período de simulação compreendido entre 1 a 20 de Agosto de 2012.	24
Figura 13. Comportamento das marés em função do campo de velocidades (u e v) durante o período de simulação (01-20 de Agosto de 2012).	24
Figura14. Distribuição superficial da intensidade das correntes no último dia da simulação.	25
Figura15. Ilustração do comportamento das velocidades (u e v) no dia 20 de Agosto de 2012.	26
Figura16. Comportamento da velocidade em torno do estuário na boca, porto e confluência	27

Índice

CAPÍTULO I: Contextualização	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Justificativa.....	2
1.3. Relevância	4
1.4. Objectivos.....	4
1.4.1. Geral.....	4
1.4.2. Específico.....	4
2.2. Modelagem hidrodinâmica.....	6
2.3. Marés: Comportamento das marés em sistemas estuarinos	7
2.4. Medição <i>inSitu</i> de Correntes	8
2.5. Tempo de residência (ou renovação)	8
CAPÍTULO III:.....	9
3. METODOLOGIA	9
3.1. Caracterização da área de estudo.....	9
3.2. Modelo ELCOM.....	10
3.3. Produção da batimetria.....	11
3.4. Medição e análise de marés.....	12
3.5. Obtenção de dados: descargas dos rios e ventos	13
3.6. Determinação do Tempo de renovação da água.....	14
□ Modelo de prisma de marés	14
□ Modelo ELCOM	15
3.7. Simulação a partir do modelo ELCOM	17
3.8. Validação do ELCOM	17
CAPITULO IV:	18
4. RESULTADOS.....	18
Antonio J. Cumbi__ {2019}	8

4.1. Validação do modelo (Marés e Temperatura).....	18
4.2. Tempo de residência da água.	20
4.2.1. Modelo de Prisma de Marés	20
4.2.2. Modelo ELCOM	21
CAPITULO V:.....	28
5. DISCUSSÃO	28
CAPÍTULO VI:	31
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	31
CAPITULO VII.	33
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
Anexo I: Finalidade da Modelagem.....	36
Anexo II. Descargas fluviais (1967-1981)	37

CAPÍTULO I: Contextualização

1.1. Introdução

As zonas costeiras são regiões sensíveis a mudanças morfológicas e muito vulneráveis a processos costeiros naturais ou antropogénicos. A pressão exercida sobre os recursos costeiros, como resultado da actividade humana, tem vindo a acelerar a degradação da qualidade destas áreas. Estas zonas são importantes no transporte de substâncias entre a terra e o oceano, actuando como um sistema de interface entre os dois meios. São economicamente importantes para os países adjacentes, assim como, o estudo destas zonas torna-se importante, não só, para a comunidade científica e para as populações que delas depende. No entanto, a maioria das espécies iniciam a vida em zonas costeiras, como nos estuários, baías, etc. locais conhecidos e que possuem proteínas necessário para o seu crescimento.

Estuários são corpos de água costeiros restritos com uma livre conexão com o mar aberto, dentro dos quais ocorre a diluição significativa da água do mar pela água doce proveniente da drenagem continental (Cameron e Pritchard, 1963). Considerados altamente produtivos, são os únicos sistemas aquáticos onde ocorre a interacção dinâmica entre as águas doces, marinhas, sistema terrestre e atmosfera (Day *et. al.*, 1989).

Portanto, estuários localizados em zonas de micro marés, com um fornecimento constante de água doce, tendem a apresentar-se altamente estratificados. Esta situação implica no escoamento da água fluvial, menos densas, por sobre a água marinha mais densa, formando uma feição denominada de cunha salina. Nestes ambientes, o principal processo de transporte deve-se a advecção fluvial, com os efeitos da maré incidindo principalmente na mistura vertical.

Os estudos já realizados por António, (2012), particularmente, no estuário dos Bons sinais, identificam uma forte influência hidrodinâmica nos aspectos estudados, apontando assim, para a necessidade do conhecimento da circulação hidrodinâmica da área, bem como das forças hidrodinâmicas (ondas, correntes, marés e ventos), proporcionando um melhor controlo sistematizado da circulação hidrodinâmica em torno do estuário.

A modelagem computacional é uma prática bem-sucedida em estuários no âmbito internacional, carecendo nacionalmente do efectivo uso do recurso para a determinação de padrão de circulação hidrodinâmica. Sua importância, reside na possibilidade desses simularem com bastante realismo o

padrão de circulação hidrodinâmica em corpos de água e quando acopladas aos modelos de transporte de contaminantes, analisarem os impactos causados por lançamentos de efluentes na qualidade das águas de uma determinada região.

O tempo de renovação, definido como o tempo necessário para que uma partícula entre e saia de um volume de controlo, é um parâmetro de grande importância para avaliar a capacidade de renovação de ambientes costeiros. Na maior parte dos casos, este tempo é estimado basicamente pela entrada da componente fluvial, enquanto a salinidade actua como indicador de massa de água (Dyer, 1973).

A motivação do desenvolvimento deste trabalho reside na curiosidade da percepção íntegra da influência das marés e correntes de marés no tempo de renovação da água no estuário dos Bons Sinais, contribuindo no progresso das revelações desse sistema estuarino.

1.2. Justificativa

Em Moçambique vem assistindo-se cenários relacionados que conseqüentemente reduzem o tempo de vida de fito e zooplâncton, que pela comunidade é tido como fonte principal de proteína para os peixes que servem de alimento, principalmente, para as situadas nas zonas costeiras.

A modelagem de qualidade ou circulação da água é uma técnica que tem mostrado excelentes resultados na elaboração de prognósticos da qualidade da água. Em função do uso do solo, das condições hidrometeorológicas e da gestão da infra-estrutura existente, a quantidade e o tipo de poluentes afluentes aos corpos receptores têm uma grande variação, o que, por sua vez, traz implicações à qualidade da água e conseqüentemente à saúde pública e ao meio ambiente (Jesus, 2006).

Assim como foi proposto pelo governo que “o incremento da produção pesqueira é uma das apostas para a melhoria dos níveis de segurança alimentar, nutricional e geração de renda”. Para efeitos de colmatação, políticas como: Formação e Capacitação de pescadores artesanais e piscicultores em técnicas e arte de pesca para uso em mar aberto; Construção do Centro de Pesquisa em Aquacultura; Lançamento do Projecto-Escola de Desenvolvimento Sustentável de Aquacultura de Rendimento em Aqua-parque, em Regime de Parceria Público-Privado-Comunidade; Intensificação da fiscalização marítima e pesqueira para prevenir e punir a pesca ilegal, o uso de artes nocivas à pesca, a violação dos períodos de defeso e Promoção de acções contra a pesca em zonas protegidas. Estes, surgem

com vista a melhoria da produção pesqueira que tenderá a alcançar rendimentos com sustentabilidade económica e financeiramente aceitável no sector da pesca. Visto que anteriormente, este, aprovou no mesmo sector, Pescas, políticas que estabelecem como objectivo de desenvolvimento no domínio das capturas e da aquacultura, o aumento da produção para exportação e para o mercado interno e a melhoria das condições de vida dos pescadores, em especial das comunidades pesqueiras rurais, numa perspectiva de desenvolvimento sustentável da economia e das comunidades.

Sentiu-se a necessidade e motivação plausíveis de incorporar um estudo relacionado com a hidrodinâmica ou circulação das massas de água no Estuário dos Bons sinais, utilizando o tempo de renovação da água simulado numericamente como um indicador da circulação e, que a prior, a importância dos modelos hidrodinâmicos centra-se na possibilidade de simular, com bastante realismo, o padrão de circulação hidrodinâmica em corpos de água.

Simbine (2016),apresentou um estudo do comportamento de marés e correntes de maré na Baía de Nacala, aplicando numericamente o modelo ELCOM. A configuração do modelo foi baseada em dados constantes de temperatura de 26°C, salinidade de 34 PSU, utilizou as marés extraídas no modelo global TMD num período de um mês e mostrou que, as velocidades das correntes dependem das marés, e correntes mais fortes ocorrem na entrada da Baía de Nacala.

Para uma adequada gestão ambiental e correta tomada de decisões, em sistemas estuarinos, é extremamente importante o entendimento de como ocorrem as movimentações e trocas de massas de água. A melhor forma para isto é um estudo da circulação hidrodinâmica destes ambientes.

Portanto, neste trabalho aplicou-se o modelo ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model), para a análise em duas dimensões, usando marés realísticas medidas na boca do estuário, dados históricos de ventos e de descargas dos rios para estudar a circulação hidrodinâmica no Estuário dos Bons sinais, monitorando o tempo de renovação da água simulado numericamente como um indicador da circulação e reduzir as incertezas dos estudos realizados anteriormente.

1.3. Relevância

O trabalho é pertinente nas áreas prioritárias das ciências marinhas e pescas. Em muitas zonas costeiras mundiais a entrada dos sedimentos terrígenos trazidos pelos rios tem um impacto enorme sobre os ecossistemas costeiros e marinhos bem como na morfodinâmica.

A necessidade de monitoramentos oceanográficos de longo prazo não advém somente da curiosidade científica de compreender os processos da circulação no domínio do estuário. Questões importantes associadas, por exemplo, ao declínio de estoques pesqueiros e à ocorrência de *blooms* de algas, requerem um sólido conhecimento da circulação para o estabelecimento de relações e compreensão do problema (Elliot, 1976). Contudo, existe ainda muito a ser feito para que os mecanismos primários da circulação sejam adequadamente compreendidos.

A investigação da influência das marés e correntes de marés no estuário é de extrema importância, pois ajuda na compreensão dos factores que controlam a disponibilidade do pescado neste ecossistema bem como na gestão da qualidade da água.

1.4. Objectivos

1.4.1. Geral

Investigar a influência das marés e correntes de marés no tempo de renovação da água no estuário dos Bons Sinais.

1.4.2. Específico

- ✓ Determinar o tempo de renovação da água utilizando Modelo de Prisma de marés e o Modelo ELCOM;
- ✓ Comparar em perspectiva lagrangeana o efeito das marés e correntes de marés no tempo de renovação da água.

CAPITULO II:

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1. Circulação Estuarina

É um processo físico que afecta e controla muitos processos ecológicos, dependendo de vários parâmetros entre eles, o cisalhamento eólico, correntes de marés, da descarga dos rios e da circulação das águas oceânicas, (Pickard e Emery, 1990). O factor principal que influencia a troca da água em estuários profundos é a variação sazonal na estrutura de densidade, na qual a salinidade e densidade da água da bacia tende a diminuir lentamente à montante.

Em estuários profundos, a circulação estuarina, é desenvolvida suficientemente para renovação da água profunda de forma que a estagnação não aconteça (Pickard, *et.al*, 2007).

Portanto, a circulação é devida ao *stress* do vento sobre as camadas superficiais das águas. A atracção gravitacional pelo sol, pela lua e por outros astros e é responsável pelas variações regulares do nível das águas (Dyer *et. al*, 1989). A geometria e a topografia, também, são elementos extremamente importantes na determinação da circulação no controlo dos processos ecológicos ao longo do estuário (Vassele, 2005).

Segundo Vassele, (2005), nos estuários existem três formas principais de circulação, que são: i) Circulação gravitacional; ii) Circulação por marés e iii) Circulação devida ao vento.

Com base no balanço de água, os estuários podem ser classificados em três tipos: clássico (positivo), inverso (negativo) e de baixo influxo. Os estuários clássicos (positivos) são basicamente os que a descarga de água doce excede a perda por evaporação e estabelece o gradiente de densidade longitudinal. Este gradiente é conduzido por fluxo bidireccional (circulação gravitacional) entre o fluxo de água doce pela superfície e água salgada e mais densa próximo ao fundo. Os estuários inversos (negativos) são tipicamente encontrados em regiões áridas e semi-áridas onde ocorre maior perda de água doce por evaporação em comparação com o incremento de água doce por precipitação. Estas regiões podem ter descarga fluvial ou não, dependendo de construção de barragens. A hidrodinâmica de estuários inversos é mais lenta, o que torna estes sistemas mais propensos a problemas de qualidade de água em relação aos estuários positivos (Valle-levinson, 2010).

A topografia do fundo de um estuário é bastante variável dependendo da intensidade das correntes de maré ao longo do estuário nas marés enchentes e vazantes e a circulação devido a este movimento cíclico de maré, que é notório nos estuários com baixas profundidades e longa extensão da maré

Durante um ciclo de maré (enchente e vazante), geralmente, observa-se uma forte relação entre as velocidades das correntes, o transporte e as concentrações de partículas em suspensão. Variações destes padrões podem ser observadas em ambientes, onde se verifica uma alta deposição de sedimentos, em função das partículas e estabilização do substrato pela vegetação (Ferraz, 2009).

A capacidade de renovação das águas em um determinado corpo aquático depende directamente do campo de correntes, que resulta das oscilações das forçantes do fluxo (marés e ventos) e da morfologia do corpo de água (Xavier, 2002).

2.2. Modelagem hidrodinâmica

Segundo Jesus, (2006) a modelagem de qualidade ou circulação da água é uma técnica que tem mostrado excelentes resultados na elaboração de prognósticos da qualidade da água. Em função do uso do solo, das condições hidrometeorológicas e da gestão da infra-estrutura existente, a quantidade e o tipo de poluentes afluentes aos corpos receptores têm uma grande variação, por sua vez, traz implicações à qualidade da água e conseqüentemente à saúde pública e ao meio ambiente.

Do ponto de vista hidrodinâmico, a mais difundida classificação dos estuários foi proposta por Hansen e Rattray, (1966). Essa classificação é centrada em dois parâmetros hidrodinâmicos adimensionais: a) circulação e b) estratificação.

O parâmetro circulação é determinado pela razão us/uf , onde us é valor da corrente residual na superfície. A velocidade do fluxo médio próximo a superfície é tipicamente relacionada com a descarga fluvial, na ordem de 0.1 m/s. A profundidade média do fluxo uf é comumente muito pequena, tendendo a zero em estuários de intensa troca de água devido os fluxos de entrada e saída serem equivalentes. Esse parâmetro us /uf é considerado uma medida da circulação gravitacional, que varia entre 1,5 para estuários fracamente estratificados até valores grandes como 10^2 - 10^3 para estuários altamente estratificados.

A capacidade de compreender e de prever a dinâmica dos processos oceanográficos, da circulação de diversos elementos naturais e antropogénicos numa região é essencial não só a uma gestão

otimizada desse recurso, como ao desenvolvimento de estratégias mitigadoras de eventuais catástrofes naturais, tais como os tsunamis, os maremotos, os tufões e a erosão (Simbine, 2016).

Mesmo possuindo fundamental importância para qualquer estudo relativo a corpos de água naturais, dados ambientais muitas vezes são escassos, havendo somente séries temporais de valores medidos em estações pontuais ao longo da área de interesse. Portanto, é imprescindível, em estudos de grande porte, dispor de ferramentas, tal como a modelo computacional, que permita a interpolação e extrapolação desses dados no espaço e no tempo (Machado e Silva, 2010).

2.3. Marés: Comportamento das marés em sistemas estuarinos

As contínuas alterações na estrutura da onda de maré conforme ela se propaga em direção ao estuário e para dentro do mesmo, faz com que a maré tenha influência dominante na dinâmica estuarina (Parker, 1991). Essas alterações são geradas pela ocorrência de processos de águas rasas não - lineares ocasionados pela interação com a geometria do estuário e pela fricção do fundo e dos contornos terrestres. Estes processos resultam em modificações na amplitude da onda de maré e na transferência de energia a partir das constituintes harmônicas fundamentais que formam a maré superficial astronômica para frequências harmônicas mais altas e mais baixas, resultando na produção de harmônicos mais altos (Parker, 1991; Godin, 1991; Friedrichs e Madsen, 1992).

Além da contribuição na produção de harmônicos mais altos, a morfologia do estuário e a fricção também resultam em variações importantes na amplitude da maré e na velocidade das correntes de maré (Dyer, 1997).

A magnitude relativa destes dois elementos resulta na formação de três condições diferentes quanto às características da amplitude da maré e da velocidade das correntes de maré ao longo do estuário (Nichols e Biggs, 1985):

- Hipersíncronos – Ocorre quando o efeito da convergência é maior que o da fricção, resultando numa amplificação da amplitude e das correntes de maré em direção ao interior do estuário.
- Síncronos – Neste caso, a fricção e a convergência têm efeitos iguais e opostos na maré, de forma que a amplitude e as correntes de maré são constantes em direção ao interior do estuário.

- Hipossíncronos - Ocorre quando o efeito da convergência é menor que o da fricção, resultando numa redução da amplitude e das correntes de maré em direcção ao interior do estuário.

2.4. Medição *in_Situ* de Correntes

Existem dois métodos distintos para medir correntes de marés: os métodos Lagrangeanos como flutuadores, corantes, e drogues de correntes e métodos Eulerianos como a utilização de correntómetros em pontos fixos. Ambos os tipos têm vantagens e desvantagens dependendo da aplicação. Os aparelhos lagrangeanos necessitam do seguimento das concentrações ou das variações da posição dos drogues ao longo do tempo; estes são úteis para a modelação e previsão da trajectória para aplicação em derrames de materiais perigosos e óleos ou para estudos de padrões de circulação.

O modelo Lagrangeano é uma ferramenta eficaz para estudos de processos de dispersão em ambientes costeiros, estuários e lagoas. Este método permite analisar a dispersão de massas de água, representada por partículas passivas e estimativas de tempos de residência a um baixo custo computacional em comparação com modelos Eulerianos (Dias, *et. al*, 2001).

2.5. Tempo de residência (ou renovação)

O transporte de uma dada substância em um corpo de água é dominado pela advecção, sugerindo assim uma enorme dependência entre a simulação hidrodinâmica e o processo de transporte (Oliveira *et al.*, 2000). Alterações no padrão de circulação hidrodinâmica em corpos de água afectam substancialmente o transporte de sedimentos e contaminantes, alterando assim a qualidade ambiental do mesmo.

Tempo de renovação é o tempo necessário para que se possa substituir a água doce existente numa secção do estuário a uma taxa igual à descarga dos rios (Dyer, 1997). Neste contexto, o transporte das massas de água nessas secções depende, evidentemente, da circulação hidrodinâmica que se faz sentir que também depende das suas forçantes (mares, ventos, descargas de rios, etc.).

CAPÍTULO III:

3. METODOLOGIA

3.1. Caracterização da área de estudo

A área em estudo (Figura 1) compreende o estuário dos Bons Sinais localizado na latitude: 18°22.2'S _ 17° 6.0' S e longitudes: 36° 46.8' E _ 37° 3.0' E.

O clima da região de Quelimane é marcado por uma estação fria e seca (Abril a Outubro) e uma estação quente e húmida (Novembro a Março). A zona é fortemente influenciada pelo sistema de monções da África Oriental, as marés que ocorrem são semidiurnas, a oeste localiza-se a cidade de Quelimane e a este o distrito de Inhassunge. As temperaturas diurnas são em geral superiores a 30°C na estação quente mas as vezes podem baixar até 20°C na estação fria (INAHINA, 2000).

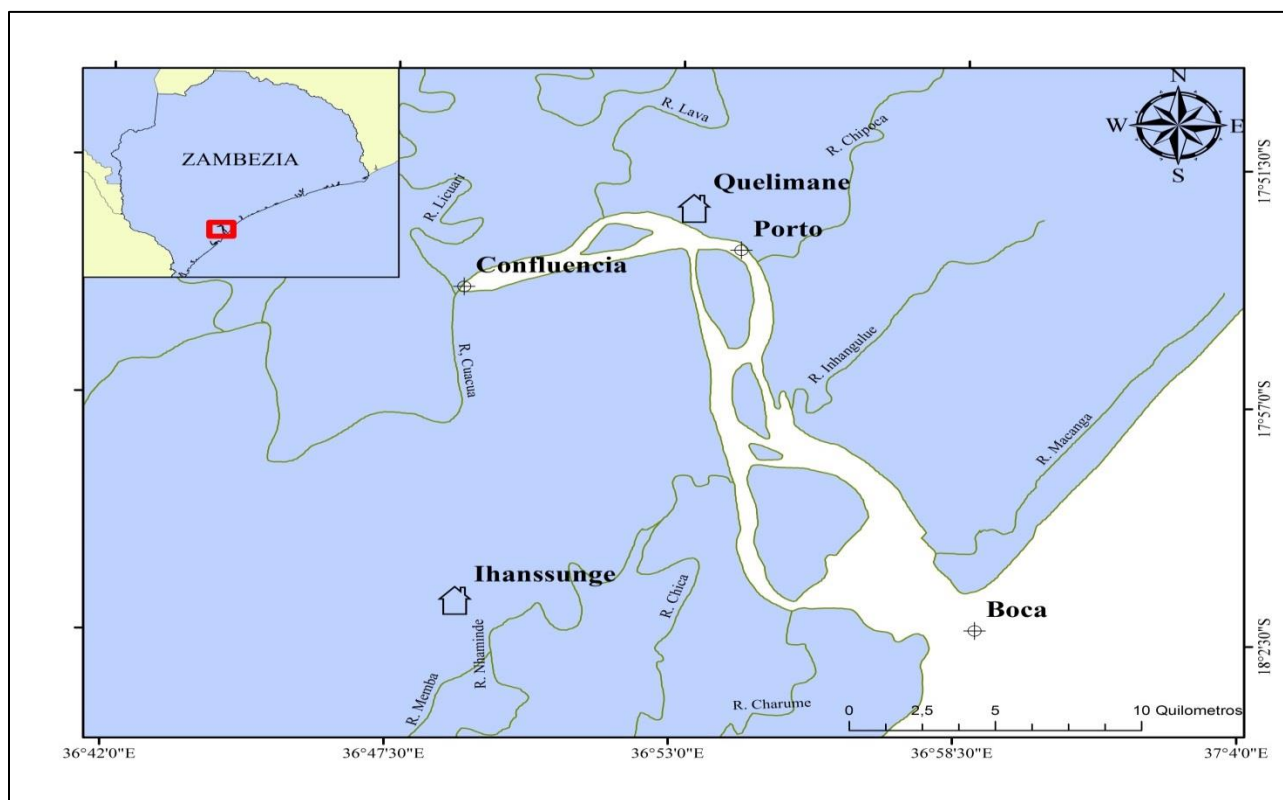


Figura 1. Localização geográfica do Estuário dos Bons Sinais.

Este estuário possui dimensões com um comprimento de 27 200 m, largura média de 1035.20 m, profundidade média de 8.23 m, uma área de cerca de 29122100.0 m² e está sujeito a um grande

stress ambiental. A máxima profundidade que o estuário apresenta é cerca de 14 m. Assume-se que a largura e a área de secção transversal decrescem exponencialmente desde a boca até a montante.

➤ **Caracterização da circulação**

A circulação dentro do estuário é controlada principalmente pela descarga fluvial, correntes de marés, *stress* de ventos e a geometria do local, a amplitude de maré varia de 0.2 e 1.8 m e são distorcidas, com uma distorção que aumenta até a região da confluência, e que diminui a predominância das marés. Os ventos são predominantemente de SE e variam de 0.1 a 1.8m/s, a salinidade e a temperatura da água de 30 e 25°C, respectivamente.

3.2. Modelo ELCOM

Estuary, Lake and Coastal Ocean Model ou simplesmente ELCOM, desenvolvido pelo Center for Water Research (CWR) da University of Western Austrália, é um código numérico tridimensional, que simula o comportamento temporal de corpos de água, prevendo a distribuição de velocidades, temperaturas e salinidades em lagos, estuários e reservatórios estratificados, sujeitos a factores ambientais externos.

ELCOM é uma ferramenta de modelagem numérica que se aplica a hidrodinâmica e modelos termodinâmicos para simular o comportamento espaço temporal dos corpos de água estratificadas com forçantes ambientais (Dallimore, 2007).

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. Funciona com dados processados no Fortran 90, onde são introduzidos segundo a (Figura 2), ilustrando as etapas organizacionais dos dados de entrada no modelo ELCOM, onde o pré-processamento inicia com a preparação da batimetria representada por ficheiros em formato *.dat, condições de fronteira, e locais necessários para actualizar as condições de fronteira se necessário. Os dados meteorológicos são igualmente introduzidos ao modelo em ficheiros específicos e comandos estruturados para o seu uso.

Os dados definidos no ELCOM são processados para a produção de ficheiros NetCDF em três tipos: 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, Ocean Data view, no molde CWR Modeller, MatLab, entre outros.

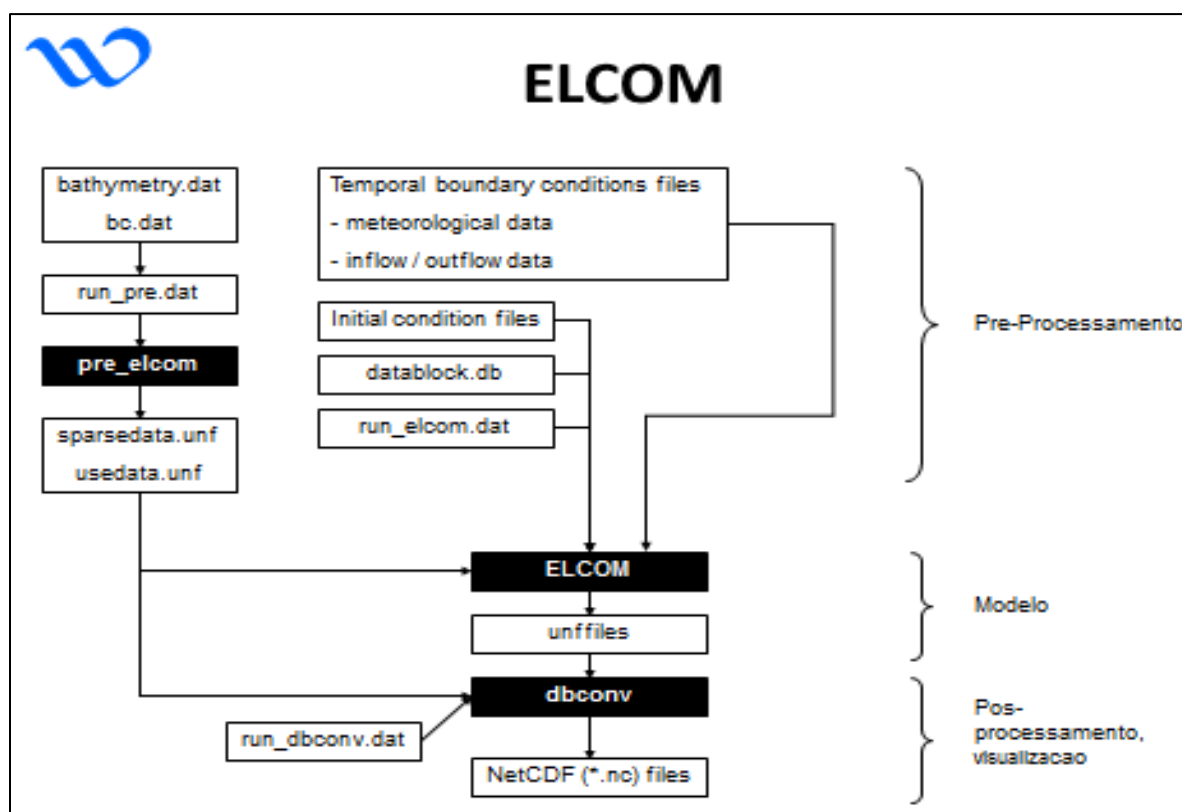


Figura2. Fluxograma dos módulos do ELCOM. (Fonte: Hodges, 2003)

3.3. Produção da batimetria

A produção da batimetria (Figura 3) consistiu na definição da área em projecção UTM (executado no MIKEZero), criação da batimetria numérica no formato XYZ a partir das profundidades retiradas na carta náutica do INAHINA (Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação), na escala de 1:5000; interpolação e definição das condições de contorno (executado no Mike21, e gravado no formato *.dfs2). A malha no modelo foi definida com 400 células horizontais e na vertical, com um total de 160 000 pontos com um espaçamento de 100m² por cada célula. O resultado final destes procedimentos foi a interpolação das cotas batimétricas e produção da batimetria final no formato

*.dat importado para o ELCOM. Durante a simulação um ficheiro era criado por dia, gravado num espaçamento contínuo de 60 s para um total de 28800 s que corresponde a 20 dias de simulação. Por fim foram chamados os ficheiros no formato NetCDF, através do programa MatLab.

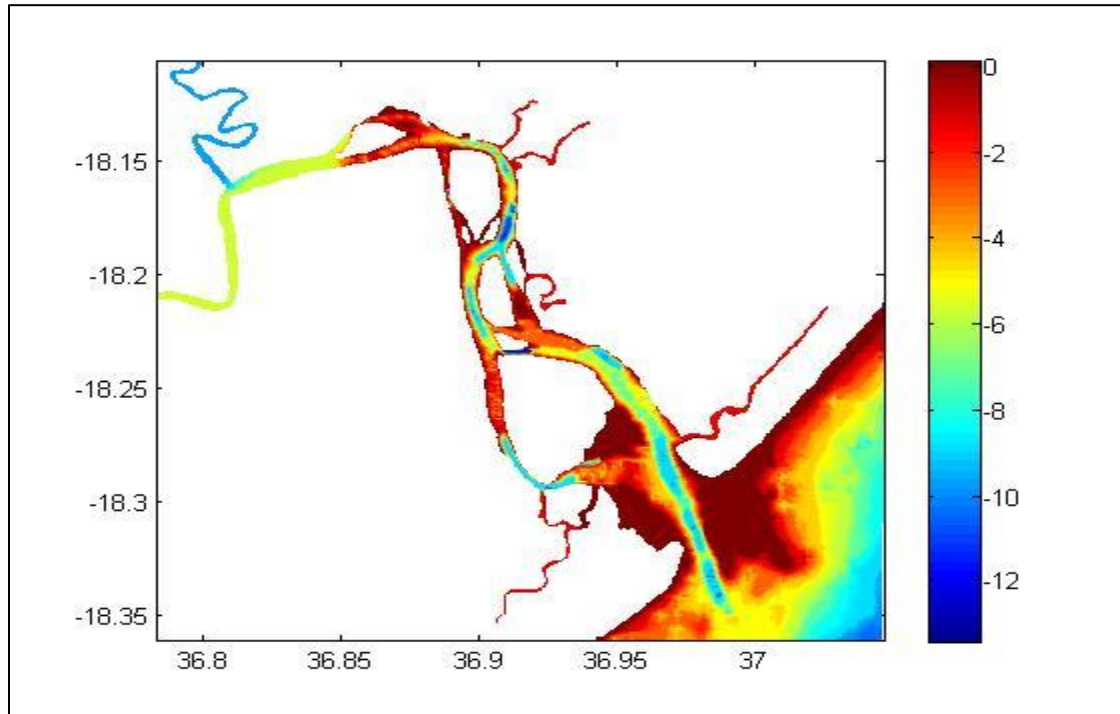


Figura3. Batimetria do Estuário dos Bons sinais digitalizados no Mike Zero com barra de profundidades representativas

3.4. Medição e análise de marés

As marés são ondas longas causadas pelos efeitos de atracção das forças de gravidade entre a Terra, Lua e o Sol, com uma duração de 12 a 24 horas por dia. Essas oscilações rítmicas que ocorrem diariamente podem ser diurnas (uma enchente e uma vazante), semi-diurnas (duas vazantes e duas enchentes) ou mistas com a ocorrência das duas marés. Os dados foram medidos na boca do estuário, através do marégrafo RBR (Richard Brancker Research Ltd) Medidor de Pressão no fundo.

Com auxílio do programa TMD (Tidal Model Driver) extraiu-se as marés no mesmo ponto de medição. TMD é um pacote do MatLab para acessar os componentes harmónicos da maré. Ele é específico para prever as marés e correntes de marés através de constituintes lunares e solares, que foram extraídas para a obtenção de uma onda de marés e sua respectiva análise harmónica clássica

com correcções nodais e inferências das constituintes. Uma das limitações associadas a este modelo prende-se no facto de possuir uma distorção na sua resolução por se tratar de um modelo global.

A modelagem de dinâmica estuarina foi feita através dos dados do modelo TMD que foram utilizados na inicialização do modelo ELCOM para a simulação e com auxílio dos dados obtidos no campo, *in Situ*, efectuou-se a validação das marés, num período de 20 dias correspondentes ao período de simulação.

3.5. Obtenção de dados: descargas dos rios e ventos

Com base na tabela de descargas mensais de Alex Roest de 1967 a 1984 do Rio Licuar (Anexo II), assumiu-se as descargas médias mensais de todos os anos com dados completos para se estudar a circulação no estuário e idealizou-se os dados do Rio Cua-cua. A Figura 4, ilustra o comportamento dos caudais médios mensais do rio Licuar para o período compreendido. Observa-se que o caudal médio mensal varia de um mínimo e máximo com cerca de 0.11 a 42.82 m³/s correspondentes aos meses de Outubro a Fevereiro, respectivamente. Essa variação do caudal observada explica-se pela existência da variabilidade das precipitações registadas anualmente.

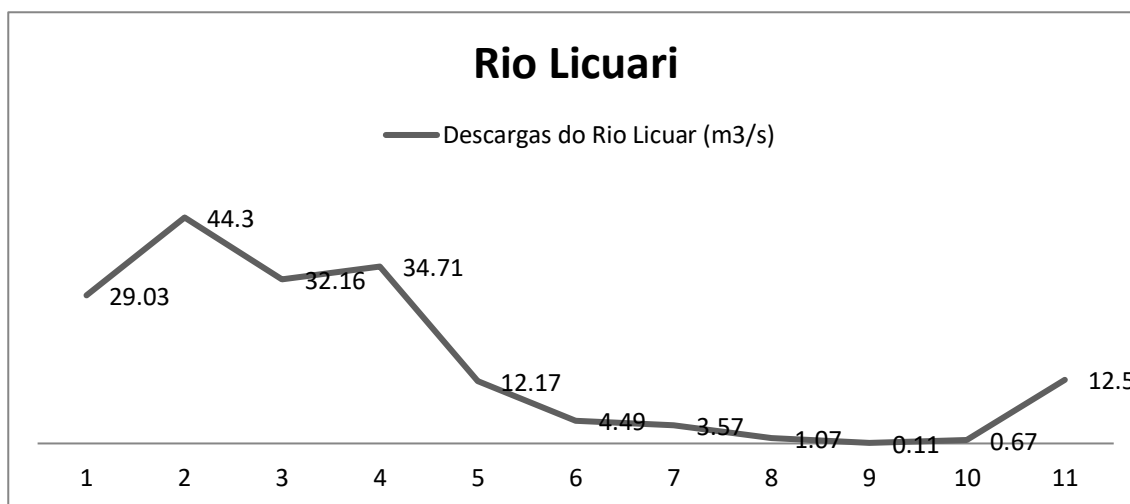


Figura4. Caudais médios mensais do rio Licuar entre 1967-1981

E, os dados meteorológicos (Figura 5) dos ventos foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia (INAM). Conjuntamente, foram lançados durante a configuração do modelo antes da simulação para posterior análise da sua influência.

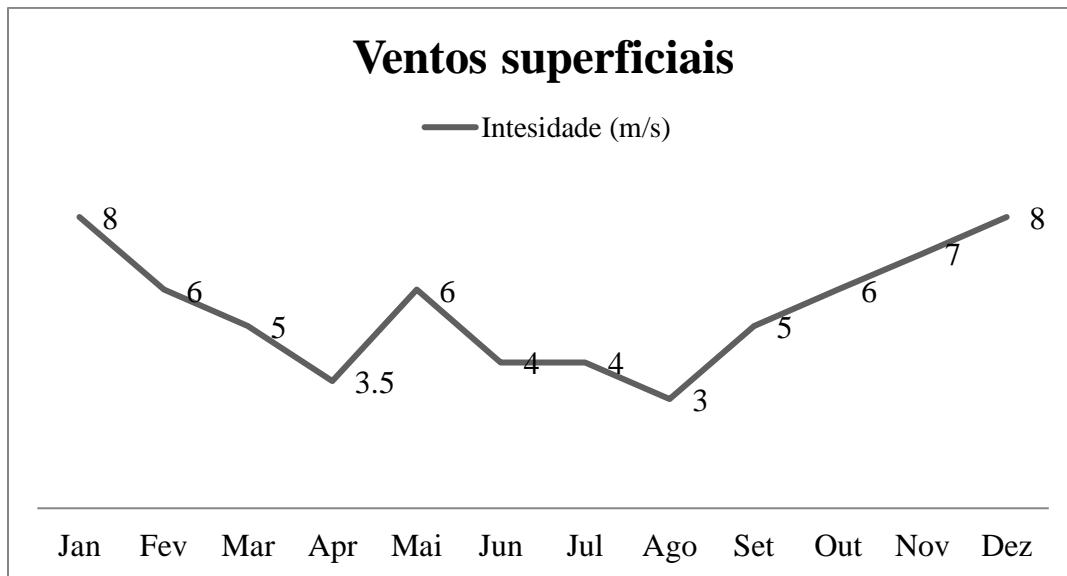


Figura4. Médias mensais da intensidade dos ventos referentes ao ano de 2012

3.6. Determinação do Tempo de renovação da água

➤ Modelo de prisma de marés

Gómez-Gesteira, (2003) caracteriza o tempo de renovação como uma importante variável física em estuários e uma ferramenta útil para o estudo da qualidade de suas águas. Esse parâmetro é conveniente para representar a escala de tempo de processos físicos, e frequentemente é usado para comparação com a escala de tempo de processos biogeoquímicos.

O cálculo do tempo de residência tem sido predominantemente baseado em estudos empíricos, utilizando marcadores (por exemplo, salinidade ou corante), modelos de caixa simples ou modelos de prisma de maré, e modelos hidrodinâmicos (Sheldon e Alber, 2002; Miller e Mcpherson, 1991; Hagyet *al*, 2000; Signell e Butman, 1992; Zaleski e Schettini, 2003; Aikman e Lanerolle, 2004).

Para os bancos costeiros mais complexos, a influência da maré precisa ser considerada. Portanto, o método do prisma de maré é frequentemente usado. Este é um método clássico para determinação do tempo de renovação no estuário dado por Dyer, (1973), com a seguinte designação:

$$TR = \frac{V * T}{(1 - b) * P} \quad (1)$$

Onde, T é o período da maré ($12.42\text{hr} = 44712\text{s}$), P é o prisma de maré, V é o volume do corpo de água (ao nível médio do mar). O prisma de maré equivale ao volume de água que pode entrar ou sair do corpo de água durante um período de maré enchente ou vazante, respectivamente.

O factor de retorno de fluxo (“ b ” variando de $[0;1[$) relacionado à fracção de água que, após ser expelida pelas correntes de vazante, pode retornar ao corpo de água com a maré de enchente. A variável b é um valor empírico resultante do facto de que não é possível calcular esse volume de retorno baseado apenas na geometria do corpo de água.

As marés são tidas como de grande importância para a determinação do volume de prisma (P), porque surge da diferença do volume da água enchente (V_e) e da vazante (V_v). E as descargas fluviais contribuem, significativamente para a alteração do tempo e taxa de renovação, mas este modelo não considera-as. Daí que, várias limitações devem ser consideradas nesse método, como: i) o sistema precisa ser bem misturado, ii) deve haver pouco aporte de água doce comparado com o fluxo de maré, e, iii) o corpo de água externo (receptor) deve ser capaz de assimilar toda água ejectada, de forma que a água que entra seja mais limpa que a água que sai (Sanford *et al.*, 1992).

Este modelo tende a subestimar o tempo de renovação das águas, justamente por considerar o sistema bem misturado e não levar em conta as armadilhas de fluxo resultantes de morfologias irregulares (Dyer, 1973; Sanford *et al.*, 1992).

Uma forma prática de se calcular o prisma de maré é através da integração das descargas monitoradas na embocadura do corpo de água em um período de maré enchente ou vazante. Outra maneira de se calcular o prisma é multiplicando o nível de água médio pela área do espelho de água.

O volume total, enchente e vazante, do estuário para o mês de agosto foi de $3.02 \cdot 10^8 \text{ m}^3$, $4.42 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ e $1.64 \cdot 10^8 \text{ m}^3$, respectivamente, quando considerou a maré semi-diurna como sendo a que mais contribuiu fortemente no estuário durante o período em análise, com 12.42 horas, (Ferraz, 2009). Desta forma os mesmos dados usou-se nesse trabalho para obtenção de alguns resultados apresentados.

➤ **Modelo ELCOM**

O modelo ELCOM resolve equações diferenciais de Navier-Stocks que representam escoamentos hidrodinâmicos de fluxo de água nas três dimensões, nomeadamente:

$$a_x = \frac{F}{m} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\alpha \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega u \sin \phi - 2\Omega w \cos \phi + \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (2)$$

$$a_y = \frac{F}{m} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\alpha \frac{\partial p}{\partial x} - 2\Omega u \sin \phi + \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (3)$$

$$a_z = \frac{F}{m} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\alpha \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega u \sin \phi + \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{\rho_0}$$

Onde:

a_x é aceleração em x, a_y é aceleração em y, a_z é aceleração em z, são as forças devido ao vento, com $n = x, y$ e z . P é a força de pressão, ρ é densidade da água, ϕ é a latitude local.

Considerando-se que aceleração local não varia com o tempo, a velocidade vertical ao longo do canal não varia significativamente e, pelo princípio de continuidade. Porém, no modelo não foram considerados os termos de precipitação e evaporação, enquanto os afluentes e efluentes foram tidos como contínuos.

Considerando a aceleração da água constante ou seja um movimento inercial, a equação de Continuidade integrada na vertical escreve-se:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz = 0 \quad (5)$$

Onde: η a elevação do nível do mar e $-h$ representa o fundo do canal. $H = h + \eta$

Para cada intervalo de tempo corrido no ELCOM, são produzidas duas componentes de velocidade médias, $U(x, y, t)$ e $V(x, y, t)$, que são definidas em:

$$U(x, y, t) = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u(x, y, t) dz \quad \& \quad V(x, y, t) = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} v(x, y, t) dz \quad (6)$$

3.7. Simulação a partir do modelo ELCOM

Para dar início a simulação foram adoptados valores para quando o tempo foi nulo ($t=0$), que considerou-se uniformes em todo o estuário. Estes dados foram colocados segundo a realidade do local, como é o caso de valores médios de salinidade ($S=25\%$), temperatura da água ($T=29\text{ }^{\circ}\text{C}$), velocidade dos ventos ($\tau=0$), etc. e nas fronteiras do modelo usou-se a difusidade horizontal ($dif=0.001$) e arrasto do fundo ($botton_drag=0.005$), o que proporcionou os resultados a seguir apresentados.

A forçante maré foi imposta no contorno aberto oceânico, as descargas fluviais no lado oposto (confluência), com o modelo configurado para vinte dias de simulação. Após a simulação, foram analisados os comportamentos da onda de maré, das correntes de marés, da temperatura e do tempo de renovação.

3.8. Validação do ELCOM

Neste trabalho foi feita a validação do modelo ELCOM para a área de estudo, sendo avaliado o comportamento da maré e da temperatura, em uma porção do canal estuarina, concretamente na região da boca, do sistema estuarino dos Bons Sinais.

CAPITULO IV:

4. RESULTADOS

4.1. Validação do modelo (Marés e Temperatura)

✓ Marés

As marés simuladas e observadas, depois de subtraído nível médio do mar ou zero hidrográficos (2.6 metros), estão apresentados na Figura 6. Foi possível verificar que as marés simuladas, pelo ELCOM nos seus períodos oscilatórios de tempo, apresentam ligeiras diferenças nas amplitudes quando comparadas as amplitudes observadas. Portanto, nota-se uma discordância nas amplitudes dos resultados produzidos através dos dados usados.

Nas marés simuladas pelo modelo ELCOM, nota-se períodos de marés vivas caracterizado por altura máxima de 1.88 e mínima de 0.47 metros que são altas quando comparadas as observadas que atingiram alturas de 1.74 a 0.36 metros de máxima e mínima, respectivamente. Observa-se que a onda da maré simulada, tem alturas maiores que as observadas com uma diferença média de amplitude de 0.14 e 0.11m de máxima e mínima, respectivamente, e apresentando um atraso na sua fase oscilatória.

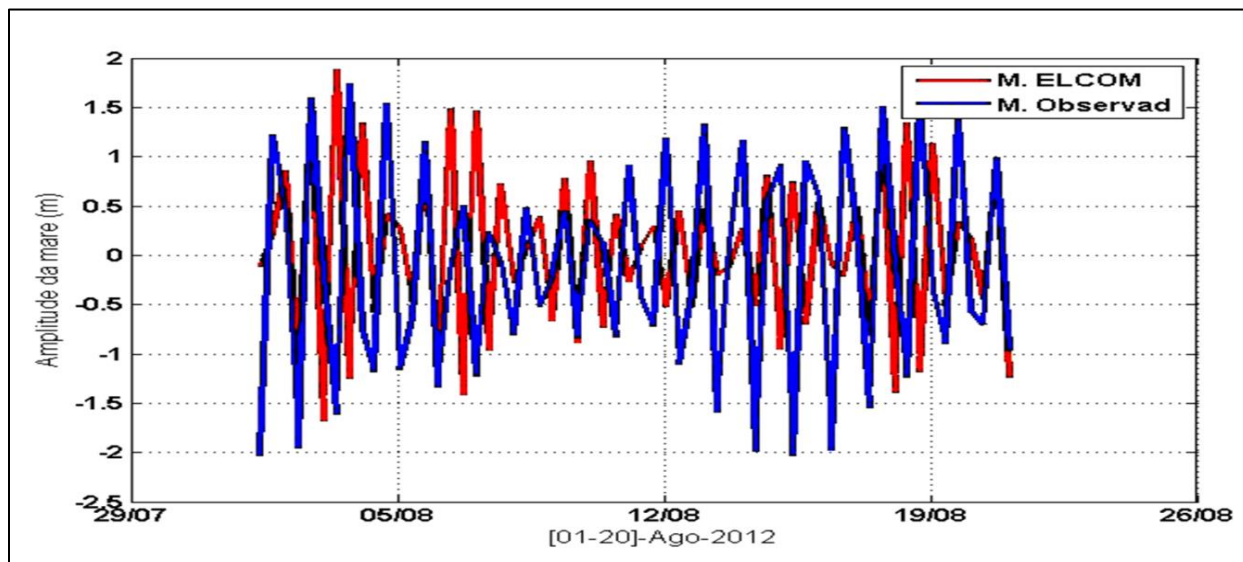


Figura5. Mares simuladas pelo ELCOM e as Observadas no campo na região da boca do Estuário dos Bons Sinais, para Agosto de 2012.

✓ Temperatura

Para a simulação a partir do modelo ELCOM usou-se dados de temperaturas em médias mensais extraídos no servidor de dados colhidos por meio de satélites estacionários (<http://apdrc.soest.hawaii.edu/dada/data.php>) referentes ao ponto que localizados na região da boca do estuário, cuja, a temperatura, variou de 23.32 °C de mínima a 30.53°C de máxima para os meses de Agosto e Abril, respectivamente.

A Figura 7 ilustra o resultado obtido na simulação em comparação com os dados colectados no ponto estacionário, que apresentaram pequenas diferenças. A temperatura usada na inicialização do modelo ELCOM foi de 29 °C em todo estuário, tendo este, após o início decrescido para temperatura cuja média foi de 24 °C. Portanto, este modelo levou aproximadamente 5 dias para impor as temperaturas próximas a sua realidade.

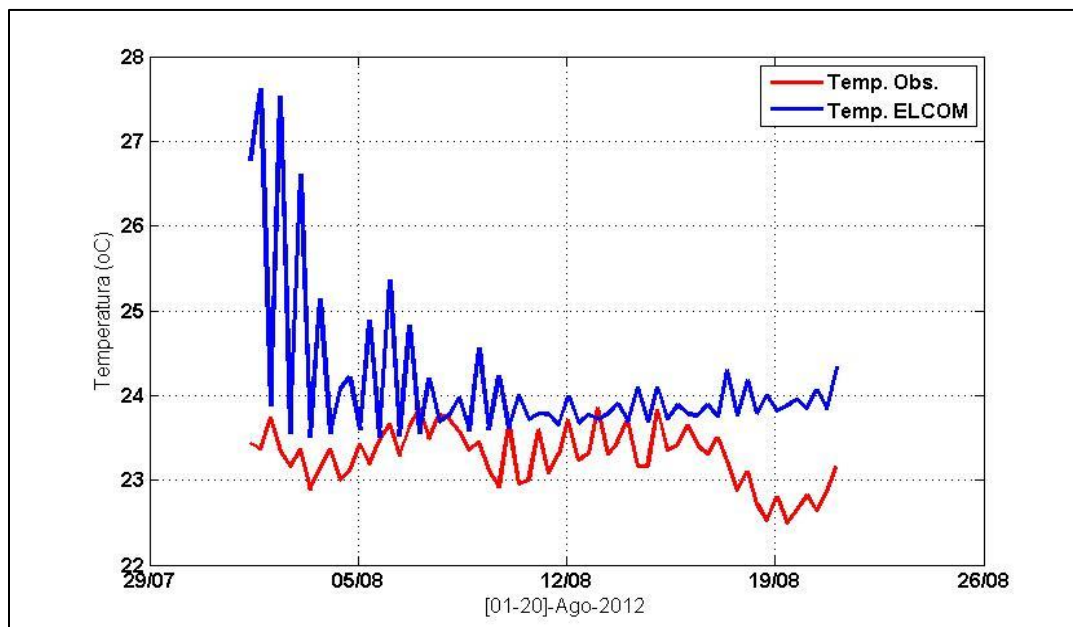


Figura6. Temperaturas simuladas pelo ELCOM e observadas no campo na região da boca do Estuário dos Bons Sinais, referente a Agosto de 2012

4.2. Tempo de residência da água.

A utilização dos modelos hidrodinâmicos para estimar o tempo de renovação da água num compartimento estuarino é uma técnica que vem aplicando-se a décadas atrás como forma de controlar substâncias que podem prejudicar os bons serviços que são prestados às comunidades em volta do mesmo. Portanto, a figura 8 abaixo, mostra o comportamento do tempo de renovação no estuário, desde a confluência à fronteira aberta em conexão com o oceano aberto que caracteriza-se por alta capacidade de remoção da água na região da boca e baixa para a confluência.

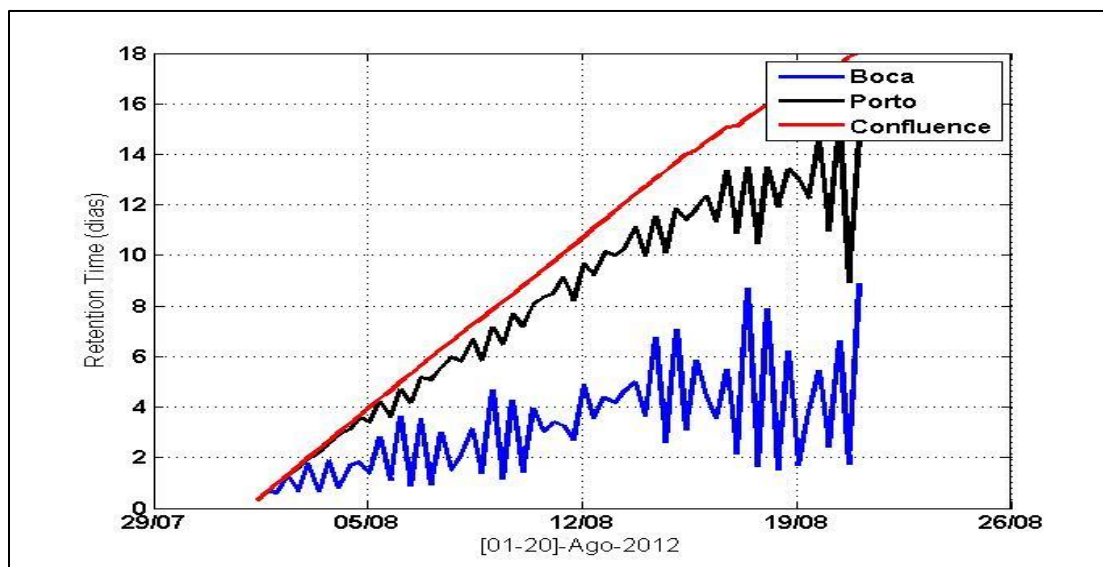


Figura7. Distribuição dos tempos de renovação em três pontos (boca, porto e confluência) do E. B. Sinais.

4.2.1. Modelo de Prisma de Marés

Como foi dito, anteriormente, que o factor de retorno de fluxo (b) varia de $[0;1[$, portando o tempo de renovação da água também variou segundo a variação do mesmo.

Quando considerou-se o factor de retorno como sendo o valor máximo possível, nesse caso o último valor ($b=0.9$), o tempo de renovação foi de 5.62 dias, quando o factor diminuiu para a metade ($b=0.5$), o tempo de renovação reagiu numa forma directa para 1.12 dias e, no por fim, quando reduziu, o factor, para ($b=0$) obteve-se um tempo de 0.56 dias (equivalente a 13.49 horas). Contudo, observou-se que com o aumento ou diminuição do factor de retorno o TR tende a mostrar mesmo padrão de variação.

4.2.2. Modelo ELCOM

A relação entre a temperatura, salinidade e tempo de renovação obtida durante a simulação, com um período aproximado de 20 dias, é ilustrada na figura 9. A medida que a temperatura aumenta da boca a confluência, acompanhando a diminuição progressiva do volume da água que se registou mediante a composição da batimétrica, a salinidade comportou-se de uma maneira contrária, tendo mostrado uma diminuição exponencial dos seus valores desde a região da boca em direcção a confluência. Este comportamento justifica-se segundo a geometria do local e as condições que, os efluentes, foram submetidos.

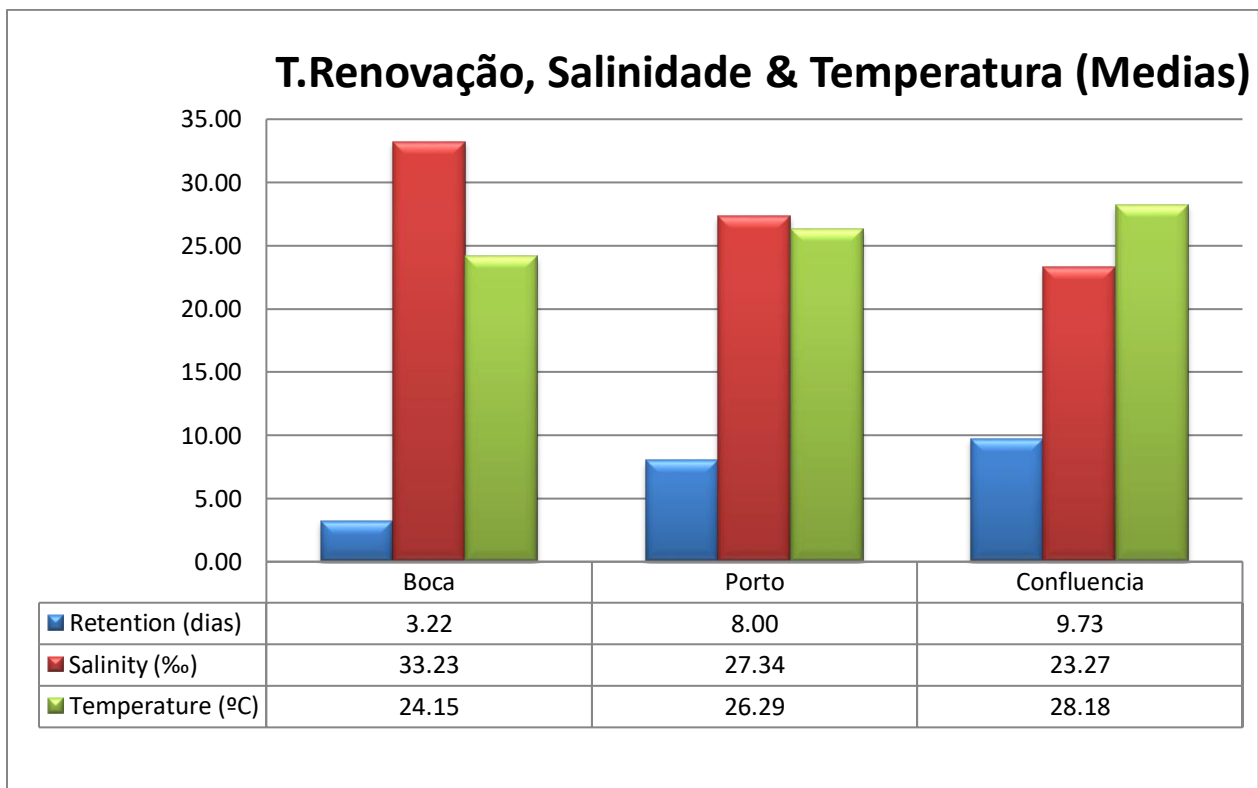


Figura8. Distribuição dos parâmetros (tempo de renovação, salinidade e temperatura) médios de acordo com a sua posição no Estuário dos Bons Sinais.

A distribuição superficial dos factores que influenciam no tempo de renovação no estuário dos Bons Sinais mediante a influência de todos os factores utilizados para a inicialização do modelo foram de

extrema importância para a determinação do tempo de permanência da água dentro do canal. Neste caso, com base na Figura 10, atingiu um tempo significativo máximo de renovação de 17.99 dias para efluentes que encontravam-se na confluência do canal, um máximo também de 14.72 dias para a região do porto e 8.87 dias para a região da boca do estuário. Portanto, esta figura ilustra a distribuição superficial (*sheet_surf*) do tempo de renovação da água referente ao último dia da simulação.

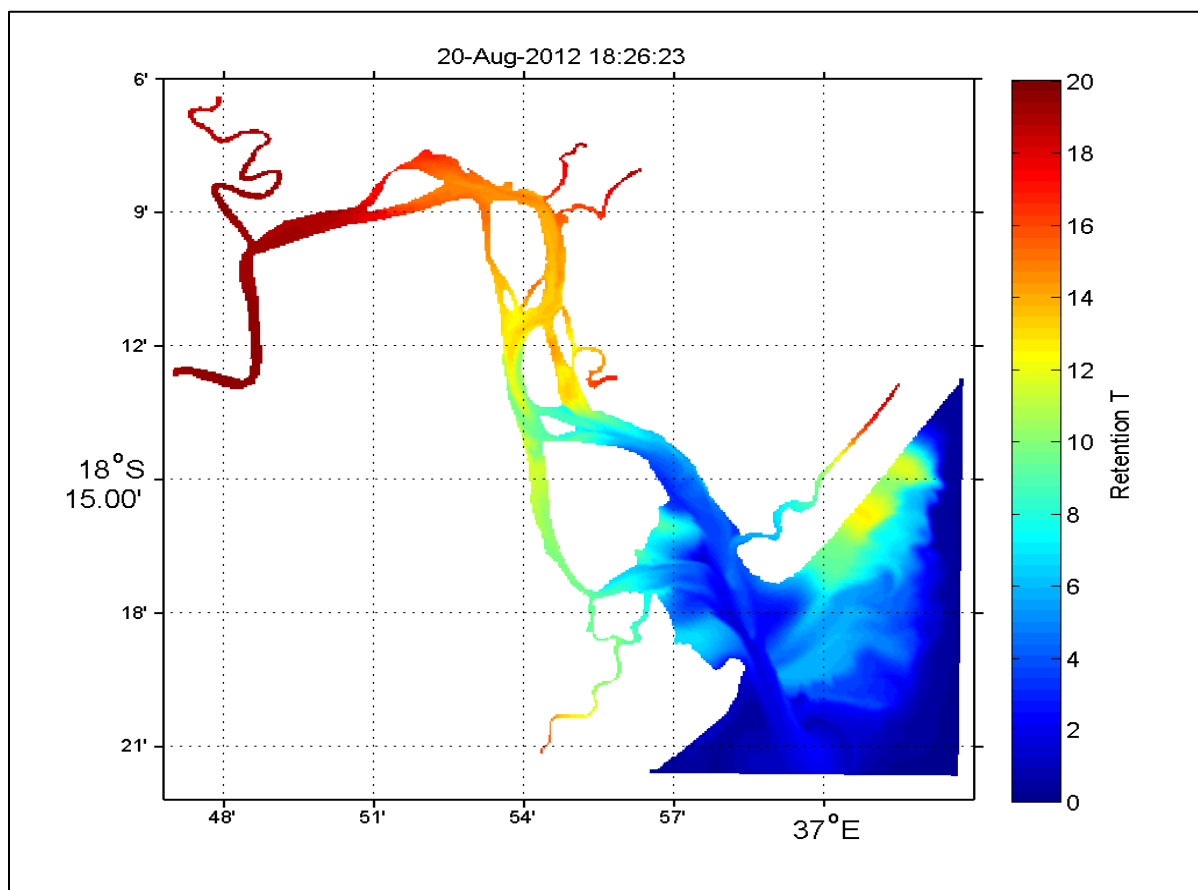


Figura9. Distribuição dos tempos de renovação superficial do estuário, no último dia da simulação

A variação do parâmetro, tempo de renovação, nesta ordem apresentada é tida como normal devido a suas características morfodinâmicas, geométricas e das influências dos parâmetros que contribuem para a oscilação nos estuários.

Portanto, as flutuações vistas do TR (Figura 11) reflectem as influências temporárias directas de oscilações das marés na região da boca do estuário. Esta influência tende a diminuir quando

direccionámo-nos ao estuário à dentro. Desta forma o padrão de circulação das marés na região da boca e o quão, este, influencia substancialmente no tempo de renovação da água na região da boca do estuário é notado com base na figura abaixo.

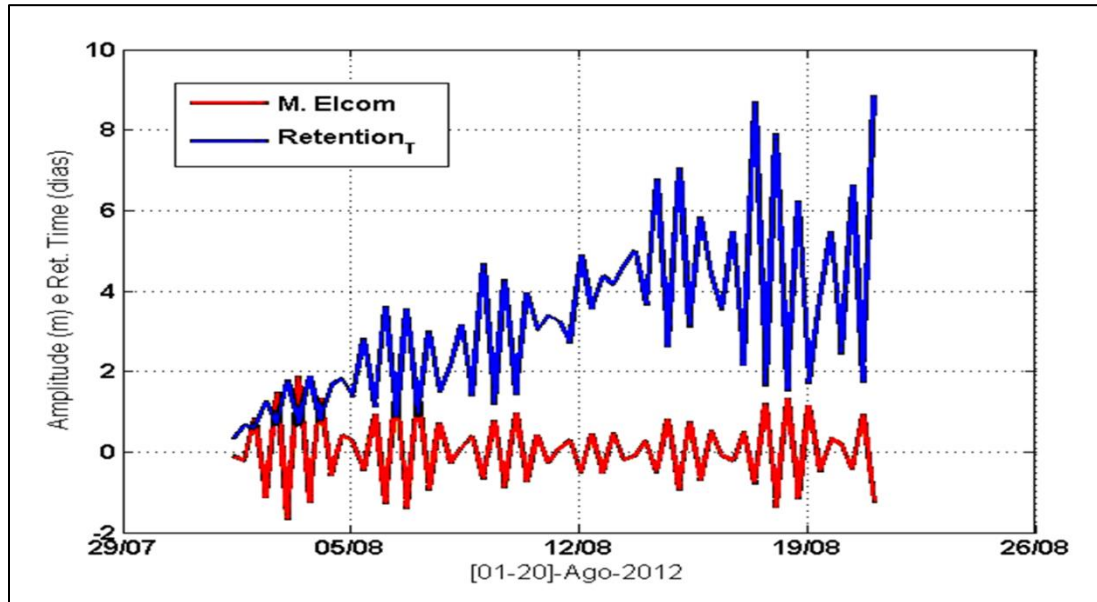


Figura10. Influência da maré em relação ao tempo de renovação na região da boca do estuário dos Bons Sinais

As velocidades (u e v) têm o comportamento característico para todas regiões monitoradas que não excede 1 m/s de velocidades. Estas, podem ser comparadas com o comportamento das marés (Fig.13) e, bem como, com o tempo de renovação (Fig.12) mostrando influências diversificadas para a região da boca.

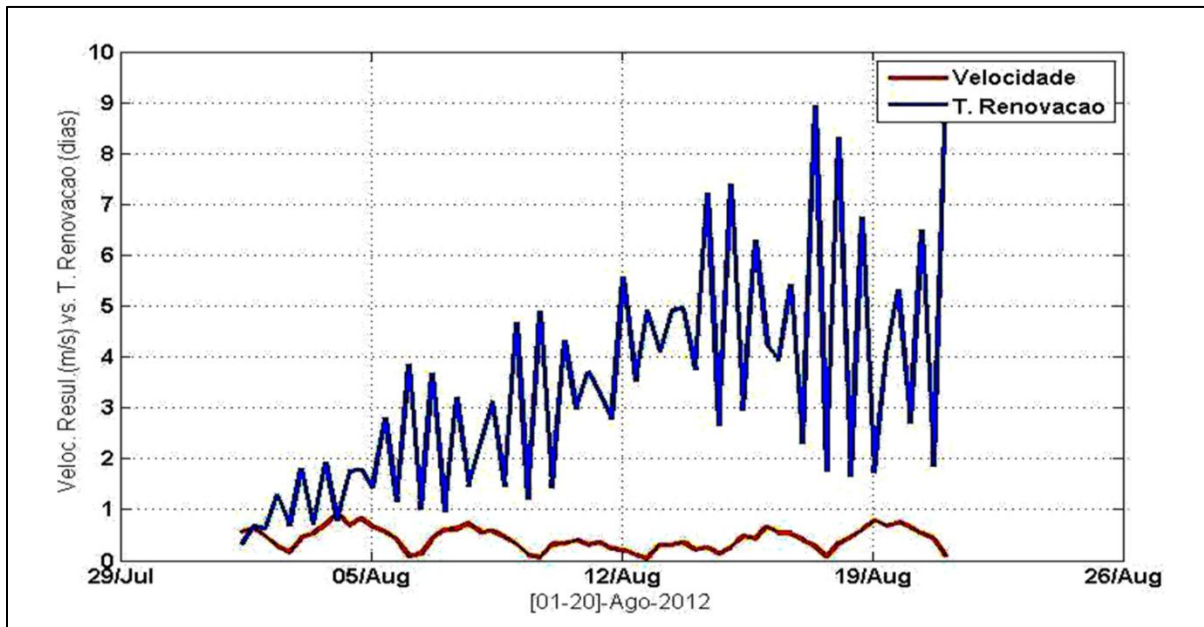


Figura 11. Comportamento do TR em função das velocidades (u e v) no período de simulação compreendido entre 1 a 20 de Agosto de 2012.

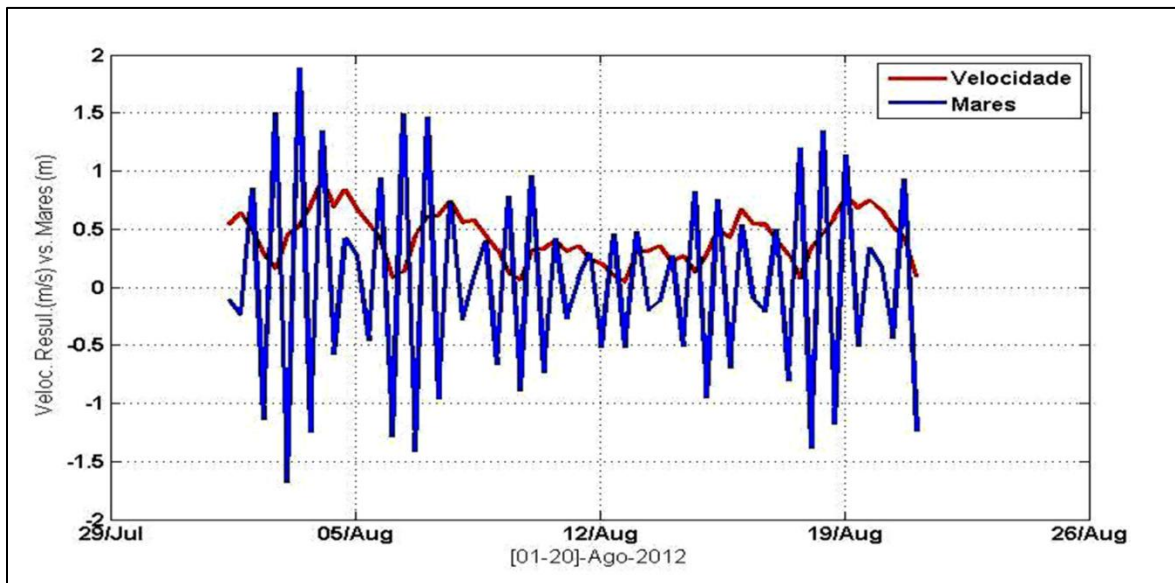


Figura 12. Comportamento das marés em função do campo de velocidades (u e v) durante o período de simulação (01-20 de Agosto de 2012).

A direcção e a velocidade em torno do canal são parâmetros que seguem um padrão de distribuição variado de local em local e dependem das suas condições que lhes são propostos.

A Figura 14 ilustra os parâmetros controladores da circulação em torno do estuário demonstrando a distribuição das magnitudes das correntes no último dia da simulação que foi caracterizado por uma intensidade de corrente resultante, contendo intensidades máximas de 2.7 m/s e mínimas cerca de 0 m/s. Portanto, é de extrema importância ressaltar que este resultado surge da combinação das velocidades nas componentes u e v.

A dissociação dos factores que interagem na intensidade das correntes é ilustrada nas figuras 15A e 15B, com mais detalhes do dia 20 de Agosto de 2012.

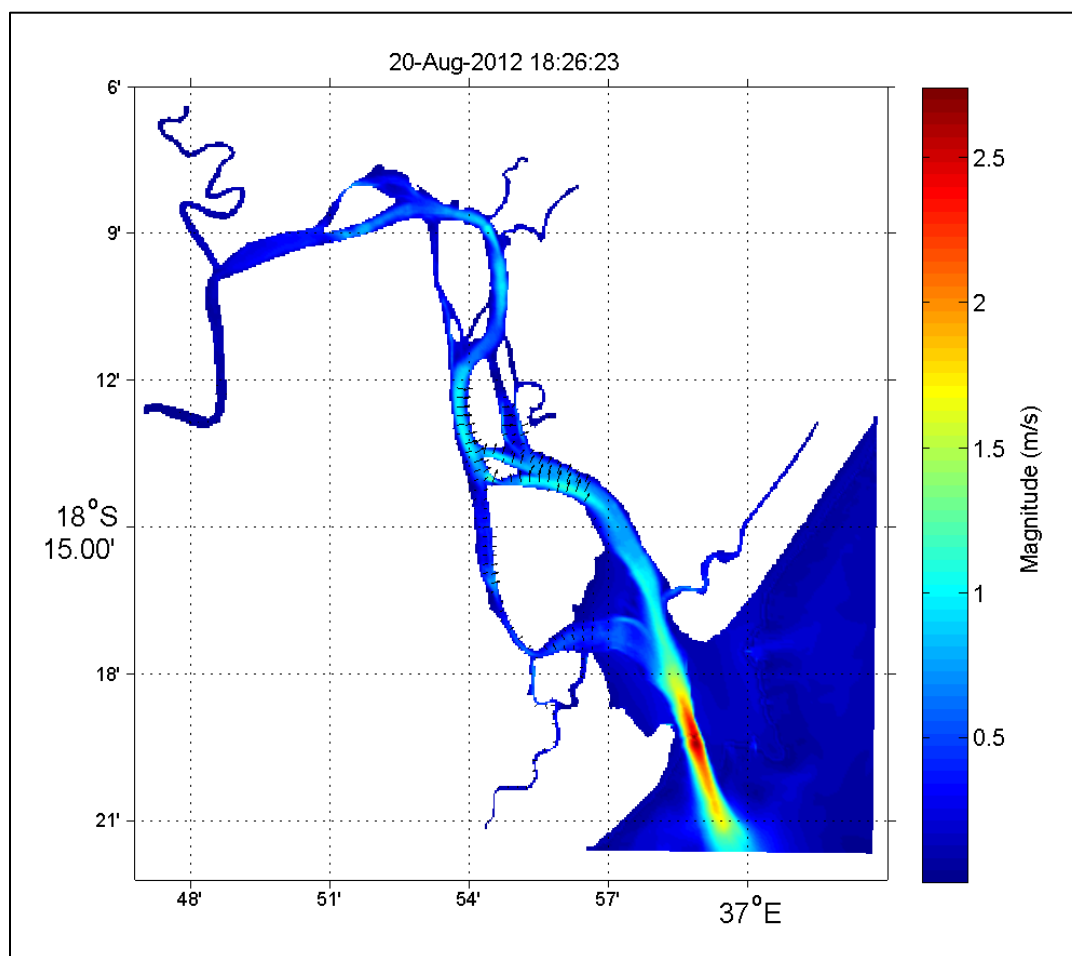


Figura13. Distribuição superficial da intensidade das correntes no último dia da simulação.

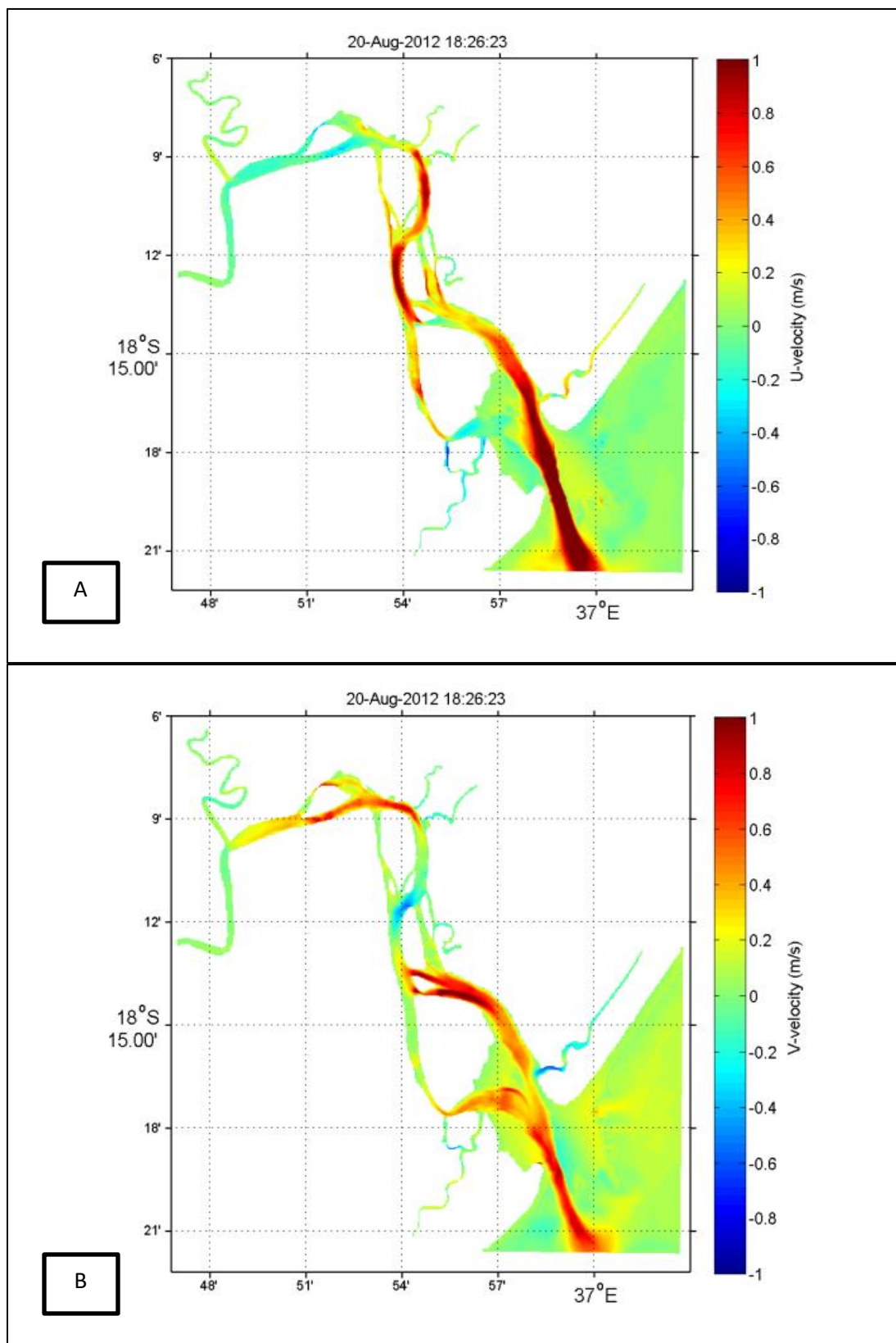


Figura14. Ilustração do comportamento das velocidades (u e v) no dia 20 de Agosto de 2012.

Para melhor inferência dos aspectos do comportamento do campo de velocidade, nas componentes x e y, a Figura 16 mostra a distribuição longitudinal das variações encontradas ao longo da simulação nos três pontos alvos de monitoramento.

Deste modo, a velocidade atingiu valores máximos na região da boca que foi caracterizado por valores que atingiram 0.9 m/s (em seu modulo) e de 0.06 m/s na confluência.

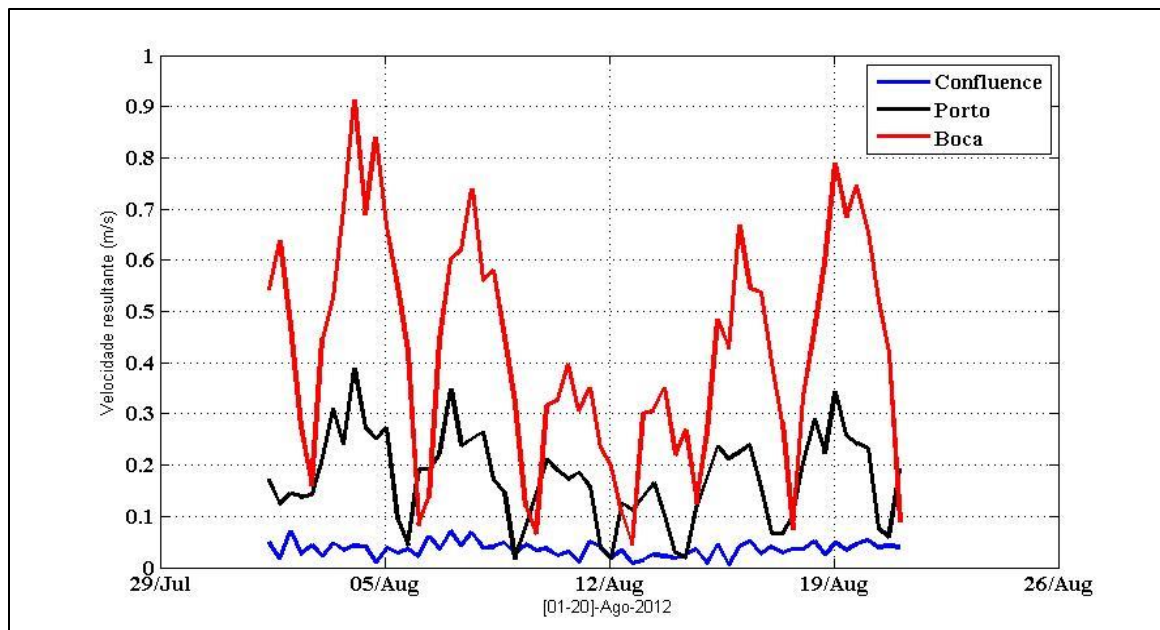


Figura15. Comportamento da velocidade em torno do estuário na boca, porto e confluência

CAPITULO V:

5. DISCUSSÃO

Com base no modelo de prisma de marés o tempo de renovação da água tende a variar segundo as modificações do factor de retorno. Estas mudanças foram testadas, graças a variação contínua e temporária do mesmo, importando, saber a influência no tempo de renovação. Portanto o tempo de renovação seguiu positivamente quando o factor de retorno mostrou o mesmo sentido.

Para o cálculo do tempo de renovação hídrico, Souza, (2005) aplicou o modelo de um compartimento para todo o estuário, considerando-o do tipo bem misturado. O sistema estuarino apresentou tempo de renovação hídrico variando de 1 dia em Agosto de 2001 a 8 dias em Maio de 2001.

O resultado do TR da água, referente ao mês de Agosto, encontrado a partir do modelo de Prisma de maré, proposto por Dyer, (1973), para o estuário dos Bons Sinais esteve a variar de 13.49 horas a 5.62 dias dependendo do factor de retorno que variou de 0.1 a 0.9, respectivamente. Ferraz, (2009) aplicou o modelo na mesma área em estudo, onde obteve máximo de 2 dias e mínimo de 0.5 dias nos meses de Julho e Agosto, respectivamente. Portanto, Ferraz, (2009), negligenciou o factor de retorno e constatou a partir do modelo de Prisma de marés, que as águas se renovam em menos tempo, tornando o modelo ideal para análise da qualidade de água, assumindo o estuário dos Bons Sinais menos susceptível à retenção de poluentes.

O método de prisma de mare foi modificado por Luketina, (1998), para o cálculo do tempo de residência, associado à substância água, passando a incorporar um factor de retorno de caudal para contabilizar a parcela do prisma da maré que não chega a sair do estuário durante a vazante e o efeito da exportação do caudal fluvial. Nesse contexto, o resultado apresentado carece de mais apreciação para ser validado como ideal para o estuário em estudo.

Em relação ao período de maré observa-se que durante as marés vivas o tempo de renovação da água é mínimo na ordem de aproximadamente 8 dias. Este comportamento acontece devido a maior intensidade das correntes verificadas na boca do estuário durante as marés vivas, que fazem com que a renovação das águas seja rápida neste período. Isto, também, deve-se ao facto de a zona da boca estar sujeita a vários impulsionadores de velocidade. O TR dentro do estuário distribuiu-se em

concordância com as correntes de marés, tendo estas sido influenciadas provavelmente pelo afunilamento, descargas fluviais e *stress* dos ventos.

A influência dos afunilamentos no comportamento da onda de maré e das correntes de maré pode ser observada ao longo de todo Estuário durante os dias de simulação. Os maiores valores de velocidade são encontrados nos locais de menor afunilamento do canal e no afunilamento existente, principalmente, na entrada do estuário.

Oliveira, (2010), no estudo realizado, analisando o comportamento das marés e correntes de marés, constatou um cenário inverso. Este comportamento deve se há uma diminuição da largura do estuário, e conseqüentemente um aumento da velocidade. Portanto, a não inclusão de outros factores como: descargas fluviais, *stress* dos ventos, etc. pode levar a resultados errôneos.

Segundo Dyer, (1997), a morfologia do estuário e a fricção resultam em variações importantes na amplitude da maré e na velocidade das correntes de maré. Em estuários onde ocorre uma redução da amplitude, o efeito da convergência é menor que o da fricção. Já em estuários onde ocorre uma amplificação da amplitude, o efeito da convergência é maior que o da fricção (Nichols e Biggs, 1985). Desta forma, os baixos valores de velocidade encontrados, podem ser devidos ao maior efeito da fricção. Estuários com este comportamento são chamados na literatura de estuários hipossíncronos, (Nichols e Biggs, 1985).

Tendo como base o trabalho de Oliveira e Kjerfve, (1993), estimaram o tempo de residência para a laguna Muguambé de 36 dias, é notório que Maguambé possui um tempo de renovação maior por haver necessariamente uma descarga de água, prisma de maré menor em comparação com a laguna de Mundaú, além de possuir o dobro do volume de água.

As variações das estimativas do TR reflectem padrões de vazão e geomorfologia diferentes. Assim, importa sublinhar que a renovação da água no estuário dos Bons Sinais é também variada, tratando de uma outra área e contendo padrões referenciais diferenciados quando comparados as regiões acima citadas. Outros factores que podem constituir elementos da variância, para além das descargas de água e prisma de maré são o *stress* das velocidades dos ventos, intensidades das correntes e a geometria da área.

Ao comparar resultados obtidos entre as abordagens lagrangeanas, foram observadas grandes diferenças. Em condições teóricas de fluxo constante e uniforme, Dyer, (1997) destaca que as

velocidades euleriana e lagrangeana deverão ser iguais. Porém, em estuários, o escoamento raramente será contínuo e uniforme. Todavia, este estuário apresenta todas as variações geométricas e condições oceanográficas diferenciadas, desta forma, pequenas alterações são perceptíveis e aceitáveis.

Com ajuda do Modelo Oceânico Costeiro para Lagos e Estuários (ELCOM), determinou-se um TR da água médio de 3.22 dias para boca, 8.00 dias na região do porto e 9.73 dias para a confluência. Segundo Ribeiro, (2012), simulando a acção do vento na dispersão de contaminantes no estuário do Rio Pontagi/Brasil, partindo de uma fonte localizada no interior do estuário, feito a partir do módulo 2DH, utilizando o módulo Lagrangeano do SisBaHia, verificou-se que enquanto o TR cresce para a região mais interna do estuário, após algum tempo as partículas passam a apenas dendritos e reentrâncias do estuário. Este cenário foi constatado neste trabalho com ligeiras diferenças por conta do período e regiões de simulação, configurado para o mesmo mês (agosto), coincidentemente, confirmando a ocorrência desse facto apresentado.

Os resultados das simulações mostram que a capacidade de renovação das águas no estuário dos Bons sinais foi rápida na boca e diminuiu em direcção à confluência. Fernandes (2001) e Ferraz (2009) usaram vários métodos verificaram que maiores descargas dos rios diminuem o tempo de renovação da água, enquanto baixas descargas do rio aumentam o tempo de renovação.

CAPÍTULO VI:

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O tempo máximo de renovação obtido no modelo de Prisma de marés foi de 5.62 dias, quanto ao factor de retorno foi de 0.9, mínimo na ordem de 13.49 horas com um factor de retorno de 0.1 e 0.5 de factor correspondeu ao tempo de renovação de 1.12 dias.

A simulação feita com modelo ELCOM obteve como resultado do tempo máximo de renovação não superior a 17.99 dias para a região da confluência, 14.72 dias na região do porto e 8.87 dias para a região da boca.

As marés contribuíram significativamente para a renovação da água, principalmente, na região da boca que mostraram sua influência directa ao longo das suas oscilações. Na confluência mostrou flutuações muito baixas quando comparadas com as da boca. Portanto a zona da confluência é mais influenciadas pelas descargas fluviais que agem como principais para exudação desta área.

As velocidades das correntes mostram ser fortes na região central da foz do estuário do que nas bermas e longitudinalmente. Os módulos das velocidades foram máximos de 0.9m/s na região da boca decrescendo quando adentra a confluência, obtendo, nesta área velocidade máxima na ordem de 0.06m/s.

As correntes de marés actuam inversamente ao TR, diminuído da boca à montante, sendo influenciadas pelo afunilamento do canal, convergência com as descargas fluviais e *stress* dos ventos.

Recomendações:

- Recomenda-se o acoplamento de modelos de qualidade de água para a análise do efeito da dispersão de cada parâmetro, ex: ventos, etc., neste sistema estuarino.
- Sugere-se que outros modelos sejam incluídos em estudos futuros de modelagem do sistema estuarino estudado, a fim de que o comportamento da maré e das correntes de maré modelados seja o mais próximo possível da realidade.

CAPITULO VII.

7. Referências bibliográficas

1. António, Maria. H P. (2012). Hydrodynamics of the Bons Sinais Estuary. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, Moçambique
2. Aikman, F., Lanerolle, L.W.J. (2015) Report on the National Ocean Service Workshop on Residence/Flushing Times in Bays and Estuaries. NOAA Office of Coastal Survey, SilverSpring, MD.2004. Disponível: <http://www.nauticalcharts.noaa.gov/csdl/publications/TR_NOS_CS20_FY05_Aikman_ResidenceTimeWorkshopReport.pdf>.
3. CAMERON, W. M. e Pritchard, D. W. (1963) Estuaries. In *The Sea*, Vol. 2 (Hill, M. N., ed.). Wiley, New York.
4. Dallimore, Chris; Hodges, Bem,(2007). Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM v2.2 User Manual, Centre of water Research, University of Western Australia.
5. DYER, K.R., 1973. Estuaries: A physical introduction. N.Y.: John Wiley & Sons. 140 pp. p.140.
6. Dyer, K. R., and P. A. Taylor. 1973. A simple, segmented prism model of tidal mixing in well-mixed estuaries. *Estuarine and Coastal Marine Science* 1: 411–418.
7. DYER, K. R. 1997. Estuaries: A Physical Introduction. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons. p. 195.
8. Day Jr., J.W.; Hall, C.A.S.; Kemp, W.M. & Yanez-Arancibias, A. 1989. “Estuarine Ecology.” John Wiley & Sons, inc, New York, 558 p
9. Dias, F.J.S.; Marins, R.V.; Maia, L.P.; De Farias, E.G.G. (2007). Dependência do Tempo de Residência da Água no Estuário do Rio Jaguaribe
10. Elliot, A. J. (1976) A study of the effect of meteorological forcing on the circulation of the Potomac estuary. Chesapeake Bay Institute, Special Report 56, 32 p.
11. Fernandes, E. H. L. 2001. Modelling the hydrodynamics of Patos Lagoon. 2001. 198p. Thesis (Ph.D)-University of Plymouth
12. FRIEDRICH, C. T. 1992. MADSEN, O. S. Nonlinear Diffusion of the Tidal Signal in Frictionally Dominated Embayments. *Journal of Geophysical Research*, v: 97, p. 5637-5650.
13. GODIN G. 1991. Frictional effects in river tides. In: PARKER B. B. (Ed.). *Tidal hydrodynamics*. New York, John Wiley & Sons, pp. 379-401.
14. Joao, T. M. P. F (2009). Estudo da Renovação da água no Estuário dos Bons Sinais a partir do Modelo de Prisma de Marés e Fracção de água doce. Universidade Eduardo Mondlane, Zambézia, Moçambique
15. Joao, T. M. P. F (2015). Estudo da hidrodinâmica e renovação da água no estuário dos bons sinais. Universidade Eduardo Mondlane, Zambézia, Moçambique

16. Gómez-Gesteira, M.; De Castro, M., Prego, R. (2003) Dependence of the water residence time in Ria of Pontevedra (NW Spain) on the seawater inflow and the river discharge. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. v. 58, p.567–573.
17. Hagy, J.D., Sanford, L.P., Boynton, W.R. (2000) Estimation of net physical transport and hydraulic residence times for a coastal plain estuary using box models. *Estuaries*, v.23, p.328-340.
18. Hansen, D. V. e Rettray, M. (1966). New dimensions in estuary classification. *Limnol Oceanogr*, 11, pp. 319-326
19. Hodges, Ben and Dallimore, Chris. (2003). *Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM v2.2 Science manual* Centre for Water Research, University of Western Australia. May 23, 62p.
20. INAHINA (2000), Previsão de marés no Porto de Quelimane.
21. Jesus, J. A. (2006). *Utilizacao de modelagem matematica 3D na gestao da qualidade da agua em mananciais- Aplicacao do reservatorio Billings*. Sao Paulo.
22. Kjerfve, B., Schettini, C. A. F., Kloppers, B., Lessa, G., Ferreira, H. O. (1996) Hydrology and salt balance in a large hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 42, p. 701-725.
23. Luketina, D. (1998). Simple tidal prism models revisited. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 46, pp. 77-84.
24. Machado, B. V. Z., e Silva, R. M. L. C. F. Da. (2010). *Análise Da Influência Da Baía Da Guanabara Na Qualidade Da Água Das Praias Oceânicas Adjacentes Através Da Modelagem Computacional*. Rio De Janeiro, Rj – Brasil, 110.
25. Merino, M., Czitrom, S., Jordán, E., Martin, E., Thomé, P.; Moreno, O. (1990) Hydrology and rain flushing of the Nichupté lagoon system, Cancún, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, p.223–237.
26. Miller, R.L., Mcpherson, B.F. (1991) Estimating estuarine flushing and residence times in Charlotte Harbor, Florida, via salt balance and a box model. *Limnology and Oceanography*, v.36, p.602-612.
27. Miranda, L.B.; Castro, B.M.; Kjerfve, B. 2002. “Princípios de Oceanografia Física de Estuários”. Ed. Da USP. 408 pp.
28. NICHOLS, M.M.; BIGGS R.B. 1985. Estuaries. In: DAVIS, R.A., Editor, *Coastal sedimentary environments*, Springer-Verlag, New York, pp. 77–186.
29. Oliveira, R. B. P. e Kjerfve, B., 1993. *Environmental Response of a Tropical System to Hydrological Variability: Mundau-Munguaba*, Brasil, South Carolina, Colombia: Academic Press Limited.
30. Oliveira, A., Fortunato, A. B. and Batists, A. M.: 2000, Mass Balance in Eulerian-Lagrangian Transport Simulations in Estuaries, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 126, n0 08.

31. PARKER, B. B. 1991. The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions (Review). In: B.B. Parker (ed.). Tidal hydrodynamics. John Wiley & Sons, New York, p. 237-268.
32. Pickard, George, L.; Emery, William J. (1990) Descriptive Physical Oceanography An Introduction. 249 pp Anthony Rowe Ltd, Great Britain.
33. PICKARD, George, L.; EMERY, William J & TALLEY, Lynne D. (2007). Descriptive Physical Oceanography Partial draft of edited version of Pickard and Emery. Elsevier.
34. Ribeiro, A.A, (2012). Simulação da ação do vento e da dispersão de contaminantes no estuário do Rio Pontegi/Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN.
35. ROEST, A. (2008). Sustainable agricultural development in Mozambique. MSc Thesis. 96 pp. Wageningen University, the Netherlands
36. Rosman, P. C., 2008, Referência Técnica do SisBaHiA. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC.
37. SANFORD, L.P., BOICOURT, W.C. e RIVES, S.R., 1992. Model for estimating tidal flushing of small embayments. J. Waterw. Port Coast. Ocean Engineering, p.635–654. Chemical Engineering Science, 2(1).1-13. VELZ, C.J., 1984.
38. Sheldon, J.E., And Alber, M. (2002) A comparison of residence time calculations using simple compartment models of the Altamaha River estuary, Georgia. Estuaries, v.25, p.1304-1317.
39. Signell, R.P., Butman, B. (1992) Modeling tidal exchange and dispersion in Boston Harbor. Journal of Geophysical Research, v. 97, p. 15591-15606.
40. Simbine, E. A. (2016). Estudo Numérico de marés e correntes de maré na Baía de Nacala usando o modelo ELCOM, 44..
41. VASSELE, V.J (2005), Intrusão Salina No Estuário Do Rio Incomate, tese de licenciatura, Universidade Eduardo Mondlane, pp 9-25.
42. XAVIER, A.G., 2002. Análise da Hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos – BA. (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Oceânica, 2002) Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, p.222.
43. Zaleski, A.R. e Schettini, C.A.F. (2003) Estimção do Tempo de Trânsito das Águas do Rio Itajaí-Açu. Notas Técnicas da Facimar, v.7, p. 63-72.

Anexo I: Finalidade da Modelagem

A modelagem computacional permite (Rosman, 2008):\

- Em análises de diagnóstico:
 - ✓ Optimização de custos de monitoramento e medição integrando-se informações espacialmente dispersas.
 - ✓ Estender o conhecimento para regiões nas quais não há medições.
 - ✓ Entender processos dinâmicos, ajudando na interpretação de medições feitas em estações pontuais.

- Em análises de prognóstico:
 - ✓ Prever situações simulando cenários para estudos e projectos
 - ✓ Mapeamento de áreas de risco para licenciamento ambiental, determinação de destinos prováveis de contaminantes, etc.
 - ✓ Definição de estratégias de acção em caso de acidentes com derrames de contaminantes, por exemplo, e criação de Planos de Emergência.
 - ✓ Elaboração de Planos de Mitigação.
 - ✓ Prever evolução de eventos em tempo real.

Anexo II. Descargas fluviais (1967-1981)

Hidrological Date	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
1967-1968	0.3 1	5.3 6	66.4 6	92.9 7	183.5 9	104.91	119. 6	44.43	17.3 2	21.95	7.28
1968-1969	0.2 7	0.8 4	23.4 8	45.9 2	94.59	76.61	84.1	30.2	11.5 4	4.97	1.71
1969-1970	0.1 5	0.5 4	20.2	45.5 5	73.44	41.82	83.3 3	22.77	7.48	4.59	0.83
1970-1971	0.1 2	0.3	9.63	41.0 7	33.88	31.29	20.6 4	13.93	4.86	3.27	0.52
1971-1972	0.0 9	0.1 3	8.55	27.6 7	31.49	21.62	13.1 2	7.77	3.21	1.79	0.38
1972-1973	0.0 6	0.0 9	7.54	19.7 1	25.18	21.17	11.3 4	4.14	1.2	0.68	0.27
1973-1974	0.0 5	0.0 4	1.08	15.9 8	13.81	20.31	10.9 2	3.04	1.04	0.5	0.25
1974-1975	0.0 3	0.0 3	0.16	15.2 3	13.05	14.15	10.6 5	2.57	1	0.49	0.19
1975-1976	0.0 2	0.0 2	0.16	13.9 3	10.26	10.08	9.49	2.14	0.86	0.49	0.15
1979-1980	0.0 2	0.0 2	0.14	1	4.63	7.13	9.41	1.57	0.7	0.46	0.15
1980-1981	-	0.0 2	0.12	0.3	3.34	4.63	9.18	1.28	0.14	0.12	0.06
Media	0.1 1	0.6 7	12.5 0	29.0 3	44.30	32.16	34.7 1	12.17	4.49	3.57	1.07