UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE OCEANOGRAFIA

FELIPE ORGE DE SÁ MENEZES

MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA BAÍA DE CAMAMU

Salvador
2011

FELIPE ORGE DE SÁ MENEZES

MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA BAÍA DE CAMAMU

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos A.D. Lentini
Co-orientador: Msc. Taoan Silva Franklin

Salvador
2011

TERMO DE APROVAÇÃO

FELIPE ORGE DE SÁ MENEZES

MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA BAÍA DE CAMAMU

Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca examinadora:

_____
Carlos Alessandre Domingos Lentini - Orientador
Doutor em Oceanografia Física e Meteorologia pela University of Miami - RSMAS, Estados Unidos
Universidade Federal da Bahia

_____
Guilherme Camargo Lessa
Doutor em Ciências Marinhas pela University of Sydney
Universidade Federal da Bahia

_____
Janini Pereira
Doutora em Oceanografia Física pela Universidade de São Paulo
Universidade Federal da Bahia

Salvador, 27 de junho de 2011

Dedico esse trabalho aos meus Pais que sempre lutaram com todas as forças pela minha evolução moral e intelectual.

AGRADECIMENTOS

Durante o trabalho recebi o auxilio de muitas pessoas, seja através de informações, discussões técnicas ou apoio moral.

Assim gostaria de começar agradecendo ao grande amigo e Mestre Taoan Silva Franklin, um dos orientadores desta monografia, responsável por minha iniciação na modelagem e pelas várias oportunidades de aprendizagem profissional. Ao professor Carlos Lentini, outro orientador deste trabalho, pelo incentivo e entusiasmo nos momentos decisivos, além das discussões técnicas de grande valia para o meu crescimento profissional.

Ao professor Guilherme Lessa pela dedicação em auxiliar e esclarecer dúvidas que foram de grande importância neste trabalho. Assim como pelo seu empenho pela ciência e por sua vontade no sentido de fortalecer o curso de Oceanografia da UFBa.

Aos oceanógrafos e amigos, Ricardo Domingues, Felipe Santos e Leonardo Lima por sempre estarem dispostos a esclarecer questões relevantes para o enriquecimento do trabalho.

Não poderia deixar de agradecer aos amigos do curso de oceanografia pelos momentos lúdicos, pelas conversas de crescimento pessoal e pelo incentivo em todas as horas. Com vocês tudo torna-se mais prazeroso.

A minha companheira Gabriela Miranda pela atenção e incentivo nos momentos mais difíceis.

A todos os meus familiares que sempre lutaram para me propiciar uma educação de qualidade.

A Associação de Pesquisa Atlantis para o Desenvolvimento da Ciência pelo financiamento dos meus estudos e a todos do Grupo de Oceanografia Tropical pelo apoio técnico.

“O pessimista queixa-se do vento, o otimista espera que ele mude e o realista ajusta as velas.”

William George Ward

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....1

2.OBJETIVOS.....3

3. ÁREA DE ESTUDO.....3

4. METODOLOGIA 6

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS 6

Geometria dos canais e batimetria.....6

Dados meteoceanográficos 8

4.2 MODELAGEM NUMÉRICA E COMPUTACIONAL 12

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....16

5.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO 16

Maré 17

Descargas e correntes.....18

5.2 SÍNTESE DO MODELO HIDRODINÂMICO E PADRÕES DE CIRCULAÇÂO RESULTANTES.....42

5.3 CAPACIDADE DE RENOVAÇÃO.....52

6. CONSIDERAÇÔES FINAIS.....59

7. REFERÊNCIAS.....61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:Mapa de localização da baía de Camamu..... 4

Figura 2: Mapa da BC, com a localização dos principais rios..... 5

Figura 3: Esquema de aproximação batimétrica das áreas de intermareais..... 7

Figura 4: Modelo digital do terreno em metros..... 8

Figura 5: Série de maré prevista utilizada para forçar a circulação de água do modelo hidrodinâmico da BC..... 9

Figura 6: Mapa de localização dos equipamentos para coleta de dados oceanográficos.....10

Figura 7: Série de maré observada e da maré astronômica, junto com a maré meteorológica.....10

Figura 8: Malha de elementos finitos não estruturada.....13

Figura 9: Local de monitoramento de fluxo e nível d`água na BC.....17

Figura 10: Séries das marés astronômicas e simuladas na estação marégrafica da ilha Grande.....17

Figura 11: Ajuste linear entre as marés simuladas e observadas na Baía de Camamu em 20 a 29/07/2005.....18

Figura 12: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 20 a 29/07/2005.....18

Figura 13: Vazões observadas e simuladas na Barra do Mutá em 20/07/2005.....19

Figura 14: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas na Barra do Mutá em 20/07/2005.....20

Figura 15: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 20/07/2005.....20

Figura 16: Campo de correntes do perfil transversal do canal na Barra do Mutá , para o ciclo de maré monitorado em 20/07/2005.....21

Figura 17: Velocidades das correntes observadas vs simuladas na Barra do Mutá em 20/07/2005.....21

Figura 18: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas na Barra do Mutá em 20/07/2005.....22

Figura 19: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 20/07/2005.....22

Figura 20: Vazões observadas e simuladas na Barra do Mutá em 27/07/2005.....23

Figura 21: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas na Barra do Mutá em 27/07/2005.....24
Figura 22: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 27/07/2005.....24
Figura 23: Campo de correntes (m s^{-1}) do perfil transversal do canal na Barra do Mutá, para o ciclo de maré monitorado em 27/07/2005.....25
Figura 24: Velocidades das correntes observadas vs simuladas na Barra do Mutá em 27/07/2005.....26
Figura 25: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas na Barra do Mutá em 27/07/2005.....26
Figura 26: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 27/07/2005.....26
Figura 27: Vazões observadas e simuladas no rio Maraú em 21/07/2005.....27
Figura 28: Maré meteorológica observada no rio Maraú em 21/07/2005.....28
Figura 29: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas no rio Maraú em 21/07/2005.....28
Figura 30: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 21/07/2005.....28
Figura 31: Campo de correntes (m s^{-1}) do perfil transversal do canal na Barra do Mutá, para o ciclo de maré monitorado em 20/07/2005.....29
Figura 32: Velocidades das correntes observadas vs simuladas no rio Maraú em 21/07/2005.....30
Figura 33: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas no rio Maraú em 21/07/2005. 30
Figura 34: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 21/07/2005.....30
Figura 35: Vazões observadas e simuladas no rio Maraú em 29/07/2005.....31
Figura 36: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas no rio Maraú em 29/07/2005.....32
Figura 37: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 29/07/2005.....32
Figura 38: Campo de correntes (m s^{-1}) do perfil transversal do canal no rio Maraú , para o ciclo de maré monitorado em 29/07/2005.....33
Figura 39: Velocidades das correntes observadas vs simuladas no rio Maraú em 29/07/2005.....33

Figura 40: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas no rio Maraú em 29/07/2005.....34
Figura 41: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 29/07/2005.....34
Figura 42: Vazões observadas e simuladas no rio Serinhaém em 22/07/2005.....35
Figura 43: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas no rio Serinhaém em 22/07/2005.....35
Figura 44: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 22/07/2005.....36
Figura 45: Campo de correntes (m s^{-1}) do perfil transversal do canal rio Serinhaém, para o ciclo de maré monitorado em 22/07/2005.....36
Figura 46: Velocidades das correntes observadas vs simuladas no rio Serinhaém em 22/07/2005.....37
Figura 47: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas no rio Serinhaém em 22/07/2005.....37
Figura 48: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 22/07/2005.....38
Figura 49: Vazões observadas e simuladas no rio Serinhaém em 28/07/2005.....38
Figura 50: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas no rio Serinhaém em 28/07/2005.....39
Figura 51: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 28/07/2005.....39
Figura 52: Campo de correntes (m s^{-1}) do perfil transversal do canal rio Serinhaém (Figura 19), para o ciclo de maré monitorado em 28/07/2005.....40
Figura 53: Velocidades das correntes observadas vs simuladas rio Serinhaém em 28/07/2005.....41
Figura 54: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas no rio Serinhaém em 28/07/2005.....41
Figura 55: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 28/07/2005.....41
Figura 56: Campo de velocidades das correntes em meia maré enchente de sizígia.....43
Figura 57: Campo de velocidades das correntes, em meia maré enchente de sizígia, nos locais das correntes mais intensas na BC.....43
Figura 58: Campo de velocidades das correntes em meia maré vazante de sizígia. 44

Figura 59: Campo de velocidades das correntes, em meia maré vazante de sizígia, nos locais das correntes mais intensas na BC.....44
Figura 60: Campo de velocidades das correntes em meia maré enchente de quadratura.....45
Figura 61: Campo de velocidades das correntes, em meia maré enchente de quadratura, nos locais das correntes mais intensas na BC.....45
Figura 62: Campo de velocidades das correntes em meia maré vazante de quadratura.....46
Figura 63: Campo de velocidades das correntes, em meia maré enchente de quadratura, nos locais das correntes mais intensas na BC.....46
Figura 64: Localização dos pontos onde foram retirados os dados de maré e velocidade das correntes de maré.....47
Figura 65: Variação do nível d'água nos pontos E, S3 e M3 durante uma maré de quadratura.....48
Figura 66: Variação do nível d'água nos pontos E, S3 e M3 durante uma maré de sizígia.....48
Figura 67: Amplitude da maré e o módulo da velocidade das correntes de maré, durante a situação de sizígia e quadratura, em pontos do estuário do rio Serinhaém.....50
Figura 68: Amplitude da maré e o módulo da velocidade das correntes de maré, durante a situação de sizígia e quadratura, em pontos do estuário do rio Maraú.....51
Figura 69: Estações de controle para as simulações da capacidade de renovação.....52
Figura 70: Curvas de renovação das águas da entrada da Baía de Camamu ao longo de 30 dias de simulação.....53
Figura 71: Curvas de renovação das águas do estuário do rio Serinhaém ao longo de 30 dias de simulação.....53
Figura 72: Curvas de renovação das águas da região central ao longo de 30 dias de simulação.....54
Figura 73: Curvas de renovação das águas do estuário do rio Maraú ao longo de 30 dias de simulação.....54
Figura 74: Percentual de renovação das águas da Baía de Camamu.....55
Figura 75: Percentual de renovação das águas da Baía de Camamu.....55
Figura 76: Percentual de renovação das águas da Baía de Camamu para um cenário mais realista.....56
Figura 77: Percentual de renovação das águas da Baía de Camamu para um cenário mais realista.....57
Figura 78: Tempo de renovação, em dias, das águas na Baía de Camamu.....58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Resumo do monitoramento das correntes com o ADCP.....11

Tabela 2: Descargas médias dos principais rios afluentes à Baía de Camamu.....11

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a circulação de água da Baía de Camamu (BA). As características da circulação são investigadas através do modelo numérico hidrodinâmico RMA2 forçado pela maré astronômica e as vazões dos principais rios, sendo que as soluções hidrodinâmicas são utilizadas para investigar a capacidade de renovação e o tempo de renovação das águas através do modelo de dispersão de substâncias RMA4.

De uma maneira geral as correntes são fracas, à exceção das regiões de canais e estreitos, com velocidades sempre inferiores a 40 cm/s. Nos canais do rio Maraú, do rio Serinhaém e da Barra do Mutá ocorrem as maiores velocidades, com velocidades variando de 60 cm/s a 138 cm/s. Em situação de maré de sizígia as correntes apresentam velocidades aproximadamente 40% superiores às observadas em situação de maré de quadratura.

Foi possível verificar que a baía apresenta tempos de renovação elevada, de 11 a 35 dias (50 a 75 dias) para 63% de renovação (100% de renovação). O médio curso estuarino do rio Maraú apresentou as piores taxas de renovação, merecendo assim atenção especial a cerca das questões ambientais.

Palavra Chaves: modelo hidrodinâmico; capacidade de renovação; Baía de Camamu.

1. INTRODUÇÃO

Embora as regiões costeiras englobem menos de 20% da superfície do planeta, elas contêm mais de 45% da população humana; hospedam 75% das megalópoles com mais de 10 milhões de habitantes e produzem cerca de 90% da pesca global (Lacerda, 2010). Estudos realizados por Tilman *et al.* (2001) prevêem que em 2025 mais de 75% da população mundial habite a zona costeira, representando um total de 6,3 bilhões de pessoas. Devido a sua grande diversidade de recursos naturais e facilidades de transporte, as regiões costeiras sempre foram bastante atraentes à ocupação humana, favorecendo o crescimento de grandes centros urbanos ao redor de baías e estuários. Dentro deste panorama esta região pode ser considerada um importante local para o desenvolvimento industrial e/ou portuário, como fonte significativa de recursos minerais, incluindo petróleo e gás natural, e um abundante reservatório de ecossistemas indispensáveis para o funcionamento do planeta. Por exemplo, as regiões estuarinas são consideradas como locais ideais para o desenvolvimento econômico tanto pela quantidade abundante de água que dispõem para consumo e recreação, quanto pelo fato de serem regiões costeiras que servem para o abrigo de navios comerciais e turísticos (Amaral *et al*., 2004). Além disso, a costa engloba ambientes extremamente produtivos sob o ponto de vista ecológico, sendo áreas de reprodução, crescimento, alimentação e refúgio para inúmeras espécies de crustáceos, aves, moluscos e peixes. Estudos indicam que 70% das espécies potencialmente comercializadas utilizam o refúgio dos estuários em algum estágio de seu desenvolvimento (French, 1997)**.** Portanto, o conhecimento deste ambiente é de grande importância para diversos setores da sociedade.

No Brasil, o cenário se repete. Cerca de 36,5 milhões de brasileiros vivem na zona costeira, com uma densidade demográfica seis vezes maior do que a média nacional (Lopes, 2009), sendo que 13 das nossas 20 maiores cidades estão localizadas a menos de 50 km da costa, com importantes centros urbanos situados ao redor de baías e estuários (Franklin, 2009). Devido a esta realidade, algumas baías e estuários localizados na costa brasileira aparecem como ambientes onde os impactos humanos têm causado um conjunto de mudanças e degradações ambientais, que podem se tornar irreversíveis se não forem gerenciadas adequadamente.

Neste contexto da zona costeira brasileira, a Baía de Camamu (BC) ainda pode ser considerada como bem preservada, pois ainda conserva suas características naturais (Espinheira, 2010).

A BC está situada na porção central do litoral baiano e é a segunda maior baía costeira do estado, com área de aproximadamente 384 km^2(Amorim, 2005). A preservação da Baía de Camamu está associada, em grande parte, à dificuldade de acesso que existiu durante muito tempo nesta região e ao estilo de vida que suas comunidades tradicionais levavam. Entretanto, este cenário vem sofrendo modificações bem relevantes nos últimos anos, com a introdução de novas atividades e/ou intensificação de atividades já existentes, aumentando assim o risco de impactos antrópicos ao seu ecossistema. Dentre as atividades com potencial impactante na região, são listadas: extração de barita na ilha Grande, a indústria do turismo e a exploração de petróleo e gás na plataforma continental adjacente. Em relação a esta última, Amorim (2005) demonstra que a mancha de óleo penetra na BC em caso de vazamento durante as operações. Devido ao potencial de ecoturismo da BC, estava programado em 2001 investimentos públicos da ordem de US$ 2,1 bilhões, que contribuem para a captação de outros US$ 5,4 bilhões (Bahia, 2001).

Apesar da BC ter apresentado um desenvolvimento expressivo nos últimos anos, com a introdução de atividades que possuem um potencial impactante, esta é a região menos conhecida em toda a costa do estado da Bahia (Leão, 2003). A correta gestão dos recursos costeiros deve ser apoiada em ferramentas que possibilitem uma análise precisa dos fenômenos e que permitam a previsão da evolução desses sistemas. Desta forma, para auxiliar o desenvolvimento de forma sustentável da BC é necessário o conhecimento dos padrões da circulação no interior da baía. Uma ferramenta de grande auxílio na gestão ambiental e costeira é a modelagem numérica, por permitir a determinação espaço-temporal de campos de velocidade e de concentração de substâncias. Os modelos para previsão do movimento das águas (quantidade) são denominados “modelos hidrodinâmicos”, enquanto que os modelos de transporte de escalares (qualidade) são comumente chamados de “modelos de dispersão” (Rosman, 2001). A recente evolução na capacidade de cálculo dos computadores de pequeno porte tornou viável a utilização de modelos hidrodinâmicos como ferramentas de apoio à decisão. Por possuírem um custo menor do que os modelos físicos, os modelos numéricos são facilmente adaptáveis a diversas regiões e permitem analisar diversos cenários em um curto espaço de tempo, podendo representar com bons resultados fenômenos físicos, químicos e biológicos, desde que bem calibrados e com condições iniciais e de contorno realísticas. Além disso, uma vez validados, os modelos numéricos podem funcionar como uma importante ferramenta de auxílio no desenvolvimento de estratégias e na avaliação de respostas do ambiente a mudanças, como processos de recuperação, aumento na descarga de efluentes devido ao aumento da população e medidas de controle para poluição das águas (Rocha, 2000).

Segundo Xavier (2002) as principais dificuldades existentes para o bom funcionamento destes modelos residem na insuficiência de dados de campo para sua calibração, como medições de velocidade, levantamentos batimétricos, conhecimento das características dos sedimentos do fundo e estudos de dispersão com a utilização de traçadores. A escassez de dados decorre do alto custo envolvido no levantamento. Os dados que usualmente se obtêm de variáveis ambientais, são séries temporais de valores medidos em poucos pontos distribuídos na área de interesse. Portanto, os dados medidos de fato representam apenas uma pequena fração do todo, e torna-se fundamental dispor-se de ferramentas confiáveis que permitam que tais dados sejam estimados, tanto no espaço quanto no tempo. Desta forma, pode-se estimar a hidrodinâmica para toda a área de interesse através de modelos numéricos matemáticos..

De acordo com Rosman (2001), modelos são ferramentas integradoras, sem os quais não se consegue uma visão da dinâmica dos processos em sistemas ambientais complexos. Portanto, os modelos são ferramentas indispensáveis ao estudo, à gestão e ao gerenciamento de corpos de água naturais, pois permitem integrar informações espacialmente dispersas, interpolar estas informações para regiões nas quais não há medições, ajudar a interpretação de medições feitas em estações pontuais, propiciar entendimento da dinâmica de processos, prever situações simulando cenários futuros e estudos de caso.

Apesar de ser uma investigação inicial, este trabalho poderá fornecer informações e ferramentas relevantes para a tomada de decisões na BC, auxiliando o desenvolvimento sustentável desta região ainda pouco conhecida. O conhecimento do tempo de renovação das águas da baía é uma ferramenta de extrema importância que pode ser usado em programas de gerenciamento costeiro, uma vez que ele indica indiretamente a escala dos impactos ambientais.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a aplicação da modelagem numérica RMA2 para avaliar a circulação da Baía de Camamu, bem como investigar a capacidade de renovação das águas no seu interior, visando oferecer uma ferramenta de auxilio ao gerenciamento ambiental da região.

3. ÁREA DE ESTUDO

A BC situa-se na porção central do litoral baiano, na região conhecida como costa do dendê (Figura 1). A BC abriga em seu interior um rico ecossistema estuarino, com manguezais de

grande potencial pesqueiro, restingas, Mata Atlântica e inúmeras ilhas. O entorno da baía é de extrema importância ecológica por apresentar pradarias de algas e recifes coralinos, que enriquecem o ambiente marinho a partir do aporte de material orgânico. Ao redor deste corpo hídrico estão instaladas as sedes dos municípios de Ituberá, Igrapiúna, Camamu e Maraú.

A região é possuidora de reservas minerais de manganês, argila, areia, gipsita, ilmenita, rutilo zirconita, cianita e também de minerais energéticos, como: petróleo, gás e turfa. Na década de 50 do século xx, dá-se inicio a extração de barita na ilha Grande no município de Camamu. Esse empreendimento foi responsável por 32% da produção nacional de barita beneficiada (Bahia, 2001). Recentemente foram concedidos 18 blocos para exploração de petróleo e gás na plataforma continental adjacente à BC, sendo 6 blocos localizados em águas rasas (ANP, 2005).

As baías normalmente abrigam vários subsistemas estuarinos à saída dos cursos fluviais afluentes, sendo chamadas de sistemas estuarinos, como proposto inicialmente por Pritchard (1952). Os principais rios, cujas descargas fluviais tornam a Baía de Camamu (BC) um sistema estuarino, são o Serinhaém, Igrapiúna, Sorojó e Maraú, com suas bacias de drenagem localizadas na porção norte, central e sul da baía, respectivamente (Figura 2).

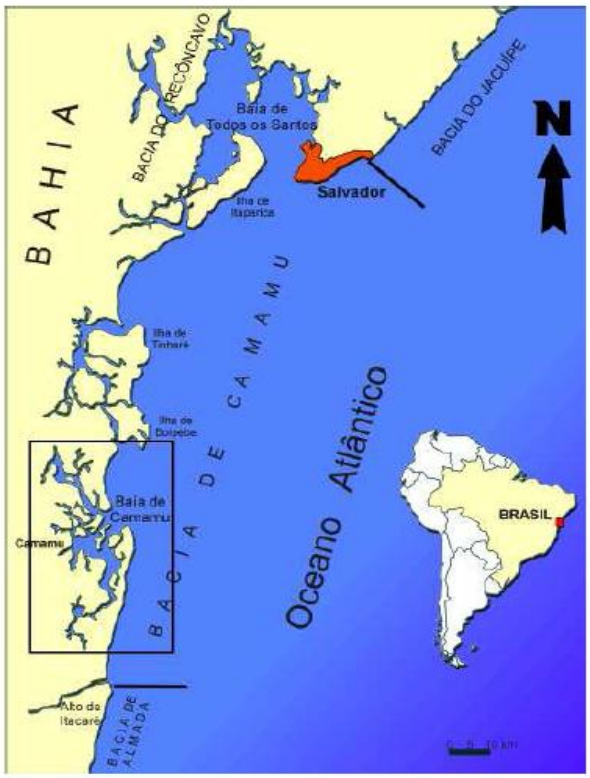

Figura 1: Mapa de localização da baía de Camamu. Fonte: Amorim (2005).

A comunicação da BC com a região costeira ocorre através da abertura entre a Ponta do Mutá e a Ponta do Apaga-fogo, com cerca de 6 km de largura (Figura 2). A BC possui

profundidade média de 5 m e uma área inundável de 383,67 km^2, sendo 44% de manguezal. A topografia da BC é bastante irregular. Em sua entrada pode ser observado um canal principal com profundidade média de 15 m que se estende em direção ao rio Maraú (Figura 4).

O estuário do rio Maraú possui uma área inundável de 119,39 km^2, dos quais 43% são áreas de manguezal (Figura 2). A profundidade média deste sistema é de 6,2 m, com profundidade máxima de 37 m no canal principal. Na margem esquerda da entrada da baía existem diversas feições com profundidades inferiores a três metros, que se estendem em direção à porção central, onde se observa um canal com profundidade máxima de 20 m alinhado à ilha Grande (Figura 4).A porção central da BC, de acordo com Amorim (2005), possui uma área de 158,26 km^2, sendo 39% de manguezal (Figura 2). A profundidade média nesta região é de 3,3 m, sendo que os rios Igrapiúna, Pinaré e Sorojó não possuem profundidades superiores a 7 m (Figura 4). Segundo Amorim (2005), o estuário do rio Serinhaém, localizado na porção norte da baía, possui uma área de 106 km^2, com 48% deste total constituído de manguezal (Figura 2). A profundidade média nesta região é de 7,3 m e na margem direita do rio pode ser observado um pronunciado canal, com profundidade máxima de 25,2 m, que se estende em praticamente toda a sua extensão (Figura 4).

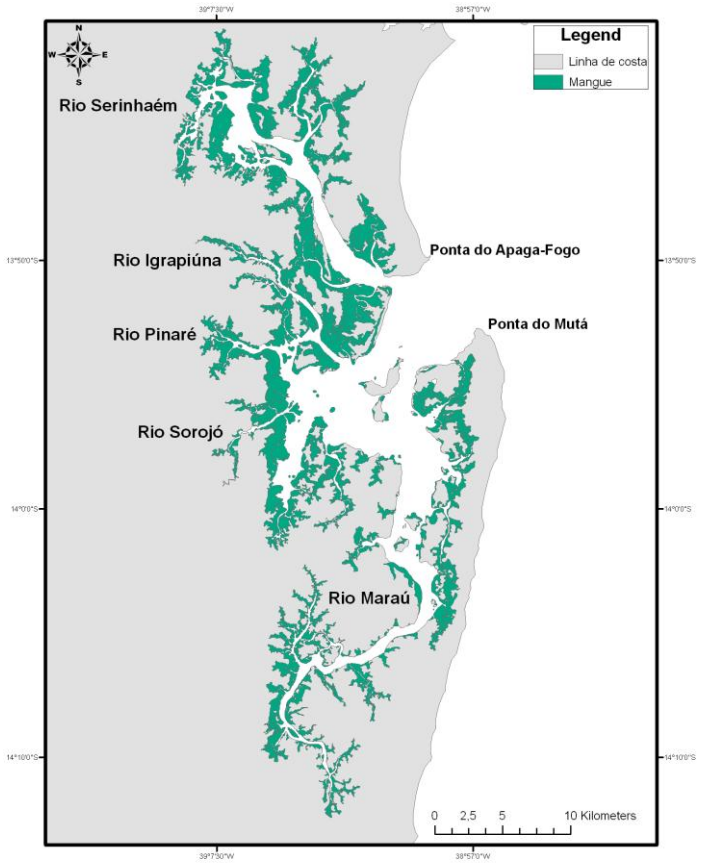

Figura 2: Mapa da BC, com a localização dos principais rios.

As variações do nível do mar observadas por Amorim (2005) apontam a BC como um sistema forçado por regime de micromaré em situação de quadratura (Hmax=189 cm) e por mesomaré em situação de sizígia (Hmax=247 cm), com regime semi-diurno (N_f[1] = 0,10). As marés astronômicas explicam 98% da variância do nível do mar.

O clima é predominantemente quente e úmido com temperatura média anual de 24°C. As oscilações durante o ano são pequenas, com temperaturas máximas de 26°C e mínimas de 20°C. A umidade relativa do ar é elevada, sendo a media anual da ordem de 75 a 85%. O período chuvoso se estende de março a julho, e o seco de agosto a fevereiro. A precipitação media anual é de 2570 mm (Amorim, 2005).

4. METODOLOGIA

A fim de cumprir o objetivo proposto, este trabalho foi realizado em 2 etapas: Levantamento de dados e Modelagem Numérica.

4.1 LEVANTAMENTOS DE DADOS

Dados Morfológicos e Geometria dos canais

A partir de imagem Landsat 7, com resolução espacial de 15 m, obtidas gratuitamente da NASA (http://landsat.gsfc.nasa.gov/), foi possível executar a vetorização e confecção do mapa digital da linha de costa da Baía de Camamu, bem como o mapeamento das características morfológicas (canais, margens, deltas e mangues). O mapeamento preciso dessas áreas é um fator importante na modelagem hidrodinâmica da zona costeira, visto que a rugosidade do fundo é um dos parâmetros básicos para a calibração do modelo e difere entre cada tipo de ambiente (canais, margens, bancos e mangues). Todo o banco de dados foi georeferenciado no sistema de projeção UTM com datum horizontal WGS – 1984.

Dados Batimétricos

As características batimétricas da BC e da plataforma continental adjacente foram obtidas a partir das cartas náuticas número 1100 e 1131 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil. Nas regiões não contempladas pelas cartas náuticas da DHN, foram utilizados os levantamentos batimétricos realizados pela El Paso Óleo e Gás do Brasil Ltda no ano de 2001, totalizando 6271 pontos batimétricos.

[1] Número de Forma expressa a importância relativa entre os principais componentes diurnos (K1 e O1) e semi-diurnos (M2 e S2) da maré, podendo classificar o regime de maré de determinada região. O N_f é obtido pela fórmula: (K1+O1)/(M2+S2).

Devido à complexidade em se obter a batimetria das planícies de mangue, optou-se por obter essas elevações por meio de uma aproximação numérica (Figura 3), seguindo a metodologia desenvolvida por Franklin (2009). Sendo assim, foi adotado um talude uniforme, partindo das regiões mais altas dessas áreas de inundação (cota de 2,4 m referente ao nível médio da preamar de sizígia) para as regiões mais baixas onde havia dados batimétricos disponíveis. Em alguns locais foram adaptados micro canais de escoamento com profundidade correspondente ao menor nível da baixa-mar observado nos dados de maré local (-0,3m). Os pequenos canais de maré são feições comuns a estas áreas e necessários para garantir o escoamento de água em regime uniforme nessas regiões. Com base neste conjunto de dados batimétricos e de linhas de costa, foi construído o modelo digital do terreno da BC (Figura 4).

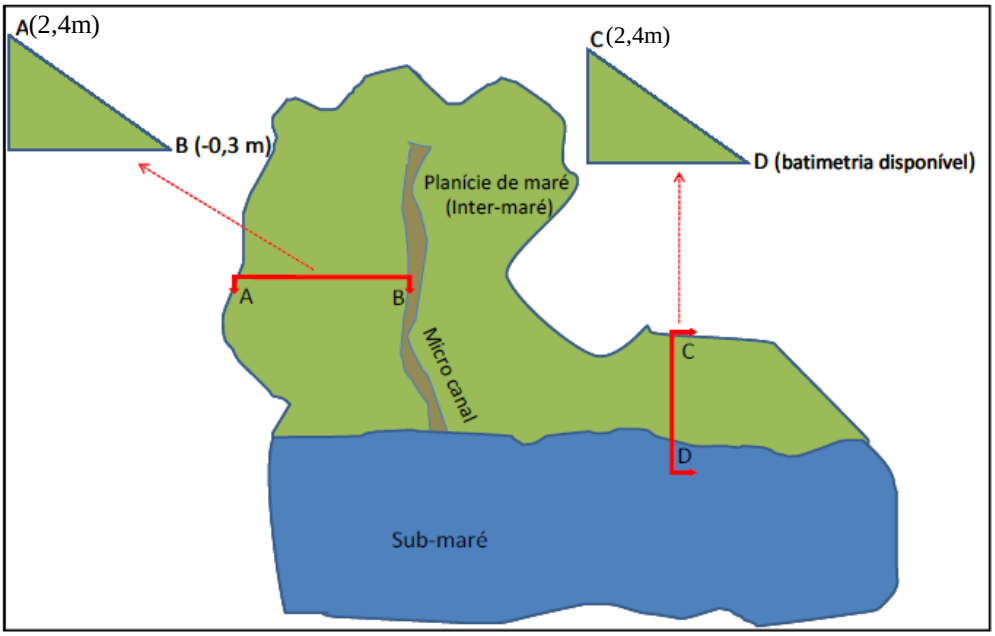

Figura 3: Esquema de aproximação batimétrica das áreas de intermareais. Estão indicados pelos perfis AB e CD os gradientes batimétricos aplicados do mangue para o micro canal de maré e a zona de sub-maré na baía, respectivamente. Adaptado de Franklin (2009).

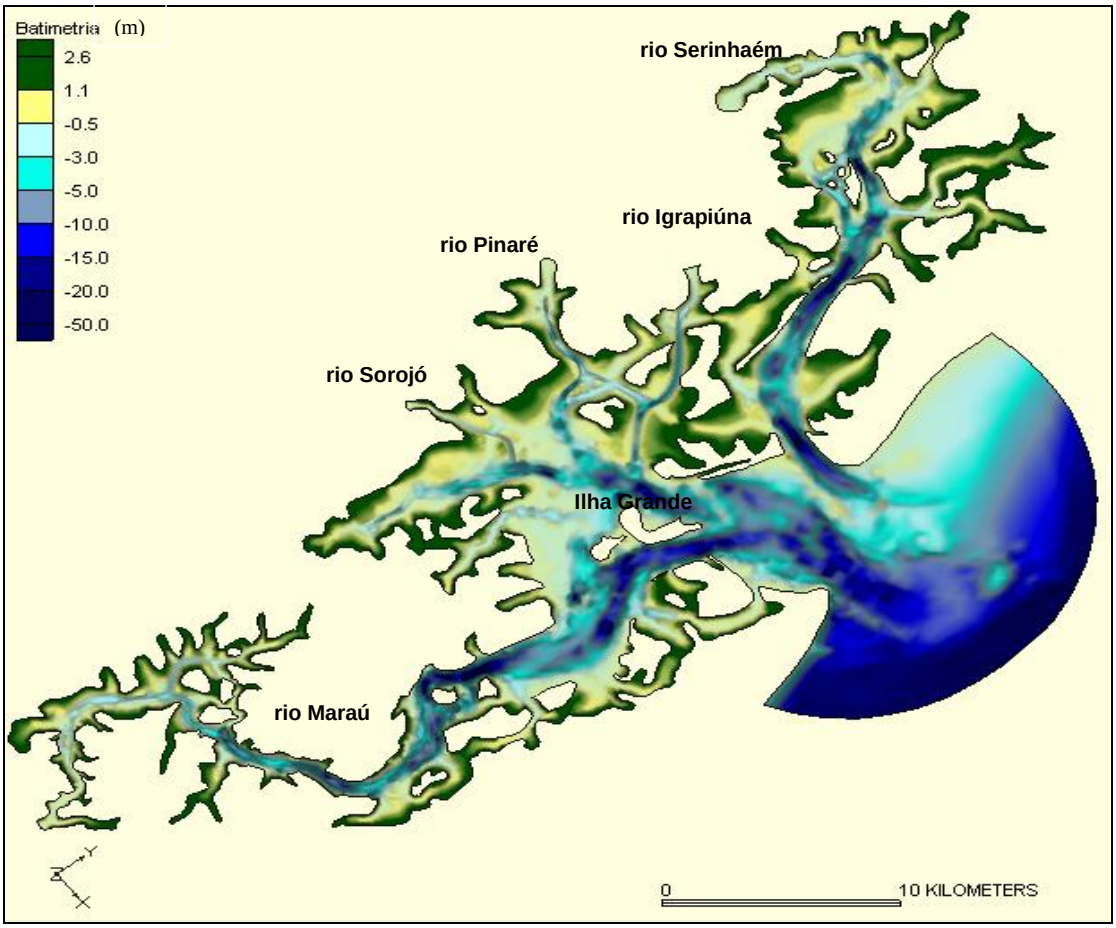

Figura 4: Modelo digital do terreno em metros.

Dados Meteoceanográficos

Maré oceânica

A maré oceânica (Figura 5) utilizada para forçar o modelo no contorno aberto foi restituída a partir das constantes harmônicas da maré de uma estação oceânica localizada a 70 km ao norte da BC. Para este fim foi utilizada a rotina T_Tide (Pawlowicz *et al.*,2002) em ambiente MATLAB. A condição de contorno oceânica foi obtida entre o dia 23 de junho de 2005 até 22 de julho de 2005, englobando os dois ciclos de quadratura e sizígia, e cobrindo o mesmo período dos dados (maré e correntes) observados na BC por Amorim (2005).

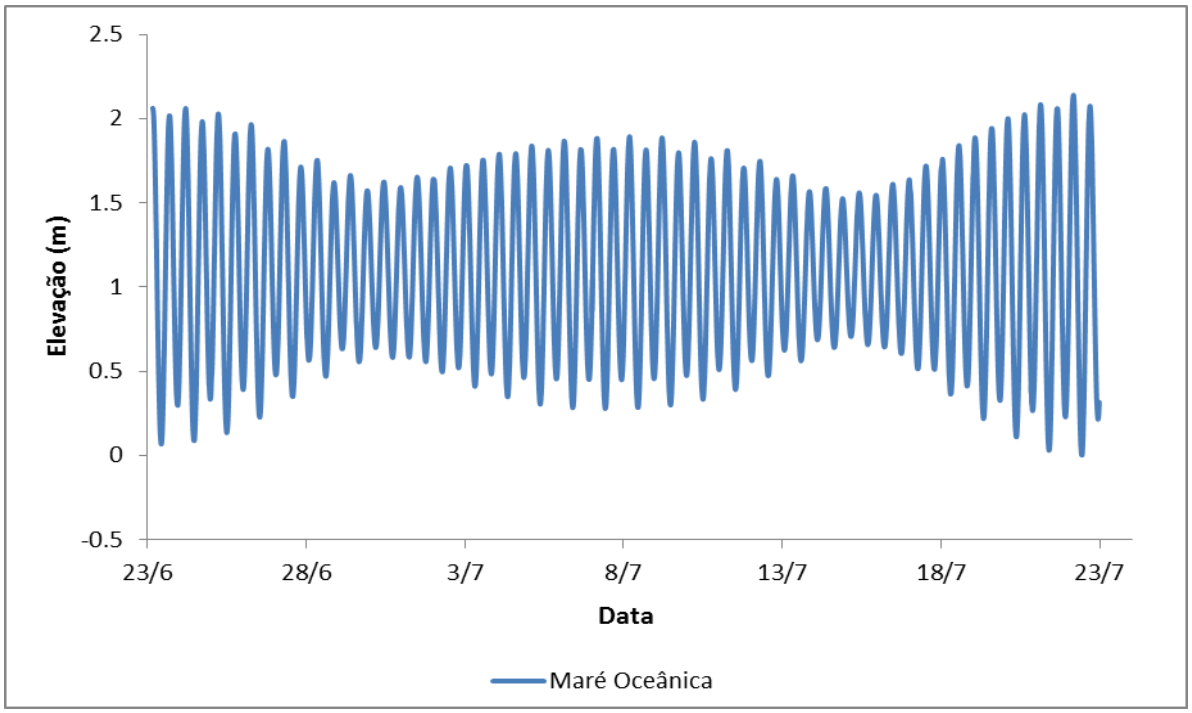

Figura 5: Série de maré oceânica utilizada para forçar a circulação de água do modelo hidrodinâmico da BC.

Maré na Baía de Camamu

Os dados de elevação do nível do mar foram coletados a partir de um sensor de pressão instalado no cais da companhia Baroid, na Ilha Grande (Figura 6). Os dados foram ajustados ao nível médio do mar da BC (1.1m) estabelecido pela DHN.

Como os dados de elevação observados na BC são a soma da maré astronômica com a maré meteorológica, foi feita a restituição da maré astronômica a partir das constantes harmônicas, utilizando a rotina T_Tide (Pawlowicz *et al.*,2002) em ambiente MATLAB, com o objetivo de eliminar os efeitos meteorológicos (Figura 7). A retirada dos efeitos meteorológicos da série de elevação é essencial para a posterior comparação entre os dados simulados e observados, já que o modelo será forçado apenas com a maré astronômica.

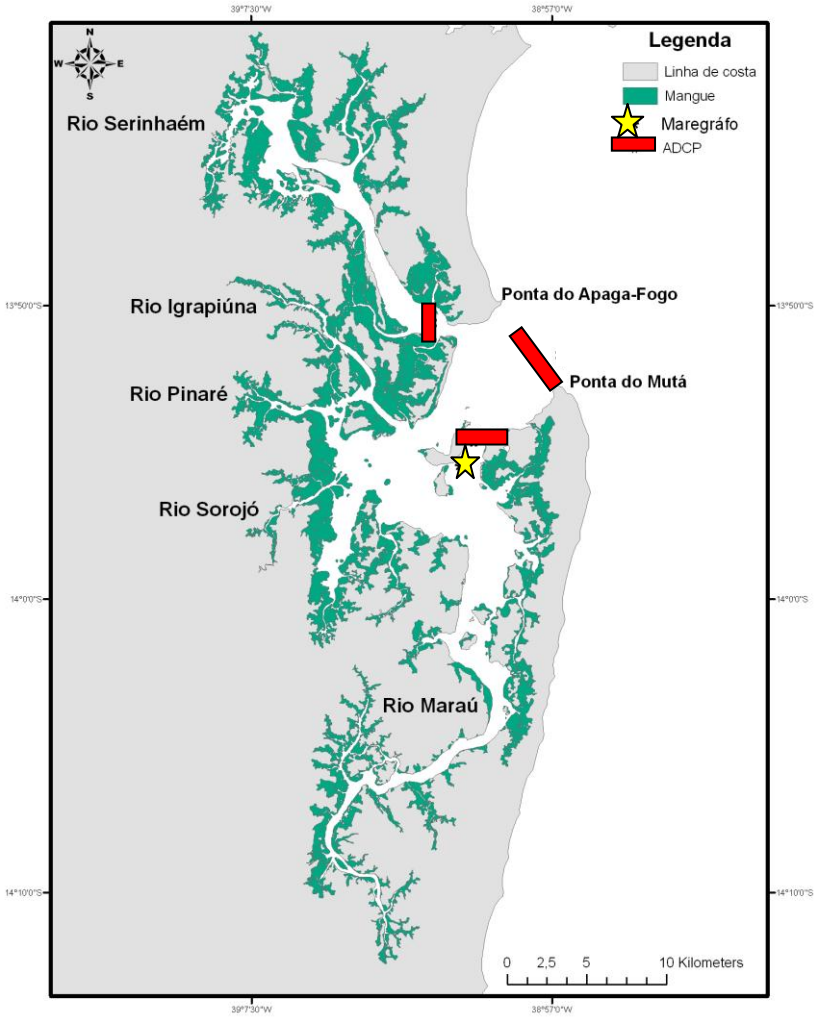

Figura 6: Mapa de localização dos equipamentos para coleta de dados oceanográficos. Adaptado de Amorim(2005).

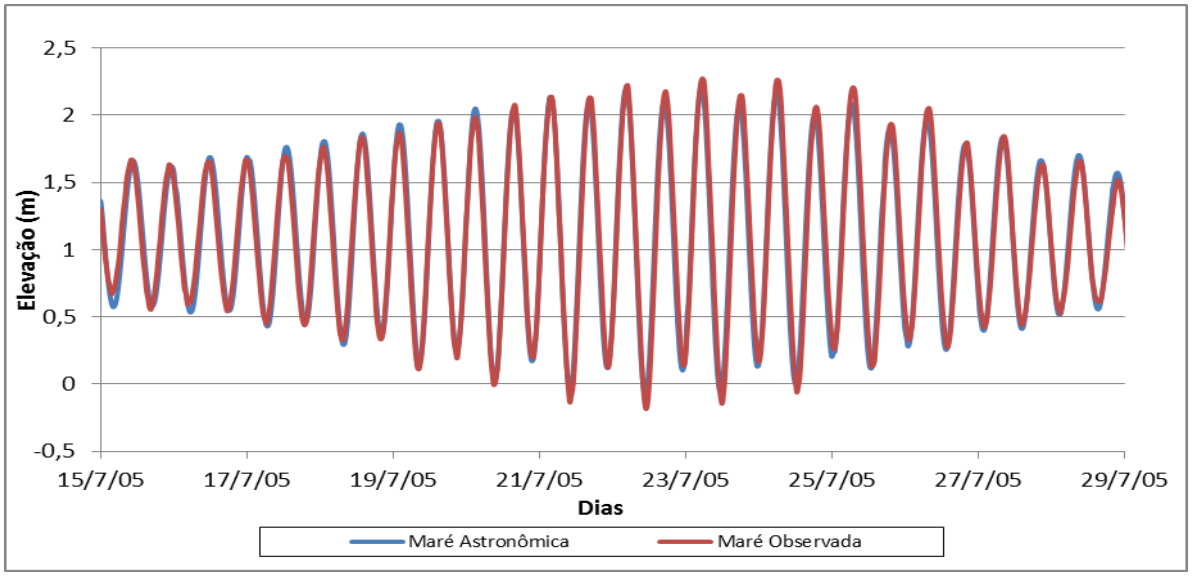

Figura 7: Série de maré observada e da maré astronômica no interior da BC.

Campo de Correntes

Amorim (2005) registrou a variação temporal da intensidade e direção média das correntes através de perfilagens horárias com um ADCP bottom-track ao longo de três seções pré-determinadas na Barra do Mutá, rio Serinhaém e rio Maraú (Figura 6), durante um ciclo completo de maré (13 horas) e em situações de maré de quadratura e sizígia. A Tabela 1 demonstra um resumo sobre a coleta dos dados de correntes na BC.

O perfilador acústico utilizado foi um ADCP da marca *RD Instruments*, modelo *Workhorse 600 kHz*, configurado para registrar a estrutura vertical das correntes em células de 1 m. A velocidade de cruzeiro do barco adotada para as perfilagens ao longo de cada seção não ultrapassou 2 m s^{-1}. Os dados de correntes obtidos foram processados com o uso de uma rotina em ambiente MATLAB (Genz et al., 2005).

Local	Data	Situação da maré
Ponta do Mutá	20/07/2005 - 09:00h às 22:00h 27/07/2005 - 02:00h às 15:00h	Sizígia Quadratura
rio Maraú	21/07/2005 - 10:00h às 23:00h 29/07/2005 - 04:30h às 17:30h	Sizígia Quadratura
rio Serinhaém	22/07/2005 - 11:00h às 24:00h 28/07/2005 - 03:00h às 16:00h	Sizígia Quadratura

Tabela 1: Resumo do monitoramento das correntes com o ADCP. Adaptado de Amorim (2005).

Características Fluviométricas

De acordo com Amorim (2005), o aporte fluvial na BC corresponde à drenagem de uma área de aproximadamente 1.451,44 km^2, sendo que a descarga ocorre principalmente a partir dos rios Serinhaém, localizado na porção norte da baía, Igrapiúna, Sorojó e Pinaré, localizados na porção central, e Maraú, localizado na porção sul (Figura 2). A tabela 2 apresenta as descargas médias dos principais rios afluentes à BC para a estação seca e chuvosa.

PORÇÃO	RIO	VAZÃO EST. SECA (m^3/s)	VAZÃO EST. CHUVOSA (m^3/s)
Norte	Serinhaém	16,52	18,08
Central	Igrapiúna Pinaré Sorojó	7,24 3,49 12,59	8,01 3,84 13,66
Sul	Maraú	11,2	12,13
Descarga Total na BC	-	51,04	55,72

Tabela 1: Descargas médias dos principais rios afluentes à BC. Adaptado de Amorim (2005).

Para forçar o modelo nas caudais fluviais foram utilizados os dados de vazão dos rios na estação chuvosa. A justificativa para a escolha da estação chuvosa está relacionada com a validação dos resultados, pois os dados de maré e velocidade das correntes foram coletados durante o período chuvoso.

Dados termohalinos

Neste estudo considerou um cenário idealizado, com condições termohalinas constantes em todo o domínio. Ou seja, será avaliado o comportamento da maré e das correntes de maré em um estuário não estratificado.

Clima de ondas e Dados meteorológicos

Conforme o objetivo deste estudo, a influência das ondas e de dados meteorológicos como o vento e pluviosidade não foram analisados.

4.2 MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica hidrodinâmica da Baía de Camamu foi feita com o modelo numérico RMA2 (Research Management Associates, Version 4.45) (King, 1990). Este modelo hidrodinâmico bi-dimensional usa a forma de Reynolds das equações de Navier-Stokes para calcular variações no nível d'água e correntes integradas na vertical para fluxos subcríticos em condutos livres, sendo, desta forma, desenvolvido para aplicações em corpos d'água bem misturados, onde as variações de correntes ao longo da coluna d'água são desprezíveis (King, 1997). O modelo é capaz de simular a emersão e imersão de áreas de intermaré, podendo computar a hidrodinâmica nos manguezais. Além disso, permite a obtenção de soluções em regime permanente ou variável, com o estabelecimento de condições de fronteira variáveis ao longo do tempo. As soluções são obtidas num determinado número de instantes, nos pontos nodais da malha de elementos finitos. Apresenta como principal limitação a impossibilidade de resolução de escoamentos super-críticos. Esta limitação advém do método numérico empregue na resolução das equações de continuidade e conservação da quantidade de movimento.

A discretização espacial de domínios de geometria complexa, como baías e estuários, torna-se mais simples no caso de utilização conjunta de diferentes tipos de elementos. O RMA2 apresenta esta possibilidade, permitindo a utilização simultânea de elementos triangulares e quadrangulares de seis e oito nós, respectivamente, numa mesma malha (Froehlich, 2004).

Na resolução das equações, o RMA2 utiliza o método de elementos finitos com a técnica dos resíduos ponderados de Galerkin. As funções de forma são quadráticas para as velocidades e lineares para a profundidade. A integração espacial é efetuada pelo método

de Gauss. As derivadas temporais são discretizadas por uma aproximação de diferenças finitas. O método é totalmente implícito, sendo os sistemas de equações resolvidos pelo método de Newton-Raphson (King, 1997).

O modelo pode ser inicializado com dois tipos diferentes de condições iniciais:

- **Partida a frio**: as elevações da superfície são fornecidas na situação de equilíbrio, sendo as velocidades iniciais nulas.
- **Partida a quente**: utiliza elevações e correntes obtidas numa simulação anterior.

As marés são simuladas como condições de contorno dinâmicas, fornecendo elevações do nível do mar, obtidas ou previstas, para um ou mais nós da grade do modelo. Os fluxos dos rios podem ser introduzidos no modelo como condições de contorno estáticas ou dinâmicas, permitindo ao modelo mostrar as consequências de variações temporais de descargas de água doce.

A construção dos modelos numéricos e as operações de pré e pós-processamento das simulações são realizadas através da interface SMS 8.1 (Surface-water Modeling System) desenvolvida pelo Environmental Modeling Research Laboratoty da Brigham-Young University (King *et al*., 2005).

Para a modelagem da BC com o RMA2 foi construída uma malha de elementos finitos não estruturada com 17253 elementos e 38751 nós, sendo 1539 elementos retangulares nos canais e nas demais regiões 15253 elementos triangulares (Figura 8). A malha foi interpolada sobre o modelo digital do terreno através do método de krigagem (Froehlich, 2004).

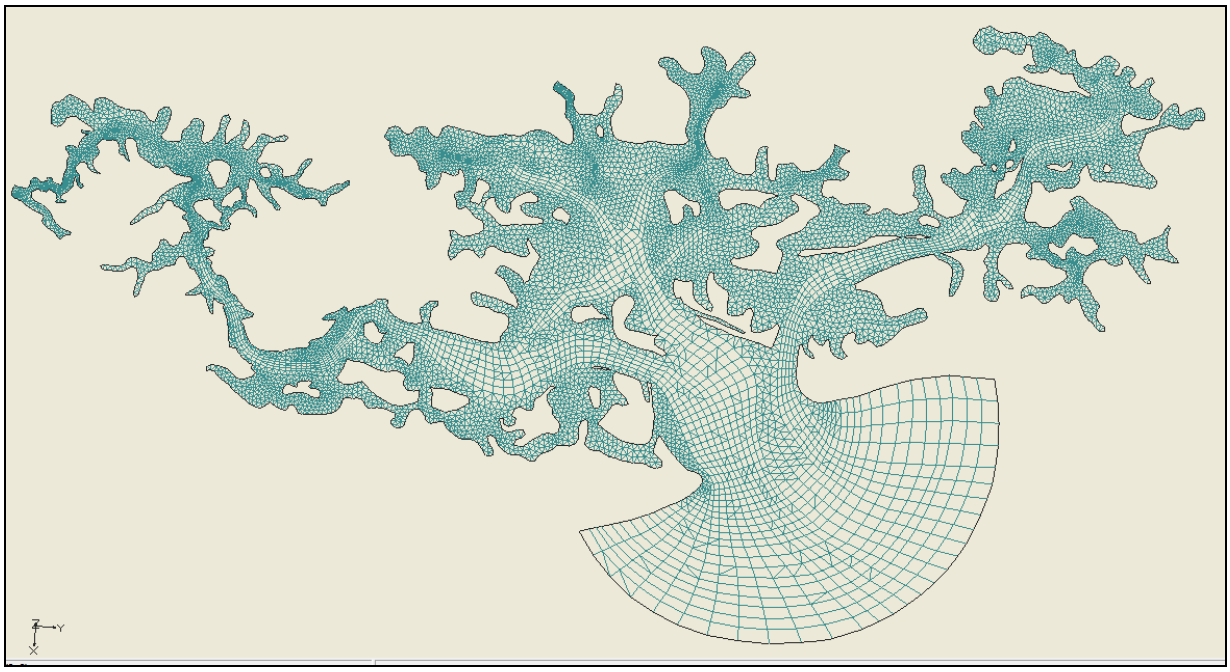

Figura 8: Malha de elementos finitos não estruturada.

Para forçar a circulação do modelo nas simulações de calibração foi utilizada a maré oceânica (Figura 5) e as vazões fluviais (Tabela 2) para o mesmo período dos dados monitorados na BC. Nas simulações o modelo RMA2 foi iniciado partindo de uma condição inicial onde todo o domínio estava inundado. Isso garante a estabilidade inicial do modelo, que após a simulação de 3 ciclos de maré já está "aquecido". O passo de tempo utilizado em todas as simulações foi de 30 minutos, garantindo uma discretização aceitável da escala de tempo dos fenômenos de interesse neste trabalho.

Os parâmetros de calibração do modelo – fator de atrito e viscosidade do fluido – foram definidos de forma a permitir a melhor aproximação possível dos dados observados com os simulados. O modelo hidrodinâmico foi calibrado, comparando-se os resultados das simulações com os dados de correntes e marés previamente coletados na BC. A calibração do modelo hidrodinâmico RMA2 depende da definição de dois parâmetros básicos: a viscosidade turbulenta do fluido, dado em Pa s^{-1}, e da rugosidade do fundo, que é representada pelo número de Manning "*n*" (King *et al*., 2005). A viscosidade turbulenta é essencial para garantir a estabilidade numérica do modelo, controlando as oscilações turbulentas e garantindo uniformidade do escoamento, não afetando de forma significativa os resultados do modelo. O parâmetro de rugosidade de fundo, além de controlar a estabilidade numérica do modelo, tem papel significativo na distribuição de energia dentro do sistema, regulando a magnitude das correntes e alturas de maré simuladas (Franklin, 2009).

A definição dos parâmetros de rugosidade do modelo hidrodinâmico da Baía de Camamu foi baseada em valores padrões para este tipo de ambiente. A partir daí foi realizada uma série de testes com diferentes valores de rugosidade até encontrar o que garantisse o melhor ajuste entre os valores simulados e observados. A viscosidade turbulenta do fluido foi considerada constante em toda a área modelada partindo também do valor médio indicado pelos desenvolvedores do software (King *et al*., 2005). De acordo com Franklin (2009), o melhor valor do parâmetro de viscosidade turbulenta é justamente aquele que garante a estabilidade numérica do modelo, permitindo que ele processe as simulações utilizando os parâmetros de rugosidade já pré-selecionados.

A avaliação do erro dos resultados do modelo em relação aos dados observados foi realizada com base nos seguintes parâmetros:

- **Erro médio percentual absoluto**: este erro reflete, em percentual, o quanto a razão entre os dados observados e simulados esta distante do valor ideal que seria 1. Seu calculo é feito de acordo com:

$$E_m = \left| \left(1 - \frac{observado}{simulado} \right) 100 \right|$$

- **Raíz quadrada do erro quadrado médio (REQ):** é obtido a partir da raiz quadrada da média dos quadrados dos erros entre os valores simulados pelo modelo e os dados observados em campo, sendo calculado da seguinte forma:

$$REQ = \left[\frac{1}{n} \sum_{i}^{n} (simulado - observado)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

- **Coeficiente de correlação do momento do produto Pearson:** índice adimensional situado entre -1,0 e 1,0, que reflete a extensão de uma relação linear entre dois conjuntos de dados de acordo com a equação:

$$C_{os} = \frac{\sum (o - \bar{o})(s - \bar{s})}{\sqrt{\sum (o - \bar{o})^2 \sum (s - s)^2}},$$

onde *o* e *s* são os dados observados e simulados, respectivamente, enquanto $\bar{o}$ e $\bar{s}$ são valores médios dos dados observados e simulados.

Com o modelo já calibrado, foi realizada uma simulação de 30 dias, correspondendo ao período de 23 de junho até 22 de julho de 2005, cobrindo as duas fases de sizígia (lua nova e cheia) e quadratura (lua crescente e minguante), para investigar a capacidade de renovação das águas na BC. Esta simulação foi forçada por maré astronômica na fronteira oceânica (Figura 5), e pela vazão fluvial nos contornos fechados (ver Tabela 2).

As soluções hidrodinâmicas foram utilizadas nas simulações para avaliar a capacidade de renovação das águas da Baía de Camamu. Os cálculos foram realizados utilizando o modelo RMA4, que calcula o transporte médio de substâncias na coluna d'água através de computações do transporte advectivo e difusivo (Letter, 2003). Foi considerada a necessidade da troca de 100% do volume de água, ou a completa diluição do traçador. Como pode ocorrer da renovação a 100% tender ao infinito em algumas situações onde a fração residual do traçador demora muito tempo para ser eliminada, então também foi calculado o tempo para atingir 63% da renovação. Com a concentração a 37% (equivalente a 1/e, sendo e ≈ 1,278) pode se ter uma idéia mais realista da capacidade de renovação considerando que a maior parte da concentração do traçador é eliminada nesse intervalo de meia vida (Abdelrhman, 2002; Jouon et al., 2006).

As simulações partiram de uma concentração inicial homogênea (100 %) em todo o corpo d'água. Nas condições de contorno aberta e fechadas a concentração foi igual a zero. A

partir daí, foi possível avaliar, ao longo de uma simulação de 30 dias, qual o potencial de redução desta concentração inicial decorrente de mecanismos de troca com as águas provenientes da plataforma continental (condição de contorno aberta) e dos rios afluentes (condição de contorno fechada). As regiões da baía com tempo de renovação superior a 30 dias tiveram seu tempo de renovação calculado com base na projeção da curva de decaimento, como sugerido por Monsen et al. (2002). Desta forma, o que se objetivou por meio desta análise foi determinar quais regiões eram mais, ou menos eficientes, nas trocas de água, ao longo do corpo d'água estuarino.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

A calibração do modelo hidrodinâmico partiu inicialmente do ajuste do sinal da maré simulada à maré astronômica da estação marégrafica da ilha Grande. Em seguida, com a maré calibrada, foram realizados diversos testes até encontrar os parâmetros de calibração que melhor ajustassem os resultados do modelo com os dados de correntes observados em campo. Com base nesses testes foram selecionados os seguintes valores de viscosidade turbulenta e rugosidade:

- Áreas de intermaré: E = 6000 e n = 0,035
- Áreas de bancos arenosos: E = 6000 e n = 0,030
- Áreas de margem do canais: E = 6000 e n = 0,028
- Áreas de canais: E = 6000 e n = 0,027

A seguir serão apresentados os resultados da análise dos dados de campo referentes ao período de 20 à 29/07/2005, bem como a sua comparação com os resultados hidrodinâmicos simulados, com intuito de verificar o grau de confiabilidade da resposta fornecida pelo modelo. A Figura 9 demonstra a localização da estação marégrafica e das seções de monitoramento com ADCP de acordo com Amorim (2005), bem como a posição dos pontos nas seçôes transversais com ADCP onde foram retirados os dados de velocidade das correntes para comparação com as velocidades simuladas pelo modelo.

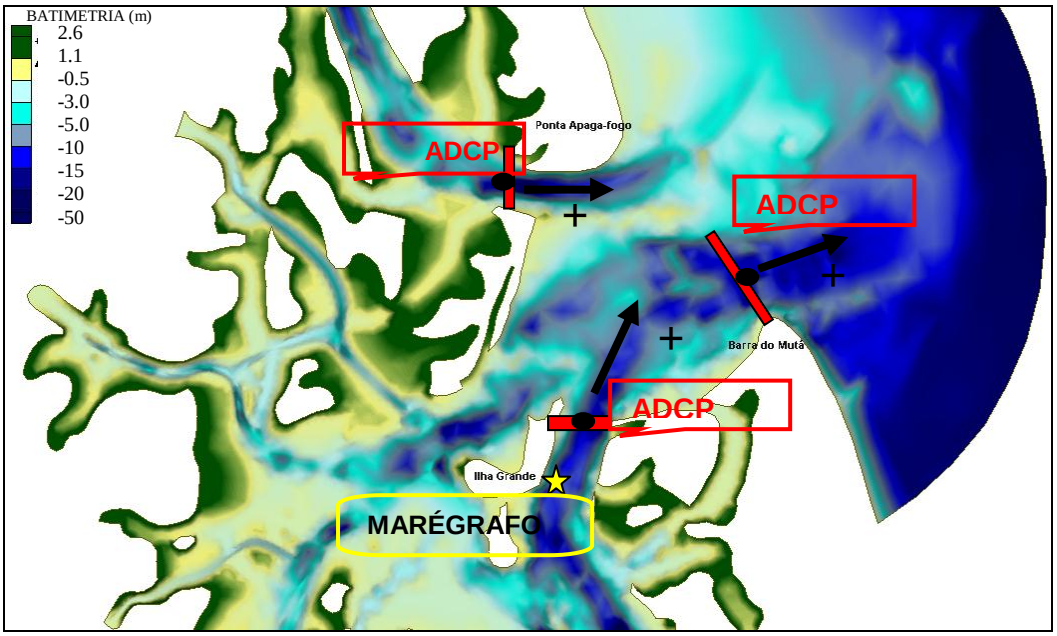

Figura 9: Local de monitoramento de fluxo e nível d`água na BC. O sentido positivo do fluxo está indicado pela seta preta. Adaptado de Amorim(2005).

MARÉ

A maré na BC tem característica semi-diurna (ciclo de 12 h), sendo a maré astronômica responsável por 98% da oscilação do sinal de maré na BC. A maior altura de maré registrada na BC entre dezembro de 2004 a julho de 2005 foi de 2,66 m em maré de sizígia equinocial (Amorim, 2005). O padrão de maré semi-diurna foi reproduzido com sucesso pelo modelo RMA2 (Figura 10), sendo que as maiores diferenças (resíduos) ocorrem durante a fase de sizígia.

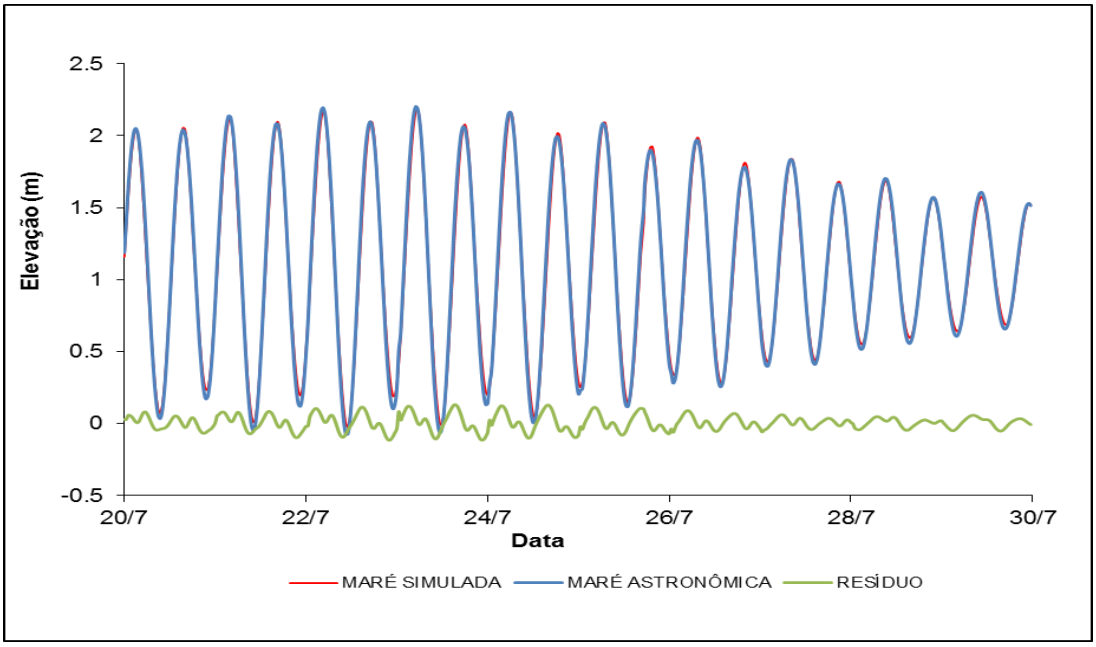

Figura 10: Séries das marés astronômicas e simuladas na estação marégrafica da ilha Grande em Julho de 2005, juntamente com o resíduo representando a diferença entre as séries.

Ao se comparar a maré simulada e astronômica, observa-se um erro médio de 6,7%. A raíz do erro quadrado médio (REQ) foi de 0,05 m. O ajuste linear, dos dados observados contra os simulados (Figura 11), apresentou um coeficiente de correlação de 99%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 12, indica que a maior parte dos dados (80%) apresentou erros inferiores a 2%.

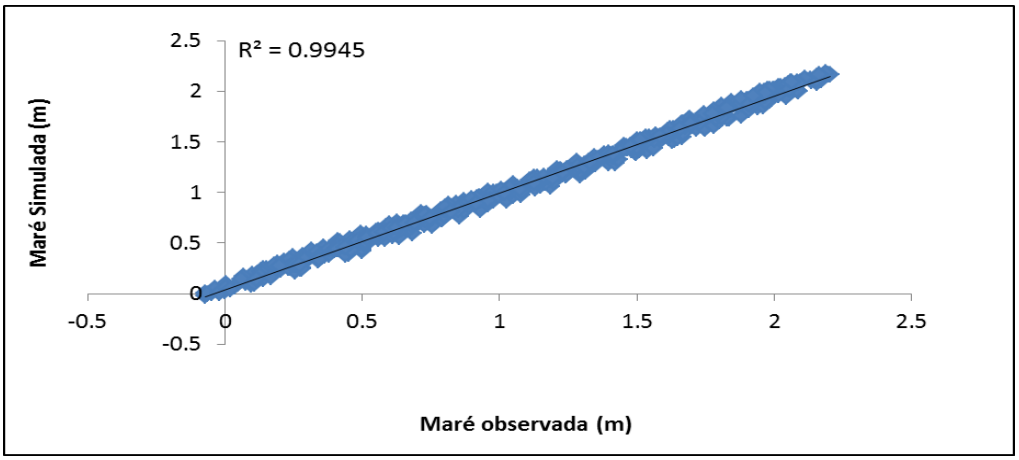

Figura 11: Ajuste linear entre os dados de marés simuladas e observadas na Baía de Camamu de 20 a 29 de Julho de 2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

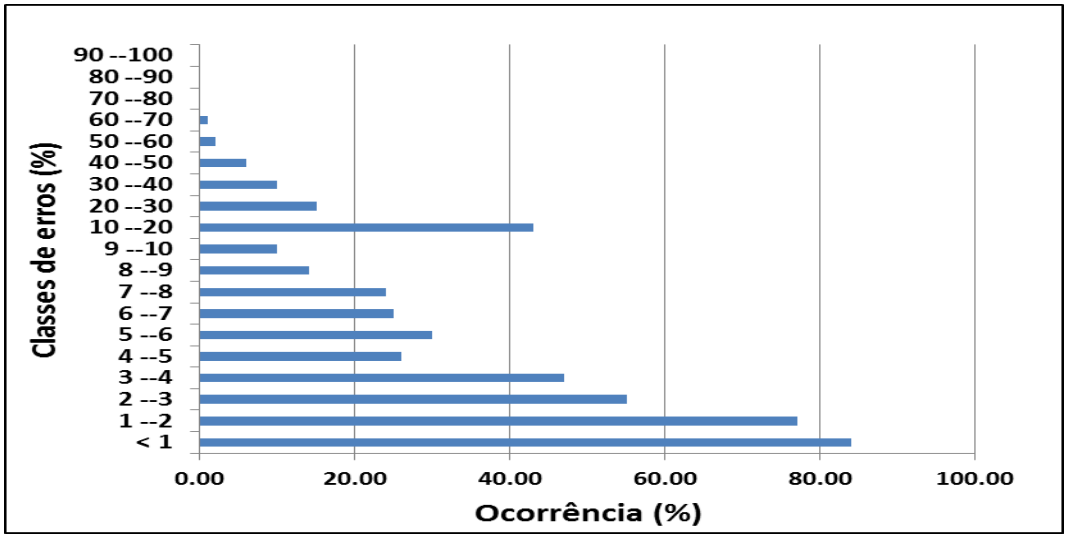

Figura 12: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados de 20 a 29 de Julho de 2005.

DESCARGAS E CORRENTES

Os dados de correntes e descargas observados em campo são apresentados a seguir, bem como a sua comparação com os respectivos valores simulados. O sinal positivo nos dados indica fluxo de vazante (em direção ao oceano). Os valores médios de intensidade de correntes foram definidos para um ponto mais profundo do canal sobre as seções de medição. A Figura 9 indica as posições de referência para o sinal do fluxo e as localizações

dos pontos onde os dados de correntes foram retirados das seções de monitoramento com ADCP(Amorim, 2005).

Barra do Mutá

Análise na situação de sizígia

- **Descargas - 20/07/05**

As vazões observadas na Barra do Mutá em 20/07/2005 estão plotadas na Figura 13, junto com as vazões simuladas e a maré simulada indicando o sentindo da vazão. Observou-se uma vazão máxima de 18,3 x 10^3 m^3 s^{-1} durante a meia-maré de vazante. Nota-se que o modelo superestimou os valores máximos de vazão de enchente e vazante, e ao contrário do padrão observado, reproduziu vazões de enchente mais intensas do que as vazões de vazante. Tal fato pode ser explicado pela desigualdade diurna da maré, onde se verifica que existe uma diferença de altura entre duas baixa-mares consecutivas. Como a altura associada a enchente é maior do que aquela da vazante, a descarga tem que ser maior na enchente dado que a assimetria foi desprezível. Observa-se que ocorre uma diferença de fase significativa no instante de estofa de baixa-mar e no momento de descarga máxima.

O erro médio do modelo foi de 25%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi de 3,9 x 10^3 m^3 s^{-1} e o coeficiente de correlação foi 89%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 15, indica que a maior parte dos dados (28%) apresentaram erros entre 10 e 20%. O prisma de maré enchente calculado pelo modelo (341,6 x 10^6 m^3) foi 15% maior que o valor observado em campo (296,6 x 10^6 m^3). Para o prisma de vazante o resultado do modelo (309 x 10^6 m^3) superestimou em 14,5% o valor observado (269,6 x 10^6 m^3).

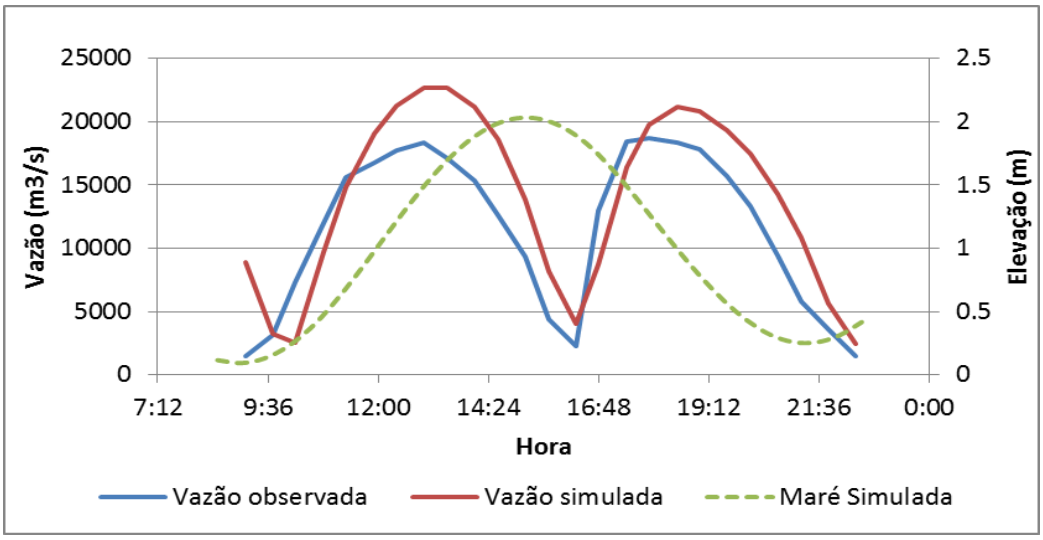

Figura 13: Vazões observadas e simuladas na Barra do Mutá em 20/07/2005. No eixo vertical secundário está plotada a maré simulada na Barra do Mutá, indicando o sentido das vazões.

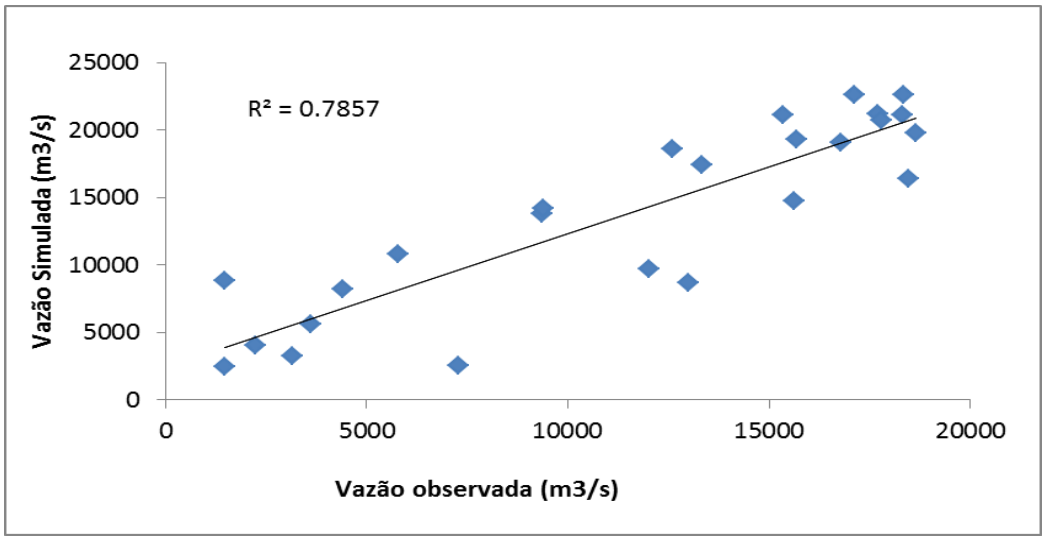

Figura 14: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas na Barra do Mutá em 20/07/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

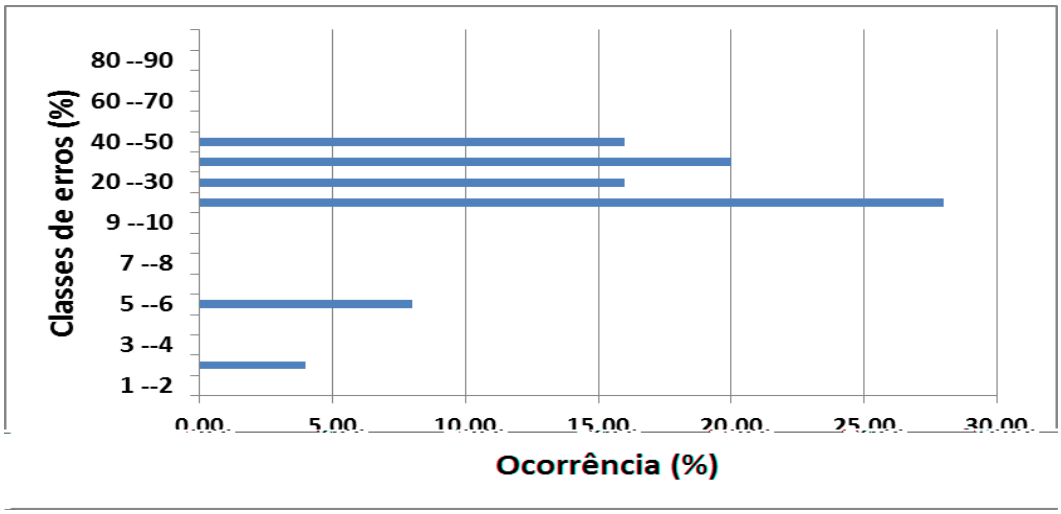

Figura 15: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 20/07/2005.

- **Correntes - 20/07/05**

O campo de velocidades de corrente no instante de vazão máxima (Figura 16) apresentou magnitudes de 0,1 a 0,8 m s^{-1} em direção ao oceano. O campo de velocidades residuais (Figura 16) mostra uma preferência do fluxo de enchente, principalmente na região central, com intensidade variando de -0,05 a -0.1 m s^{-1} em grande parte da coluna d'água. O fluxo residual de vazante ocorre preferencialmente nas laterais, onde são observadas velocidades máximas de 0,1 m s^{-1}. Devido a este cisalhamento horizontal, a velocidade residual em toda a seção foi preferencialmente de enchente (-0,007 m s^{-1}), associada a um transporte de -244 m^3 s^{-1}.

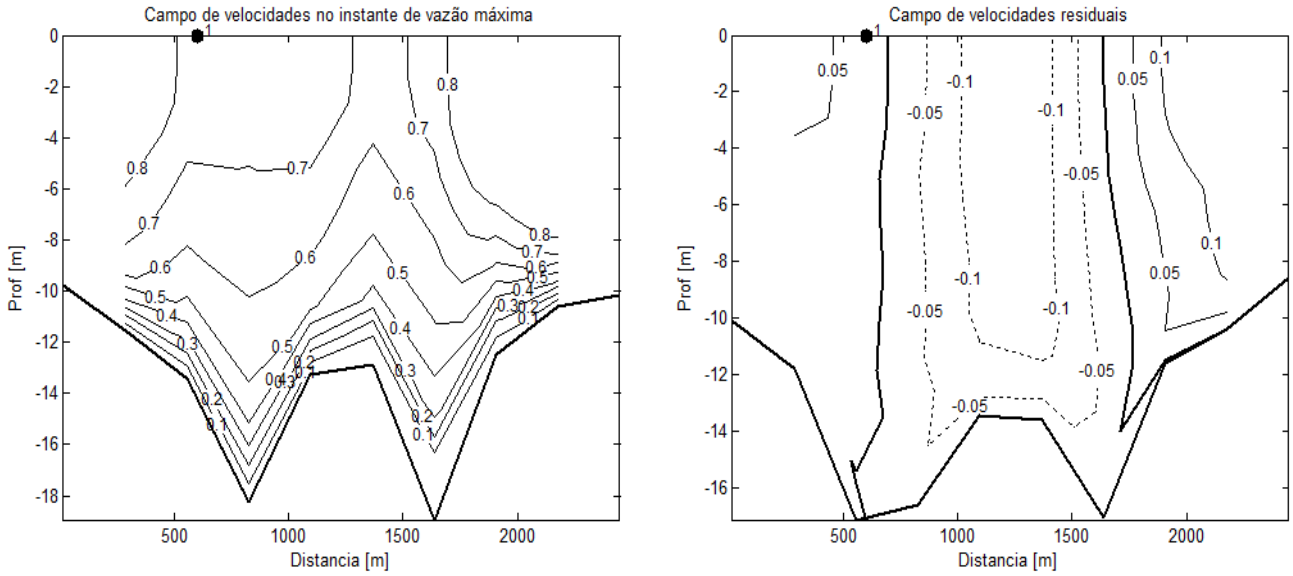

Figura 16: Campo de correntes (m s^{-1}) do perfil transversal do canal na Barra do Mutá (Figura 9), para o ciclo de maré monitorado em 20/07/2005. O perfil batimétrico da seção (linha preta grossa) tem origem na margem esquerda do canal monitorado. O ponto 1 no gráfico indica o local onde foram extraídos os dados de velocidade média na vertical da seção de ADCP.

As velocidades médias na vertical das correntes retiradas no ponto 1 da seção de monitoramento de ADCP na Barra do Mutá em 20/07/2005 estão plotadas na Figura 17, juntamente com a maré simulada no local. A velocidade máxima registrada foi de 0,63 m s^{-1} durante a meia-maré de vazante. O modelo foi capaz de reproduzir os picos de enchente, porém a velocidade máxima do pico de vazante foi 0,08 m s^{-1} superior à observada (Figura 17). O comportamento observado com velocidades de vazantes mais intensas também foi seguido pelo modelo. Nota-se que o modelo foi incapaz de reproduzir a variabilidade de alta frequência.

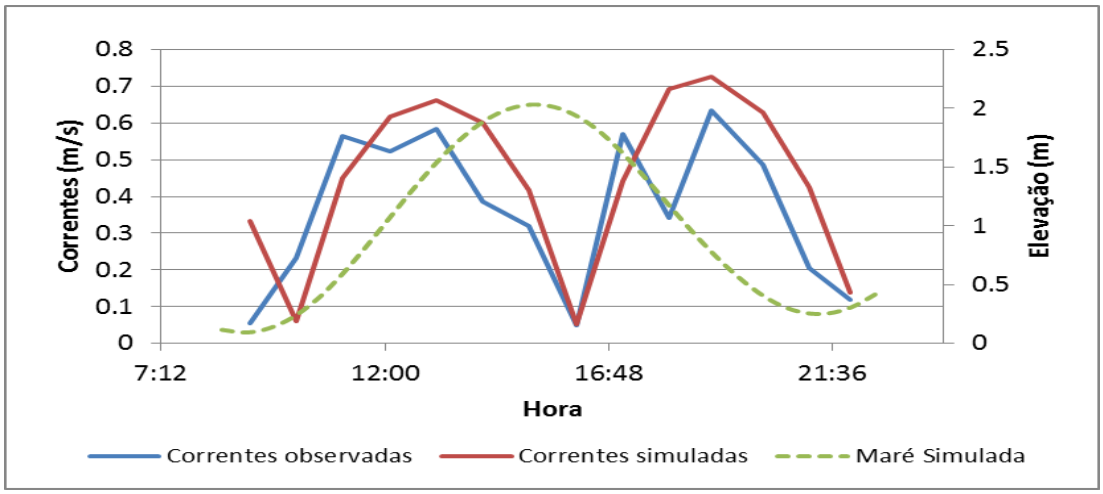

Figura 17: Velocidades das correntes observadas vs simuladas na Barra do Mutá em 20/07/2005.

O padrão de velocidades simuladas está de acordo com observações realizadas por Amorim (2009), onde se verifica que a coluna de água permanece praticamente em repouso cerca

de meia hora após as estofas. As correntes calculadas pelo modelo estão em fase com os dados observados na estofa de preamar e no instante de máximas correntes de enchente. No entanto, observa-se que ocorre uma diferença de fase significativa na estofa de baixa-mar entre os dados simulados e observados. Esta defasagem pode ter relação com a dificuldade do ADCP em registrar corretamente correntes fracas, pois os resultados do modelo estão em fase com o sinal da maré.

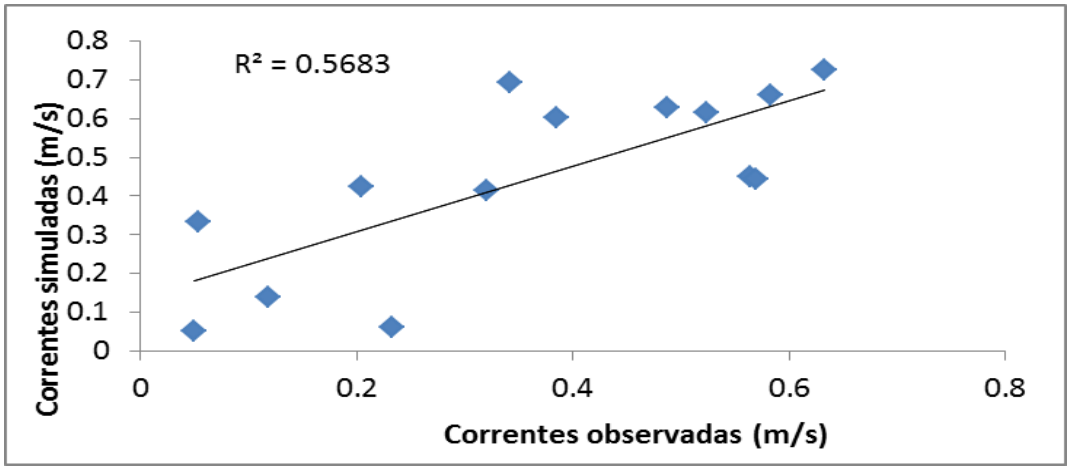

Figura 18: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas na Barra do Mutá em 20/07/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

O erro médio foi de 29%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi 0,17 m s^{-1} e o coeficiente de correlação foi de 75%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 19, indica que a maior parte dos dados (28%) apresentaram erros entre as faixas de 10 a 20% e de 20 a 30%.

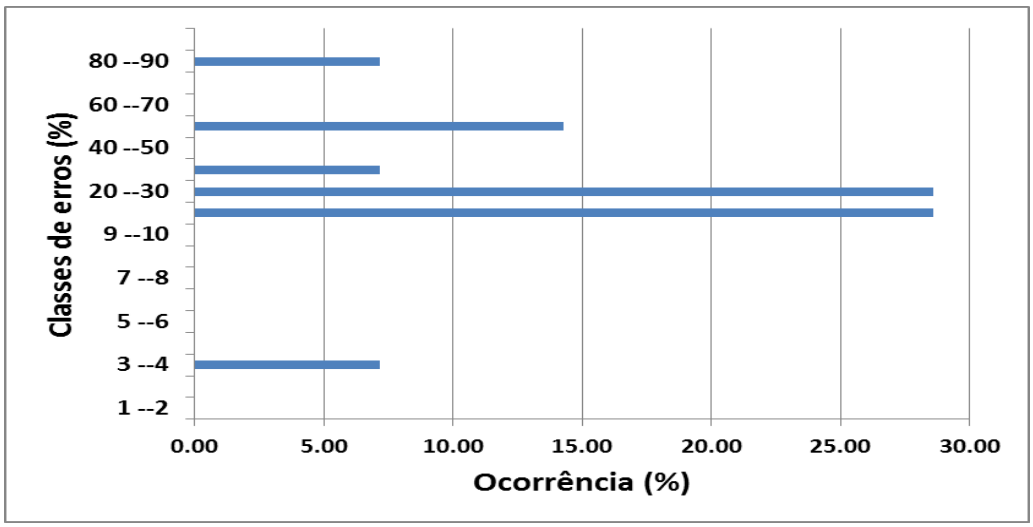

Figura 19: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 20/07/2005.

Análise na situação de quadratura

- **Descargas - 27/07/05**

As vazões observadas na Barra do Mutá em 27/07/2005 estão plotadas na Figura 20, junto com as vazões simuladas e a maré simulada indicando o sentindo da vazão. Observou-se uma vazão máxima de aproximadamente 16,3 x 10^3 m^3 s^{-1} durante a meia-maré de vazante. Observa-se que o modelo superestimou os valores máximos de vazão de enchente, e ao contrário do padrão observado, reproduziu vazão máxima de vazante um pouco mais fraca do que as vazões de enchente. Tal fato tem relação com a desigualdade diurna da maré novamente, onde se verifica que existe uma pequena diferença de altura entre duas baixa-mares consecutivas.

Assim como apresentado anteriormente, como a altura hidráulica durante a enchente é um pouco maior do que durante a vazante, então seria necessário uma vazão maior para alcançar a preamar. A diferença entre a máxima vazão de enchente e a máxima de vazante durante a quadratura é menor do que durante a situação de sizígia justamente porque a desigualdade semi-diurna é menor na quadratura. As vazões calculadas pelo modelo estão em fase com os dados observados na estofa de preamar e no instante de máximas vazões. No entanto, observa-se que ocorre uma diferença de fase significativa na estofa de baixa-mar entre os dados simulados e observados. O erro médio do modelo foi de 29%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi de 2,2 x 10^3 m^3 s^{-1} e o coeficiente de correlação foi 93%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 22, indica que a maior parte dos dados (34%) apresentaram erros entre 10 e 20%. O prisma de maré enchente calculado pelo modelo (249,3 x 10^6 m^3) foi 4% maior que o valor observado em campo (240 x 10^6 m^3). Para o prisma de vazante o resultado do modelo (242,4 x 10^6 m^3) superestimou em 17% o valor observado (207,4 x 10^6 m^3).

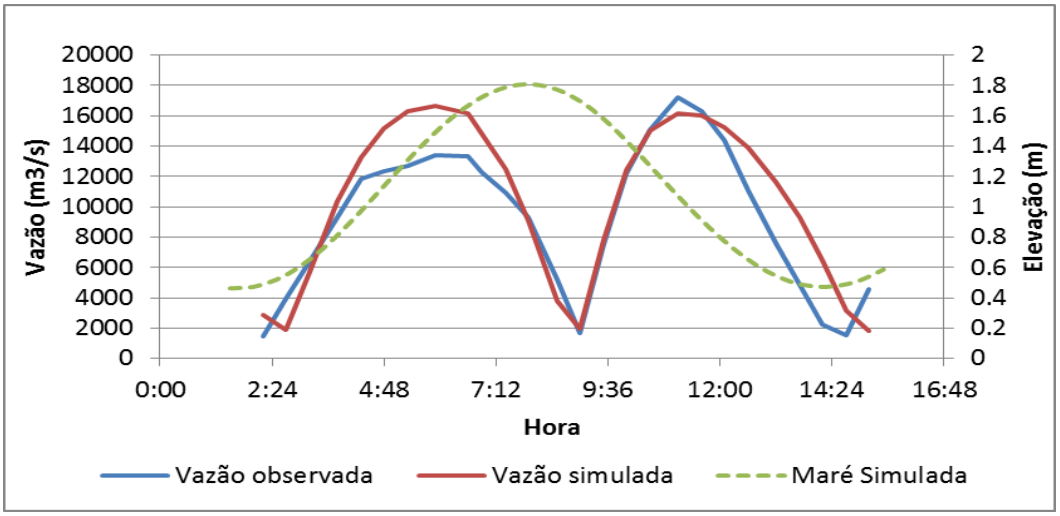

Figura 20: Vazões observadas e simuladas na Barra do Mutá em 27/07/2005. No eixo vertical secundário está plotada a maré simulada na Barra do Mutá, indicando o sentido das vazões.

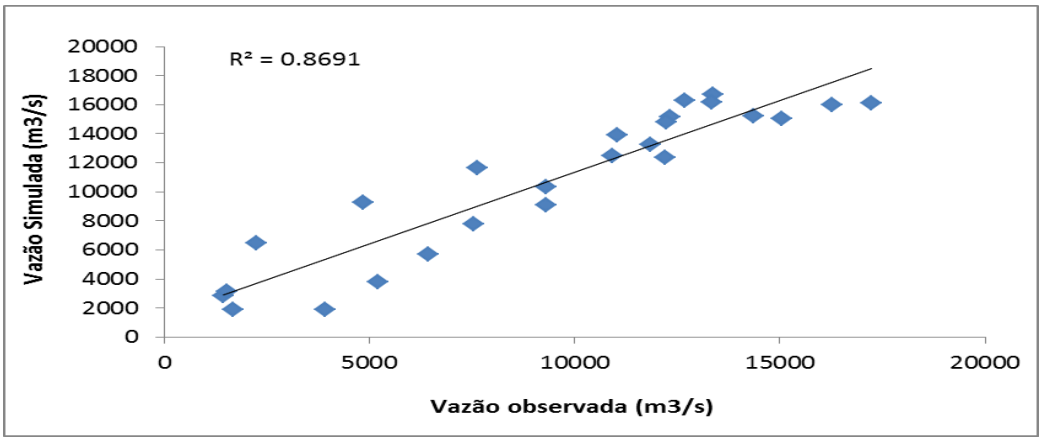

Figura 21: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas na Barra do Mutá em 27/07/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

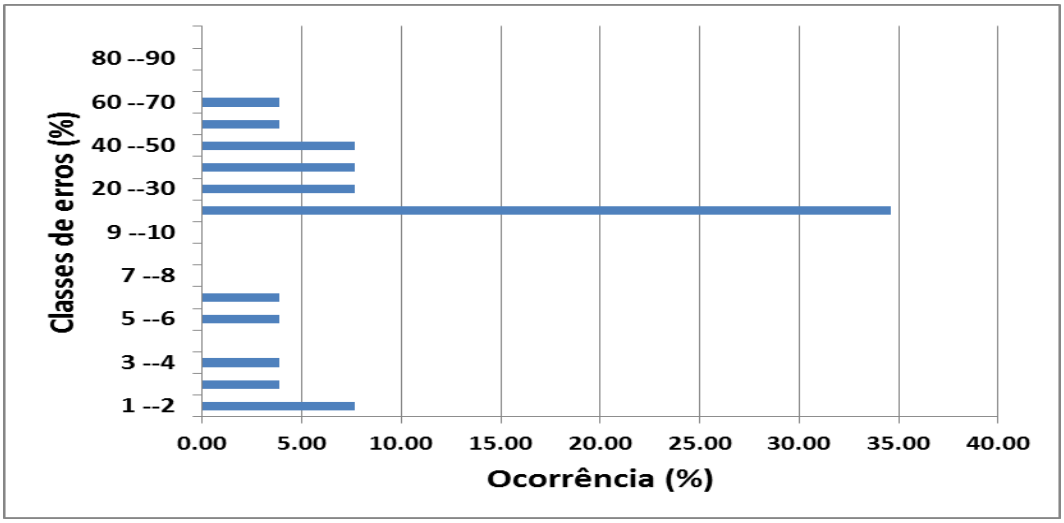

Figura 22: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 27/07/2005.

- **Correntes - 27/07/05**

O campo de velocidades de correntes no instante de vazão máxima (Figura 23) apresentou magnitudes de 0,05 a 0,6 m s^{-1} em direção ao oceano. O campo de velocidades residuais (Figura 23) mostra uma preferência do fluxo de enchente, principalmente na região central, com intensidade variando de -0,02 a -0,05 m s^{-1} em grande parte da coluna d'água. O fluxo residual de vazante ocorre preferencialmente nas laterais, onde são observadas velocidades máximas de 0,03 m s^{-1}. Devido a este cisalhamento horizontal, a velocidade residual em toda a seção foi preferencialmente de enchente (-0,026 m s^{-1}), associada a um transporte de -798 m^3 s^{-1}.

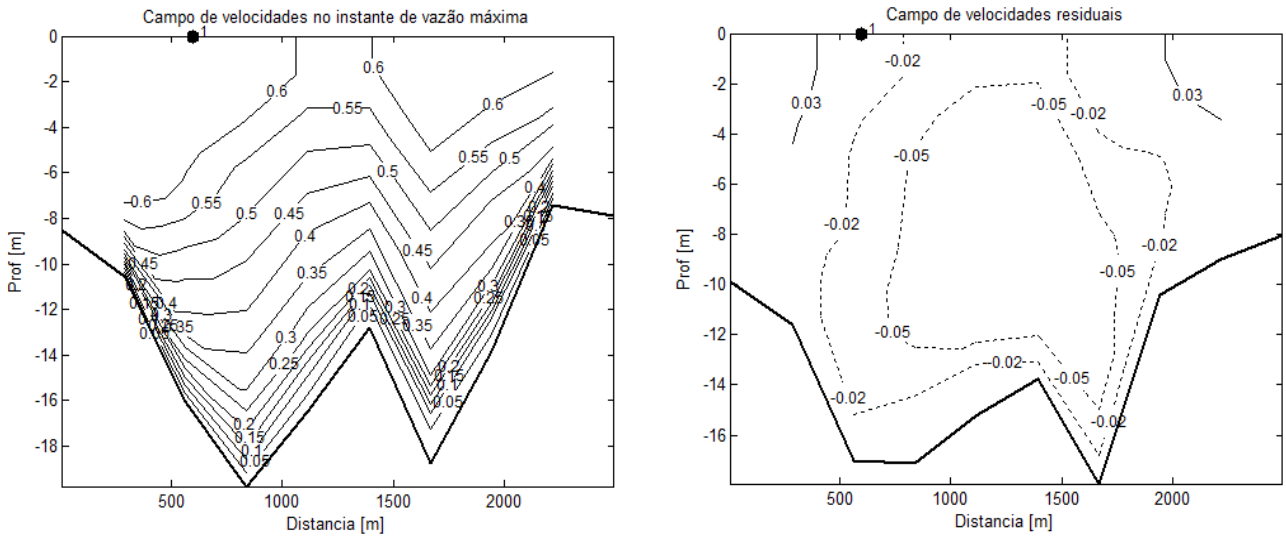

Figura 23: Campo de correntes (m s-1) do perfil transversal do canal na Barra do Mutá (Figura 19), para o ciclo de maré monitorado em 27/07/2005. O perfil batimétrico da seção (linha preta grossa) tem origem na margem esquerda do canal monitorado. O ponto 1 no gráfico indica o local onde foi extraído os dados de velocidade média na vertical da seção de ADCP.

As velocidades médias verticais das correntes retiradas no ponto 1 da seção de monitoramento de ADCP na Barra do Mutá em 27/07/2005 estão plotadas na Figura 24, juntamente com a maré simulada no local. A velocidade máxima registrada foi de 0,49 m s^{-1} durante a meia-maré de vazante. O modelo reproduziu os picos de enchente e vazante, porém essas velocidades máximas foram superestimadas (Figura 24). O comportamento observado com velocidades de vazantes mais intensas também foi reproduzido pelo modelo. As correntes calculadas pelo modelo estão em fase com os dados observados na estofa de preamar e no instante de máximas correntes de enchente e vazante. No entanto, observa-se que ocorre uma diferença de fase significativa na estofa de baixa-mar entre os dados simulados e observados. Assim como discutido anteriormente, esta defasagem pode ter relação com a dificuldade do ADCP em registrar corretamente correntes fracas, pois os resultados do modelo estão em fase com o sinal da maré. O erro médio foi de 25%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi 0,12 m s^{-1} e o coeficiente de correlação foi de 70%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 26, indica que a maior parte dos dados (36%) apresentaram erros entre 10 a 20%.

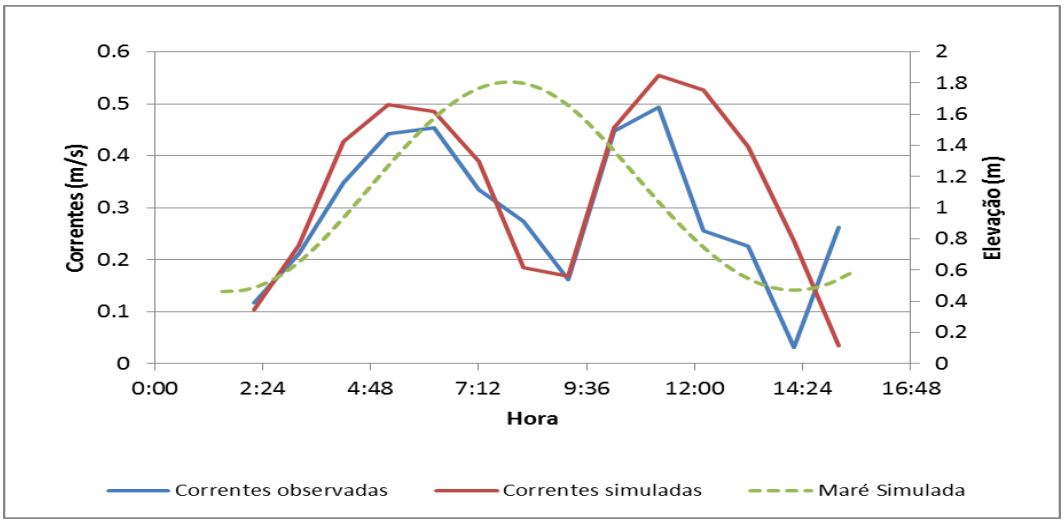

Figura 24: Velocidades das correntes observadas vs simuladas na Barra do Mutá em 27/07/2005.

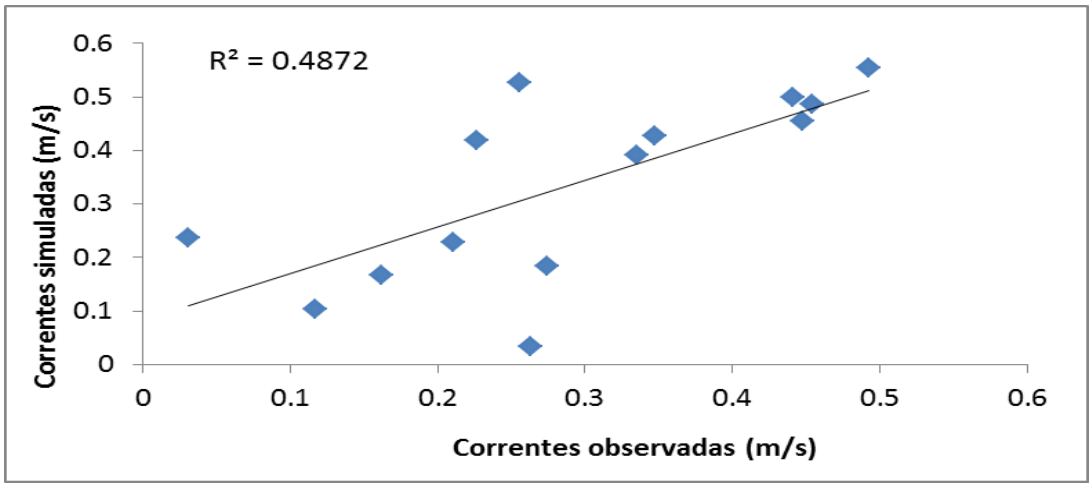

Figura 25: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas na Barra do Mutá em 27/07/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

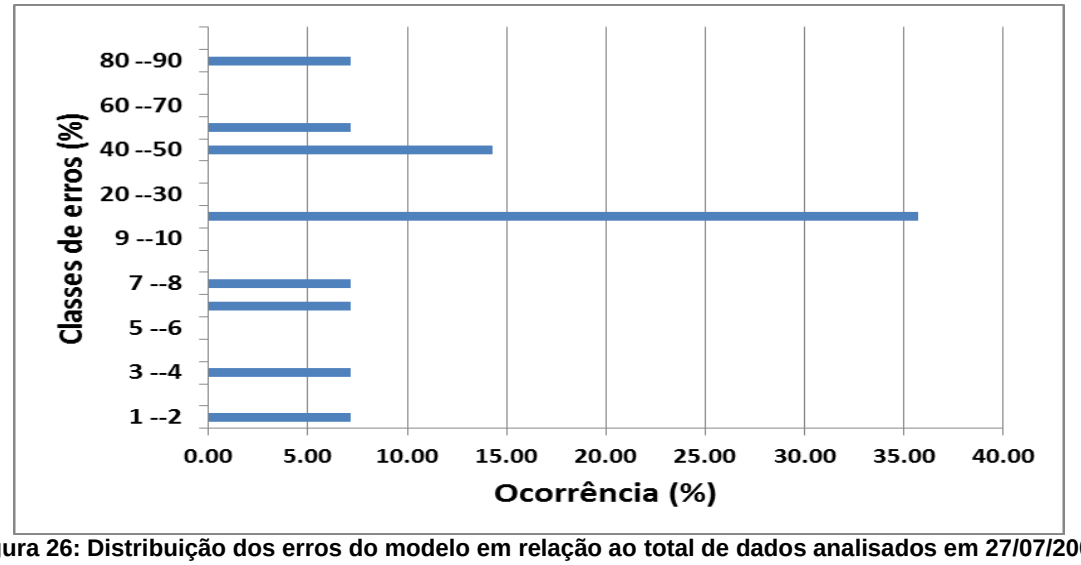

Figura 26: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 27/07/2005.

Rio Maraú

Análise na situação de sizígia

- **Descargas - 21/07/05**

As vazões observadas no rio Maraú em 21/07/2005 estão plotadas na Figura 27, junto com as vazões estimadas e a maré simulada indicando o sentindo da vazão. Observou-se uma vazão máxima de 10,6 x 10^3 m^3 s^{-1} durante a meia-maré de vazante. O modelo superestimou os valores máximos de vazão de enchente e subestimou a vazão máxima de vazante. Como anteriormente observado para a Barra do Mutá, o modelo reproduziu a vazão máxima de enchente mais intensa do que a vazão máxima de vazante. Tal fato pode ser explicado novamente pela desigualdade diurna da maré, onde se verifica que existe uma diferença de altura entre duas baixa-mares consecutivas. Como a altura hidráulica durante a enchente é maior do que durante a vazante, então seria necessário uma vazão maior para alcançar a preamar. Esta diferença entre o padrão de vazão simulado e observado pode ter relação com a não inclusão dos efeitos meteorológicos e com a inclinação das regiões intermareais consideradas no modelo. No rio Maraú foram verificadas elevações de aproximadamente 15 cm causadas pela maré meteorológica (Figura 28). As vazões calculadas pelo modelo estão em fase com os dados observados na estofa de preamar e no instante de máximas vazões. Entretanto, observa-se que ocorre uma diferença de fase significativa na estofa de baixa-mar entre os dados simulados e observados.

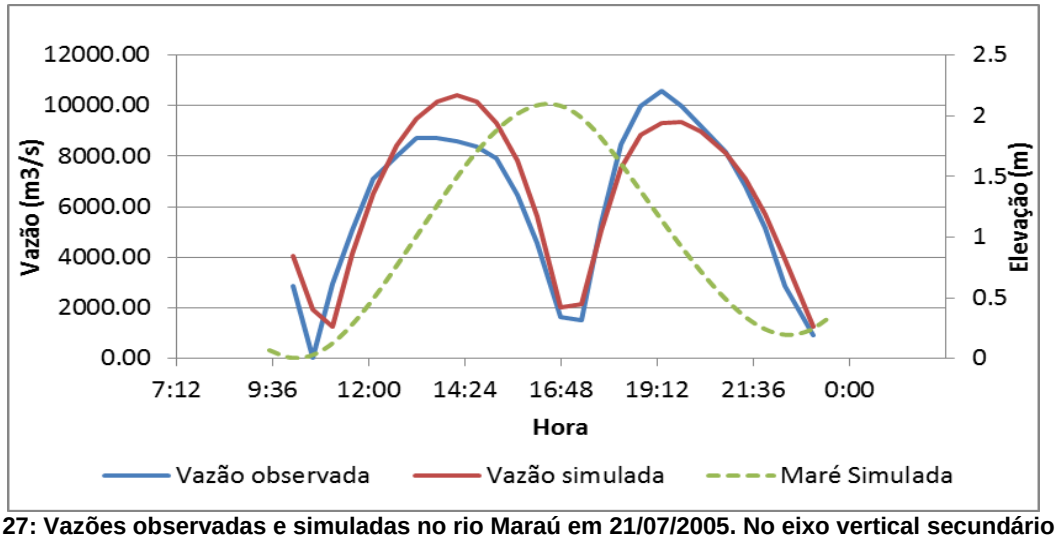

Figura 27: Vazões observadas e simuladas no rio Maraú em 21/07/2005. No eixo vertical secundário está plotada a maré simulada no rio Maraú, indicando o sentido das vazões.

O erro médio do modelo foi de 22%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi de 1,07 x 10^3 m^3 s^{-1} e o coeficiente de correlação foi 94%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 30, indica que a maior parte dos dados (38%) apresentaram erros entre 20 e 30%. O prisma de maré enchente calculado pelo modelo (154,7 x 10^6 m^3) foi 6% maior que o valor

observado em campo (145,8 x 10^6 m^3). Para o prisma de vazante o resultado do modelo (145,0. 10^6 m^3) se aproximou mais do valor observado (144,5 x 10^6 m^3), com um erro de 0,35%.

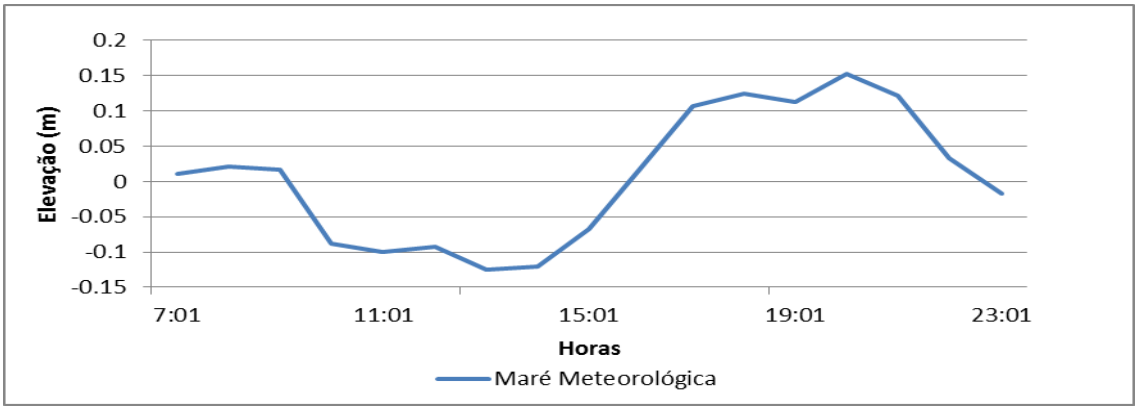

Figura 28: Maré meteorológica observada no rio Maraú em 21/07/2005.

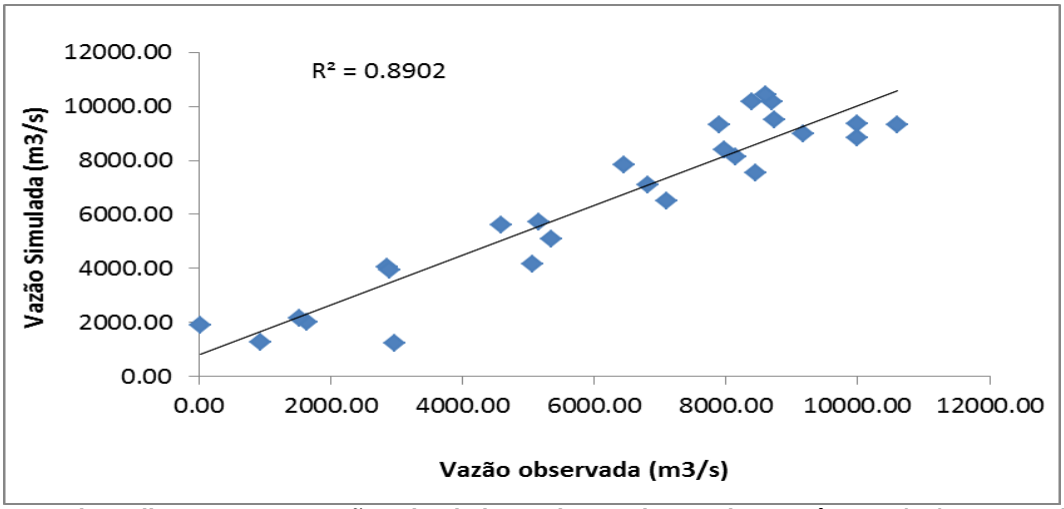

Figura 29: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas no rio Maraú em 21/07/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

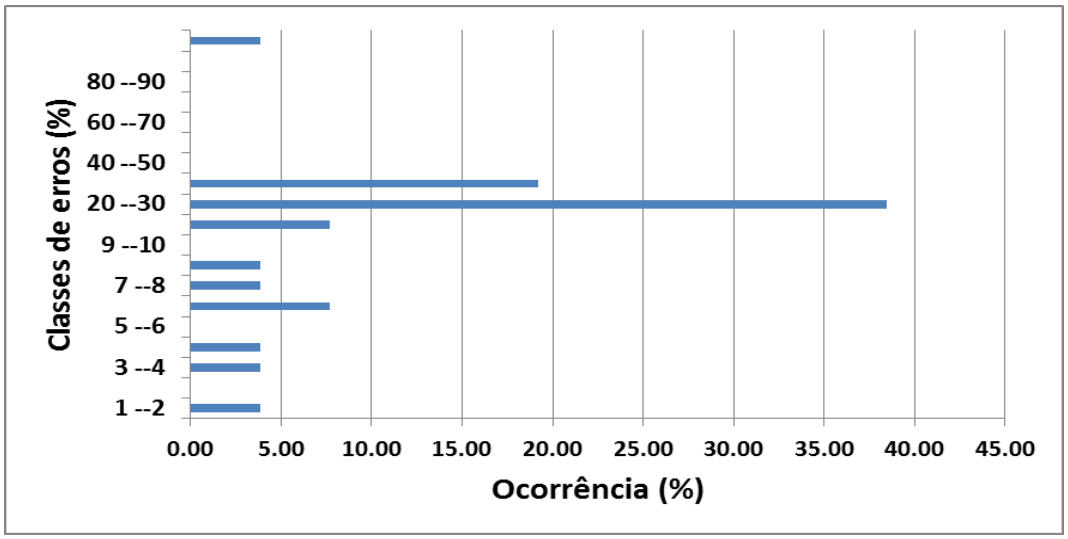

Figura 30: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 21/07/2005.

- **Correntes - 21/07/05**

O campo de velocidades de corrente no instante de vazão máxima (Figura 31) apresentou magnitudes de 0,05 a 0,85 m s^{-1} em direção ao oceano, com as maiores velocidades em superfície. O campo de velocidades residuais (Figura 31) mostra uma preferência do fluxo de enchente com intensidade de -0,03 m s^{-1}. A velocidade residual média em toda a seção foi preferencialmente de enchente (-0,013 m s^{-1}), associada a um transporte de -157 m^3 s^{-1}.

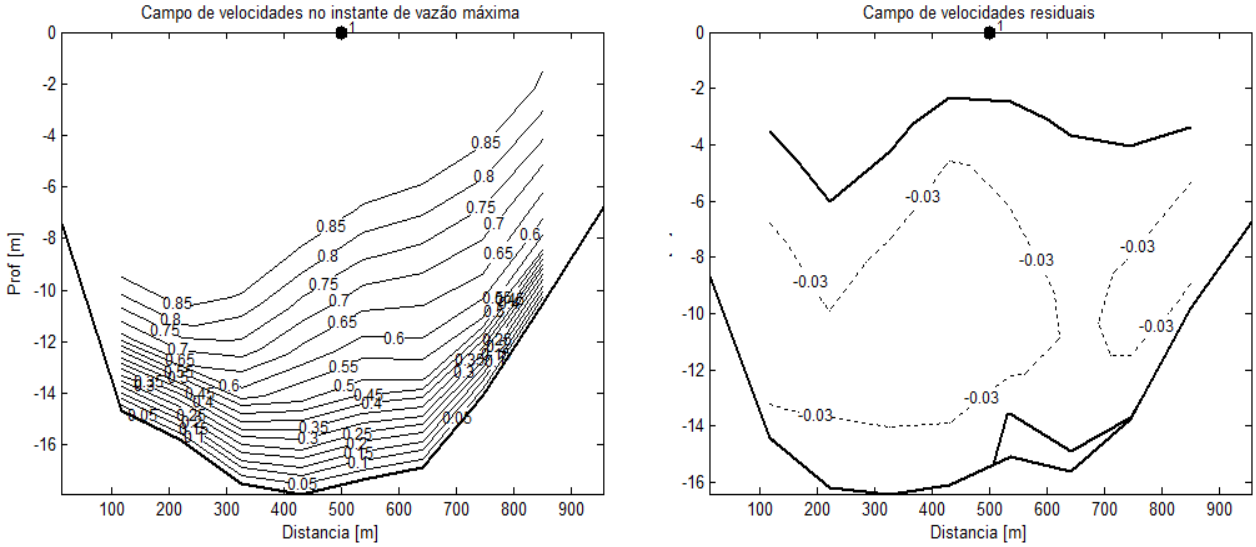

Figura 31: Campo de correntes (m s^{-1}) do perfil transversal do canal na Barra do Mutá (Figura 19), para o ciclo de maré monitorado em 20/07/2005. O perfil batimétrico da seção (linha preta grossa) tem origem na margem esquerda do canal monitorado. O ponto 1 no gráfico indica o local onde foi extraído os dados de velocidade média na vertical da seção de ADCP.

As velocidades médias verticais das correntes retiradas no ponto 1 da seção de monitoramento de ADCP no rio Maraú em 21/07/2005 estão plotadas na Figura 32, juntamente com a maré simulada no local. A velocidade máxima registrada foi de 0,75 m s^{-1} durante a meia-maré de vazante. O modelo foi capaz de reproduzir os picos de máximas velocidades, porém tanto a velocidade máxima do pico de enchente quanto de vazante foi superestimada (Figura 32). O comportamento observado com velocidades máximas de vazante mais intensa também foi seguido pelo modelo, mas com uma diferença menor entre a enchente e vazante do que o dado observado. As correntes calculadas pelo modelo estão em fase com os dados observados. O erro médio foi de 19%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi 0,11 m s^{-1} e o coeficiente de correlação foi de 96%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 34, indica que a maior parte dos dados (36%) apresentaram erros entre 10 a 20%.

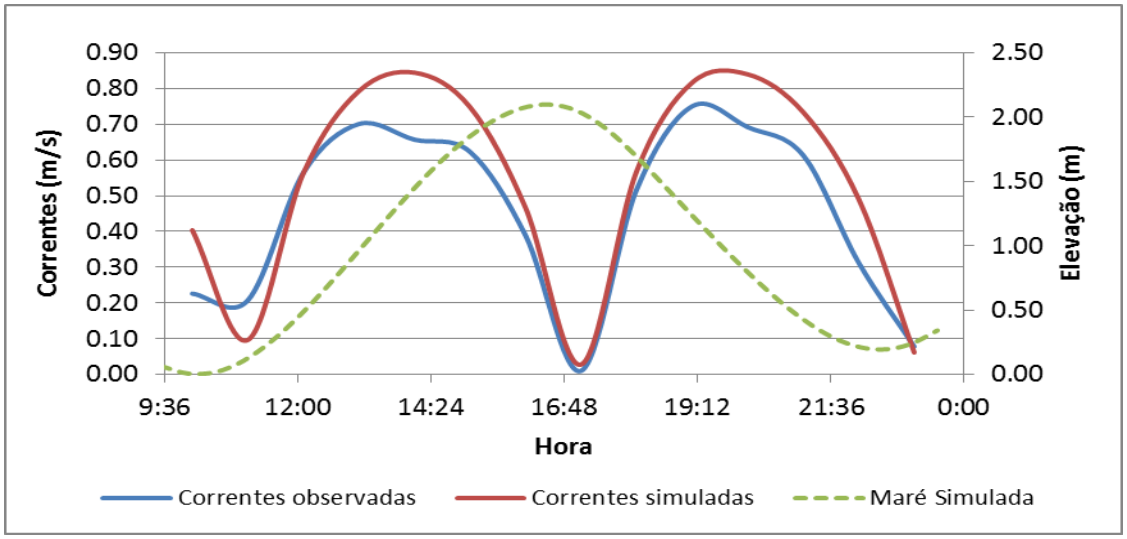

Figura 32: Velocidades das correntes observadas vs simuladas no rio Maraú em 21/07/2005.

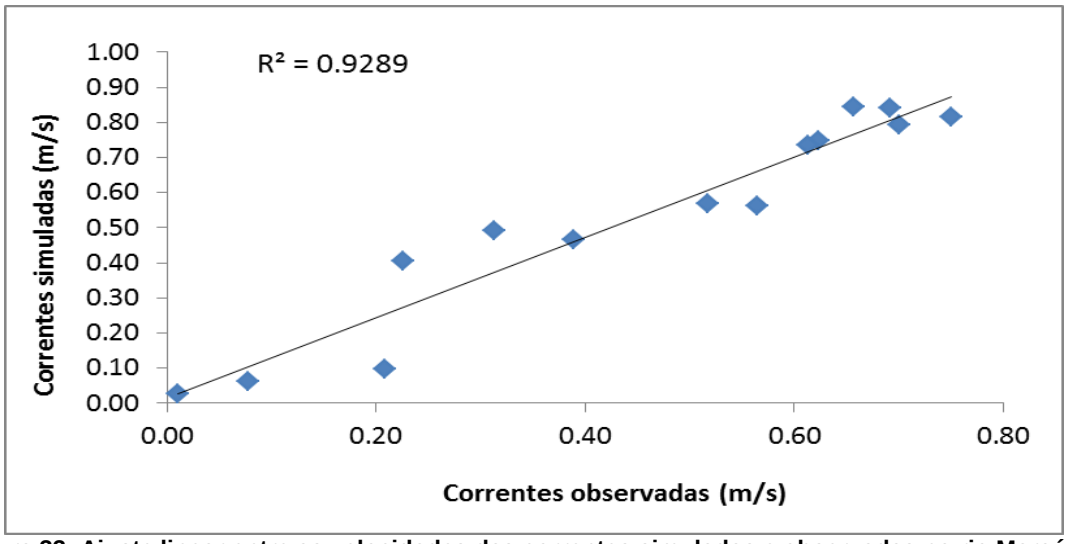

Figura 33: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas no rio Maraú em 21/07/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

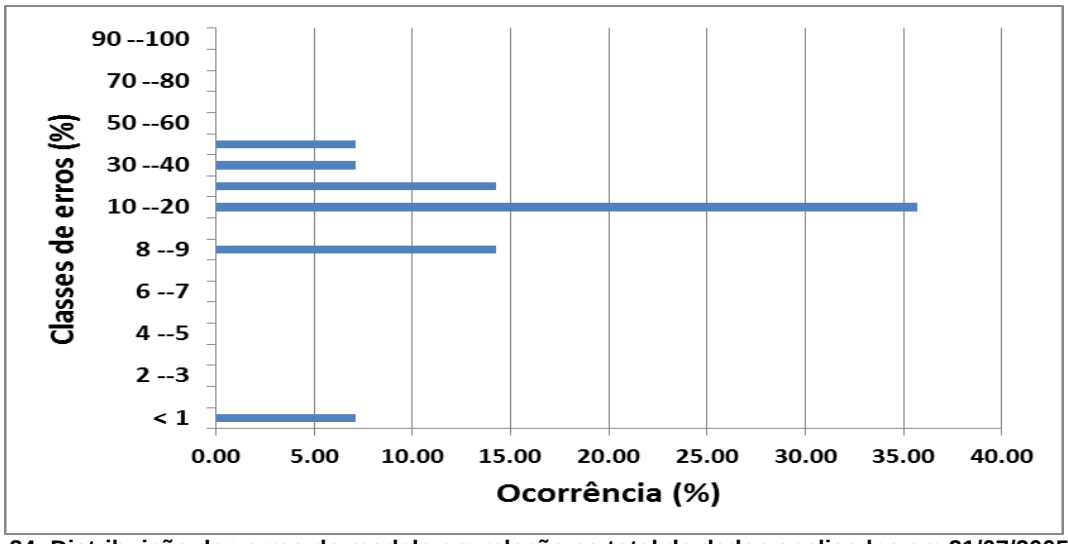

Figura 34: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 21/07/2005.

Análise na situação de quadratura

- **Descargas - 29/07/05**

As vazões observadas no rio Maraú em 29/07/2005 estão plotadas na Figura 35, junto com as vazões simuladas e a maré simulada indicando o sentindo da vazão. Observou-se uma vazão máxima de 4,4 x 10^3 m^3 s^{-1} durante a meia-maré de vazante. Nota-se que a vazão de vazante simulada apresenta boa correspondência com a observada, mas a vazão de enchente é superestimadas (Figura 35). As vazões calculadas pelo modelo estão em fase com os dados observados na estofa de preamar e no instante de máximas vazões. No entanto, observa-se que ocorre uma diferença de fase significativa na estofa de baixa-mar entre os dados simulados e observados.

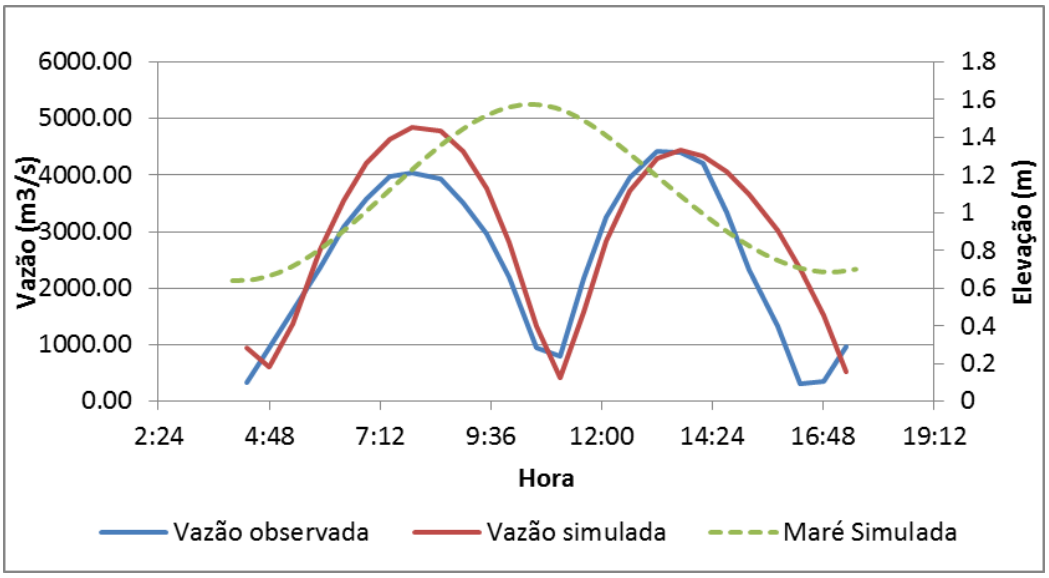

Figura 35: Vazões observadas e simuladas no rio Maraú em 29/07/2005. No eixo vertical secundário está plotada a maré simulada no rio Maraú, indicando o sentido das vazões.

O erro médio do modelo foi de 30%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi de 0,8 x 10^3 m^3 s^{-1} e o coeficiente de correlação foi 89%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 37, indica que a maior parte dos dados (34%) apresentaram erros entre 10 e 20%. O prisma de maré enchente calculado pelo modelo (73,2 x 10^6 m^3) foi 15,5% maior que o valor observado em campo (63,3 x 10^6 m^3). Para o prisma de vazante o resultado do modelo (68,2 x 10^6 m^3) superestimou em 21% o valor observado (56,1 x 10^6 m^3).

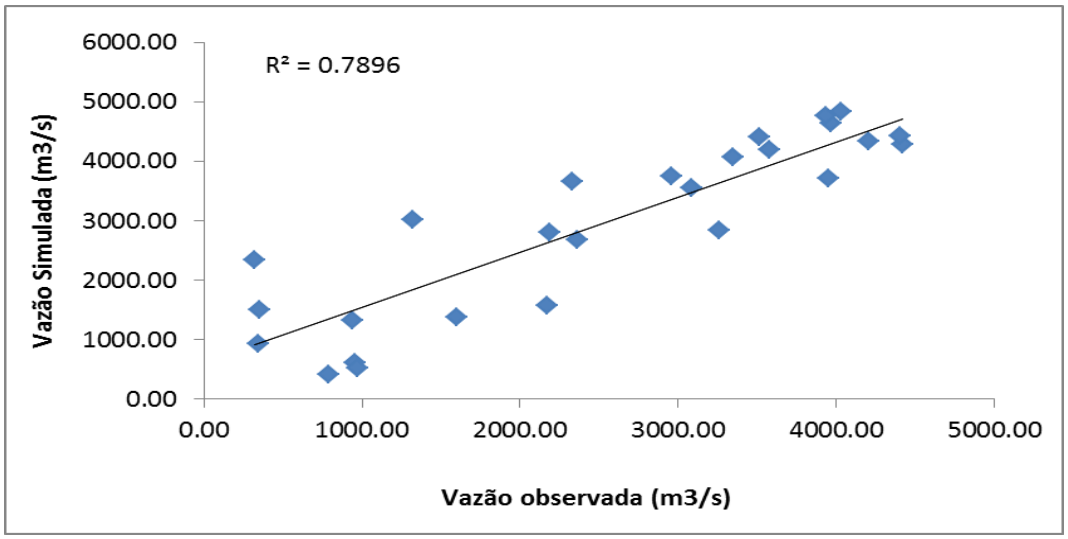

Figura 36: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas no rio Maraú em 29/07/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

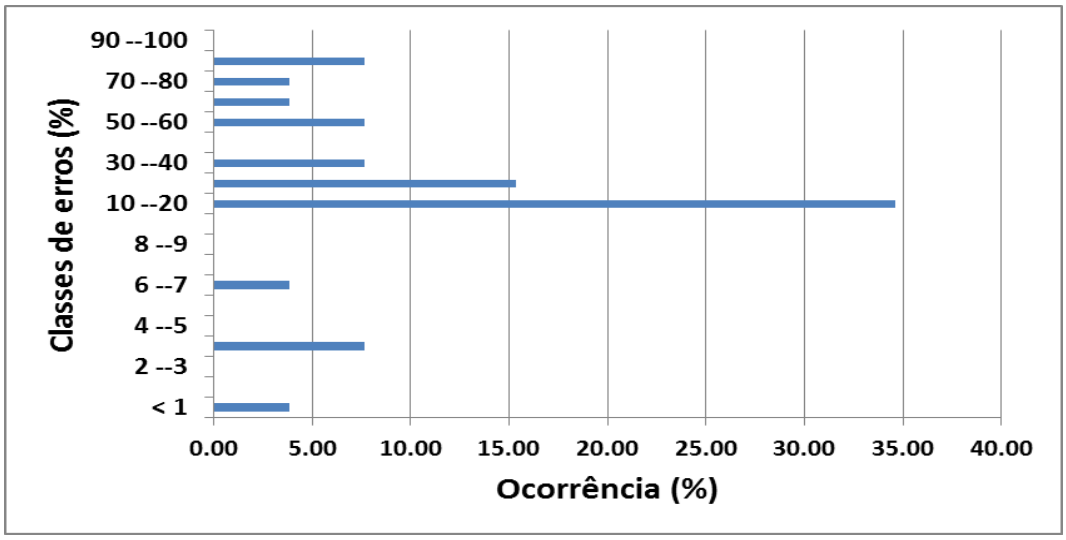

Figura 37: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 29/07/2005.

- **Correntes - 29/07/05**

O campo de velocidades de correntes no instante de vazão máxima (Figura 38) apresentou magnitudes de 0,05 a 0,4 m s^{-1} em direção ao oceano. O campo de velocidades residuais, apresentado na Figura 38, indica uma tendência próxima de zero do transporte durante o período monitorado. A velocidade residual em toda a seção demonstrou uma leve tendência de enchente (-0,006 m s^{-1}), associada a um transporte de -71 m^3 s^{-1}.

A velocidade média na vertical das correntes retiradas no ponto 1 da seção de monitoramento de ADCP no rio Maraú em 29/07/2005 estão plotadas na Figura 39,

juntamente com a maré simulada no local. A velocidade máxima registrada foi de 0,35 m s^{-1} durante a meia-maré de vazante.

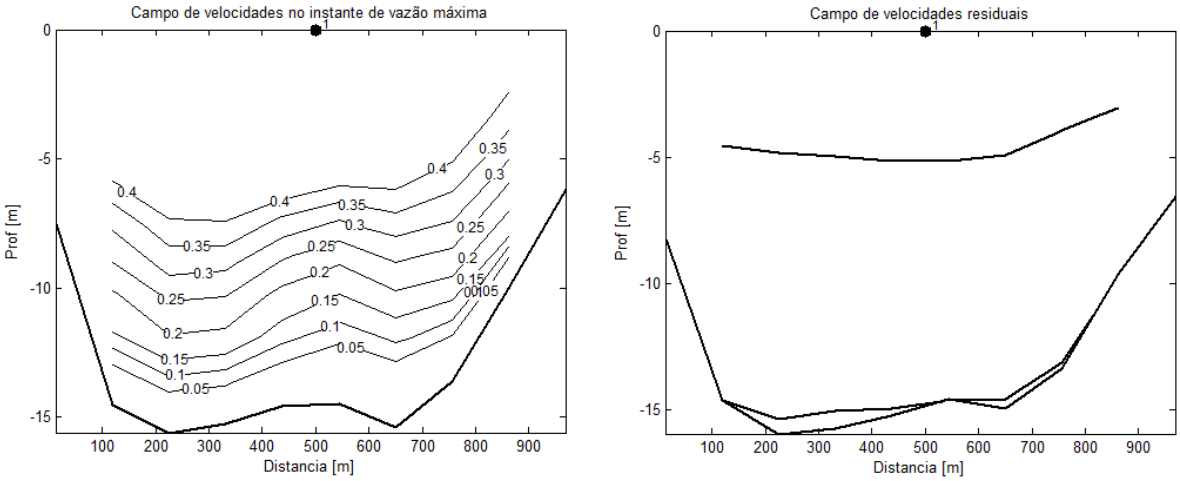

Figura 38: Campo de correntes (m s^{-1}) do perfil transversal do canal no rio Maraú (Figura 19), para o ciclo de maré monitorado em 29/07/2005. O perfil batimétrico da seção (linha preta grossa) tem origem na margem esquerda do canal monitorado. O ponto 1 no gráfico indica o local onde foi extraído os dados de velocidade média na vertical da seção de ADCP.

O modelo reproduziu os picos de enchente e vazante, porém essas velocidades máximas foram superestimadas (Figura 39). As correntes calculadas pelo modelo estão em fase com os dados observados nos instantes de máximas correntes. No entanto, observa-se que ocorre uma diferença de fase significativa durante as estofa.

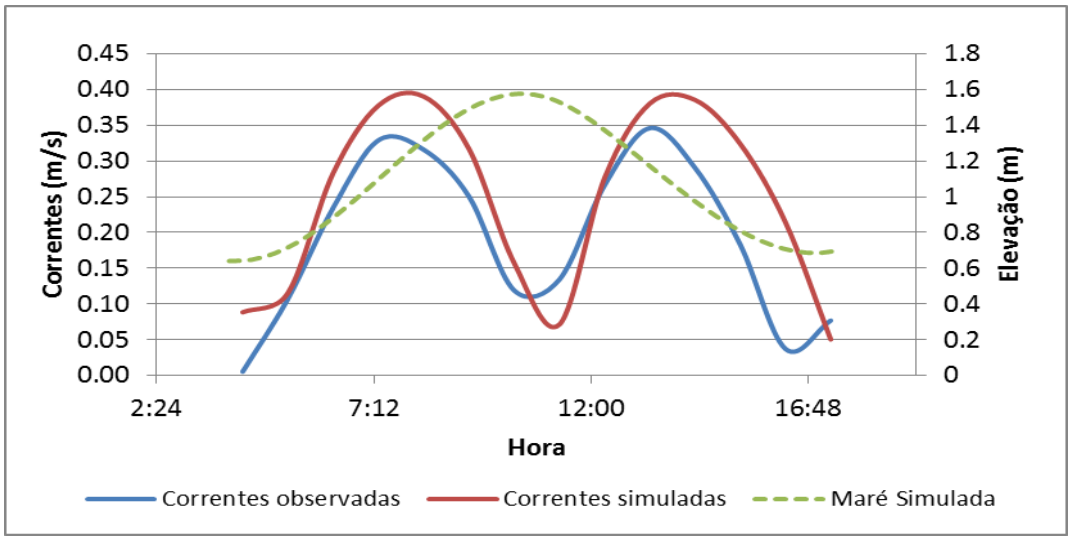

Figura 39: Velocidades das correntes observadas vs simuladas no rio Maraú em 29/07/2005.

O erro médio foi de 21%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi 0,08 m s^{-1} e o coeficiente de correlação foi de 87%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 41, indica que a maior parte dos dados (22%) apresentaram erros entre as faixas de 10 a 20% e 20 a 30%.

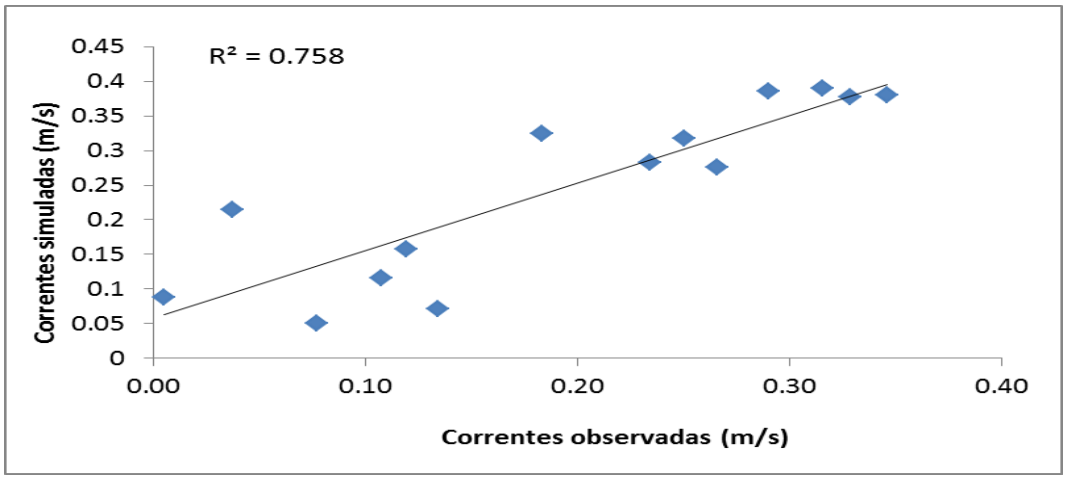

Figura 40: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas no rio Maraú em 29/07/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

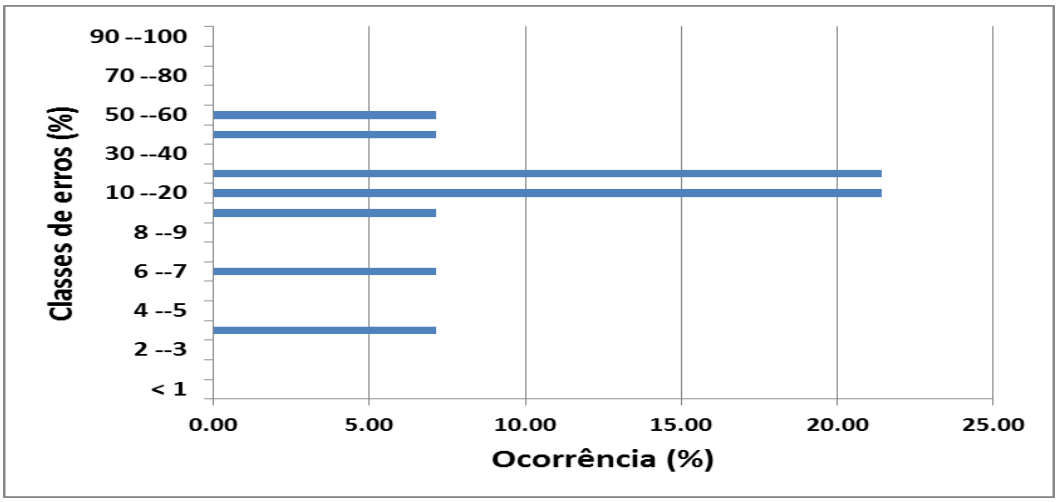

Figura 41: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 29/07/2005.

Rio Serinhaém

Análise na situação de sizígia

- **Descargas - 22/07/05**

As vazões observadas no rio Serinhaém em 22/07/2005 estão plotadas na Figura 42, junto com as vazões simuladas e a maré simulada indicando o sentindo da vazão. Observou-se uma vazão máxima de 10,1 x 10^3 m^3 s^{-1} durante a meia-maré de vazante. O modelo reproduziu bem os valores máximos de vazão de enchente, mas subestimou a vazão máxima de vazante. O modelo não conseguiu reproduzir o padrão observado, com vazão máxima de vazante mais intensa do que a de enchente. Conforme discutido anteriormente,

este comportamento pode ser explicado novamente pela desigualdade diurna da maré. A interferência das regiões intermareias é percebida ao analisar o comportamento da curva de vazão de vazante observada. Esta última apresentou um padrão bem distinto da vazão de enchente e da vazão simulada, demonstrando que as regiões intermareais interferem bastante durante a vazante. Então, devido à diferença entre as vazões de vazante simuladas e observadas, podemos inferir que as elevações das regiões intermareais adotadas no modelo para o rio Serinhaém podem não estar representando tão bem a realidade. As vazões calculadas pelo modelo estão em fase com os dados observados na estofa de preamar e no instante de máximas vazões. Porém, observa-se que ocorre uma diferença de fase significativa na estofa de baixa-mar entre os dados simulados e observados.

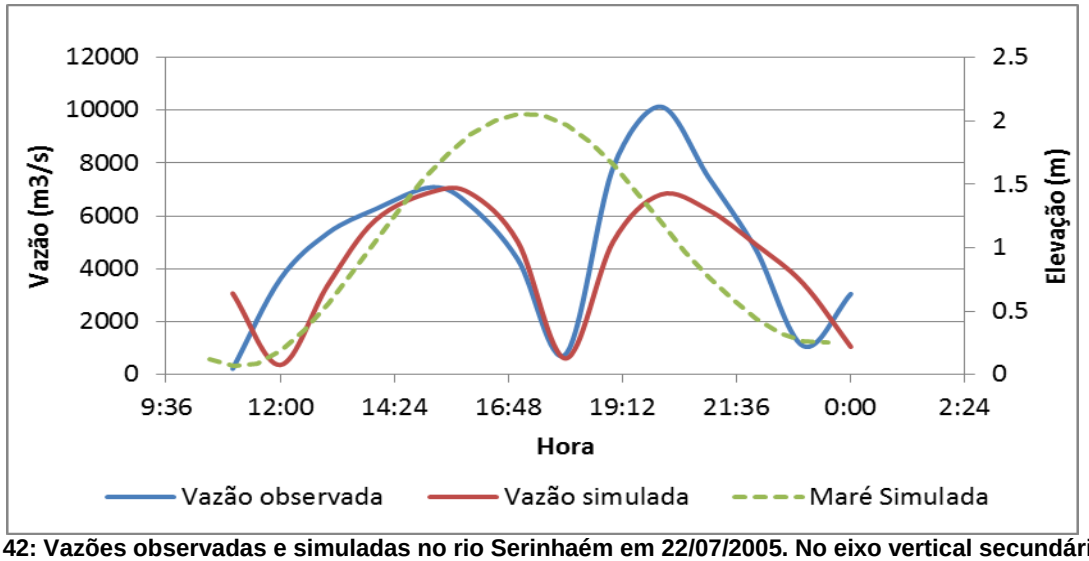

Figura 42: Vazões observadas e simuladas no rio Serinhaém em 22/07/2005. No eixo vertical secundário está plotada a maré simulada no rio Serinhaém, indicando o sentido das vazões.

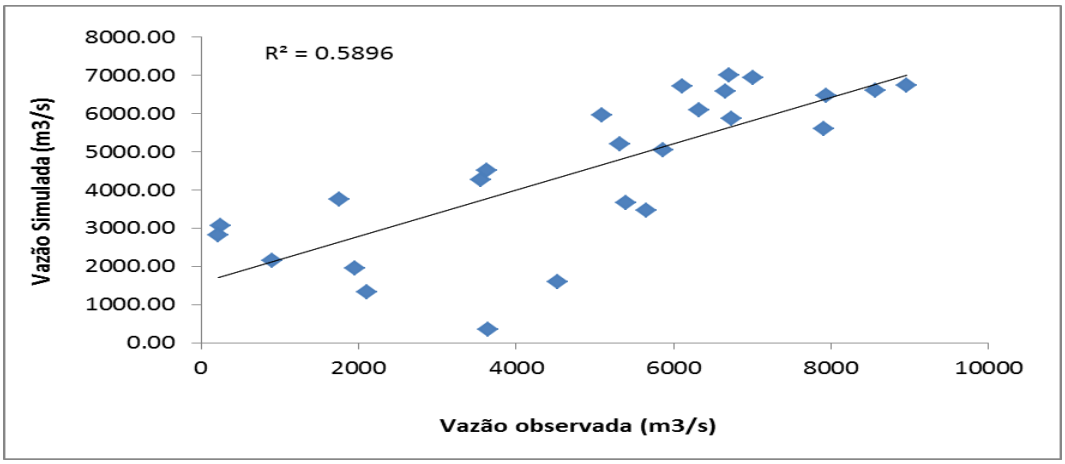

Figura 43: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas no rio Serinhaém em 22/07/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

O erro médio do modelo foi de 30%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi de 1,6 x 10^3 m^3 s^{-1} e o coeficiente de correlação foi 77%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura

44, indica que a maior parte dos dados (20%) apresentaram erros entre 10 e 20%. Em relação aos prismas de maré simulados, tanto o de maré vazante quanto o de enchente foram subestimados. O prisma de maré de enchente observado (117,5 x 10^6 m^3) foi 10,5% maior que o valor calculado pelo modelo (105,1 x 10^6 m^3). O prisma de vazante observado (109,1 x 10^6 m^3) foi 9% maior que o calculado pelo modelo (99,3 x 10^6 m^3).

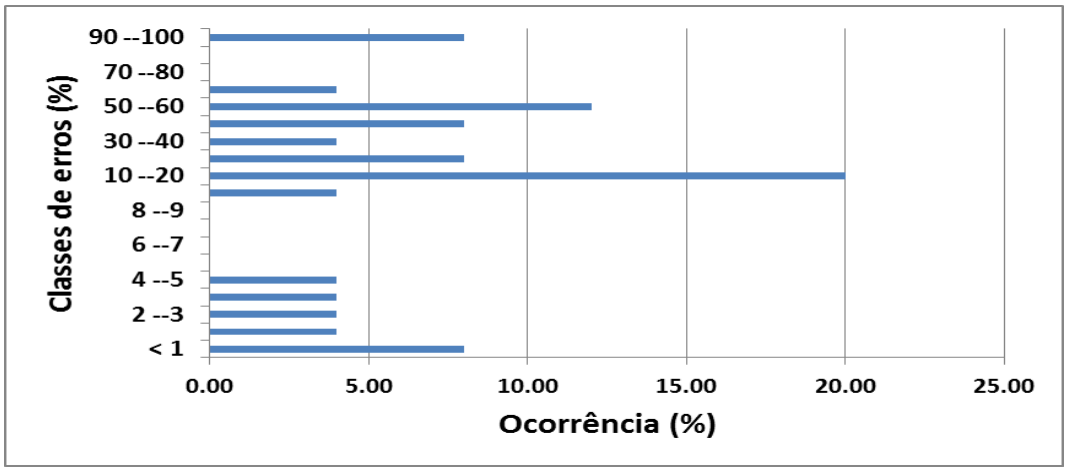

Figura 44: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 22/07/2005.

- **Correntes - 22/07/05**

O campo de velocidades de corrente no instante de vazão máxima (Figura 45) apresentou magnitudes de 0,05 a 0,8 m s^{-1} em direção ao oceano, com as maiores velocidades em superfície. O campo de velocidades residuais (Figura 45) mostrou uma preferência do fluxo de enchente com intensidade de -0,03 m s^{-1}. A velocidade residual média em toda a seção foi preferencialmente de enchente (-0,008 m s^{-1}), associado a um transporte de -98,7 m^3 s^{-1}.

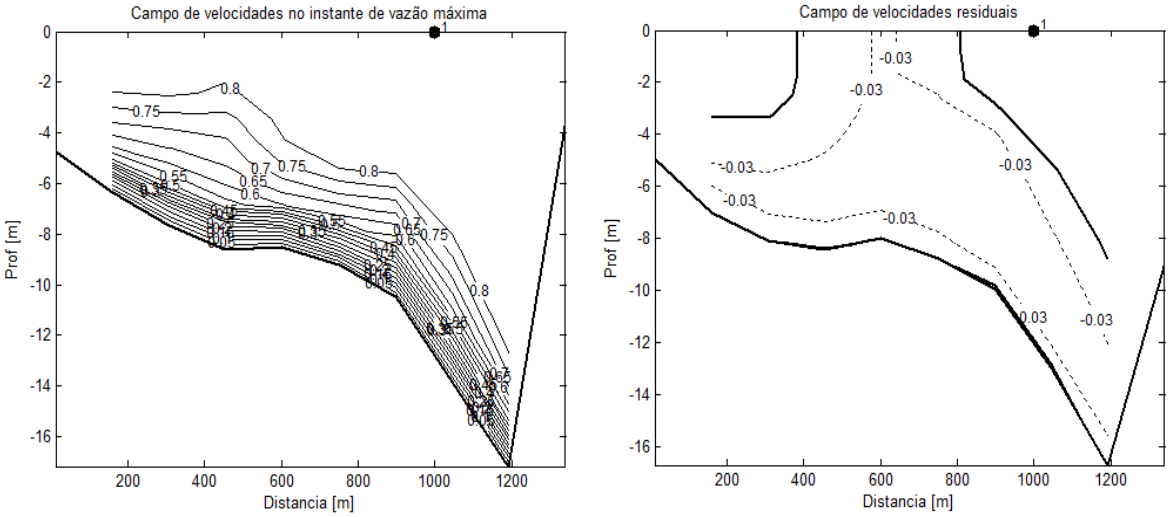

Figura 45: Campo de correntes (m s-1) do perfil transversal do canal rio Serinhaém (Figura 19), para o ciclo de maré monitorado em 22/07/2005. O perfil batimétrico da seção (linha preta grossa) tem origem na margem esquerda do canal monitorado. O ponto 1 no gráfico indica o local onde foi extraído os dados de velocidade média na vertical da seção de ADCP.

As velocidades médias verticais das correntes retiradas no ponto 1 da seção de monitoramento de ADCP no rio Maraú em 21/07/2005 estão plotadas na Figura 46, juntamente com a maré simulada no local. A velocidade máxima registrada foi de 0,7 m s^{-1} durante a meia-maré de vazante. O modelo foi capaz de reproduzir os picos de máximas velocidades, porém tanto as velocidades máximas de enchente quanto de vazante foram superestimadas (Figura 47), mas a velocidade máxima simulada durante a vazante obteve uma melhor aproximação da velocidade observada. O comportamento observado com velocidades máximas de vazante mais intensa também foi seguido pelo modelo, mas com uma diferença menor entre a velocidade de enchente e a de vazante do que a do padrão de velocidades observadas. As correntes calculadas pelo modelo estão em fase com os dados observados durante as máximas correntes e a estofa de preamar, porém ocorre um atraso de fase significativo durante as estofas de baixa-mar.

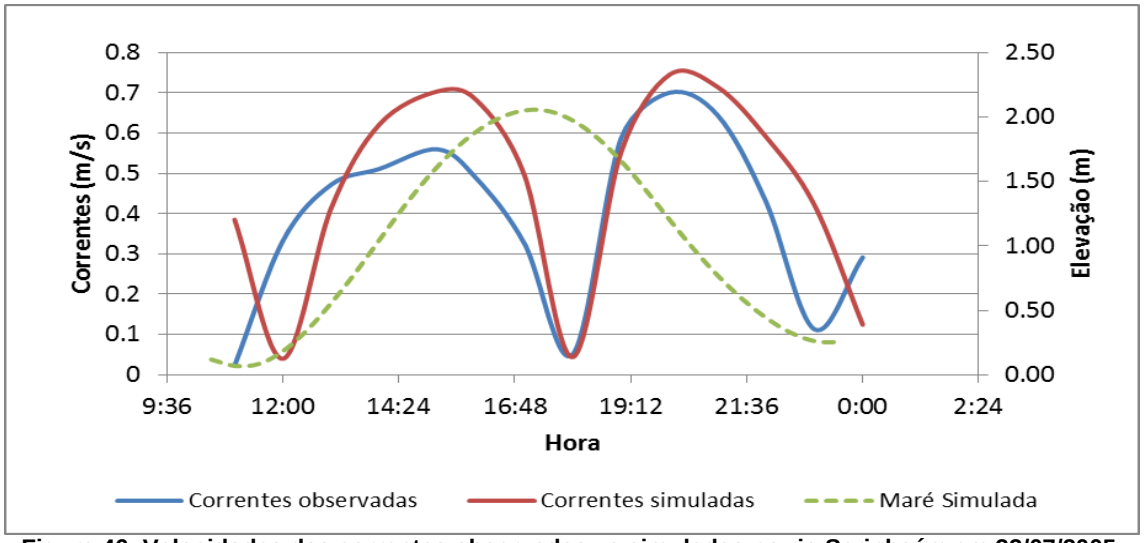

Figura 46: Velocidades das correntes observadas vs simuladas no rio Serinhaém em 22/07/2005.

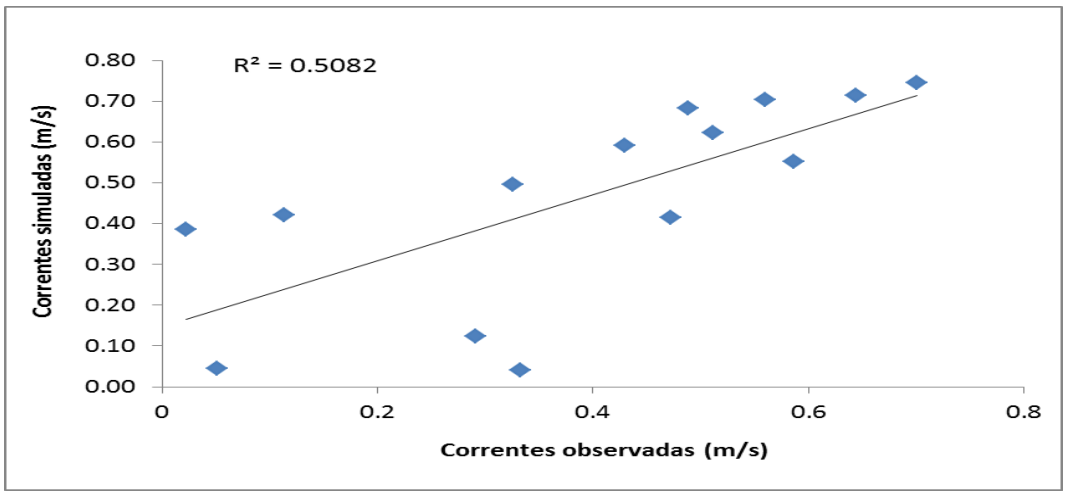

Figura 47: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas no rio Serinhaém em 22/07/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

O erro médio foi de 29%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi 0,14 m s^{-1} e o coeficiente de correlação foi de 71%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 48, indica que a maior parte dos dados (22%) apresentaram erros entre as faixas de 10 a 20% e 20 a 30%.

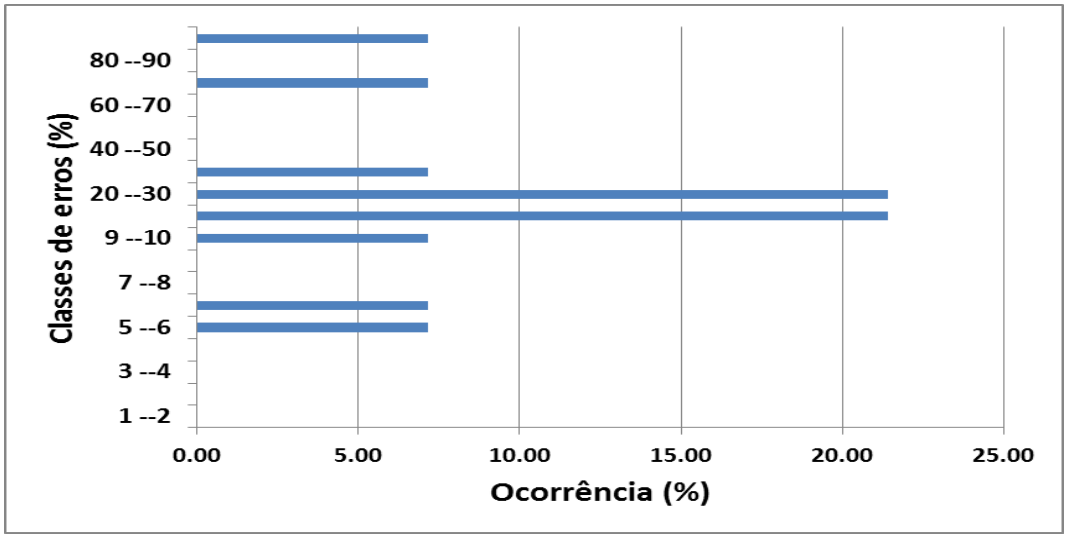

Figura 48: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 22/07/2005.

Análise na situação de quadratura

- **Descargas - 28/07/05**

As vazões observadas no rio Serinhaém em 28/07/2005 estão plotadas na Figura 49, junto com as vazões simuladas e a maré estimada indicando o sentindo da vazão. Observou-se uma vazão máxima de cerca de 4,5 x10^3 m^3 s^{-1} durante a meia-maré de vazante.

O modelo conseguiu reproduzir de forma bem aproximada a vazão máxima de enchente, mas a máxima vazão de vazante foi subestimada (Figura 50). As vazões calculadas pelo modelo estão em fase com os dados observados na estofa de preamar e no instante de máximas vazões. No entanto, observa-se que ocorre uma diferença de fase significativa na estofa de baixa-mar entre os dados simulados e observados. O erro médio do modelo foi de 29%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi de 0,76 x 10^3 m^3 s^{-1} e o coeficiente de correlação foi 88%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 51, indica que a maior parte dos dados (20%) apresentaram erros entre as faixas de 10 a 20% e de 30 a 40%. O prisma de maré enchente calculado pelo modelo (60,8 x 10^6 m^3) foi 14,8% maior que o valor observado em campo (52,9 x 10^6 m^3). Para o prisma de vazante o resultado do modelo (63,5 x 10^6 m^3) superestimou em 17% o valor observado (54,2 x 10^6 m^3).

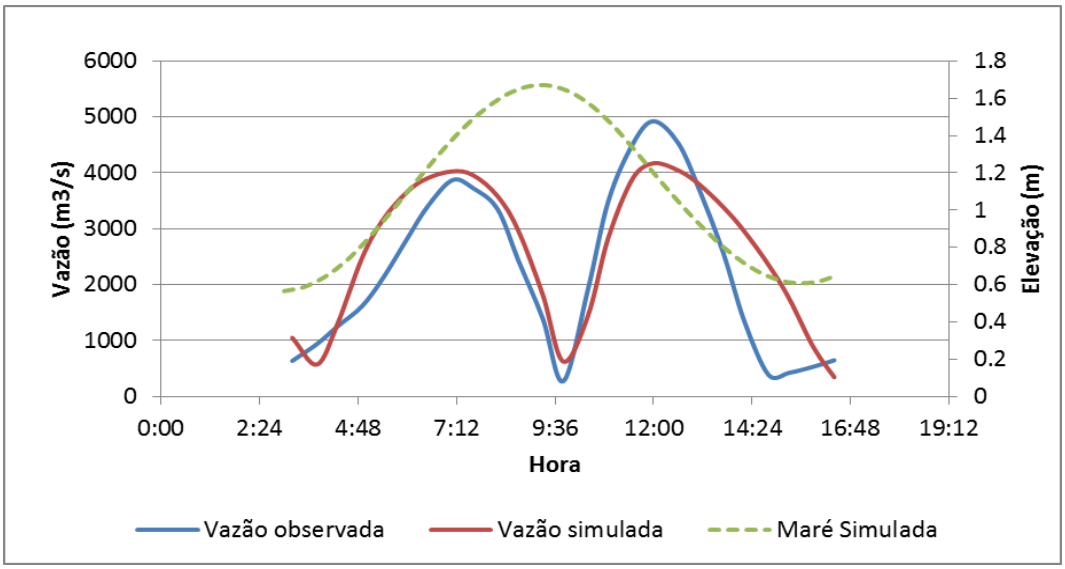

Figura 49: Vazões observadas e simuladas no rio Serinhaém em 28/07/2005. No eixo vertical secundário está plotada a maré simulada no rio Maraú, indicando o sentido das vazões.

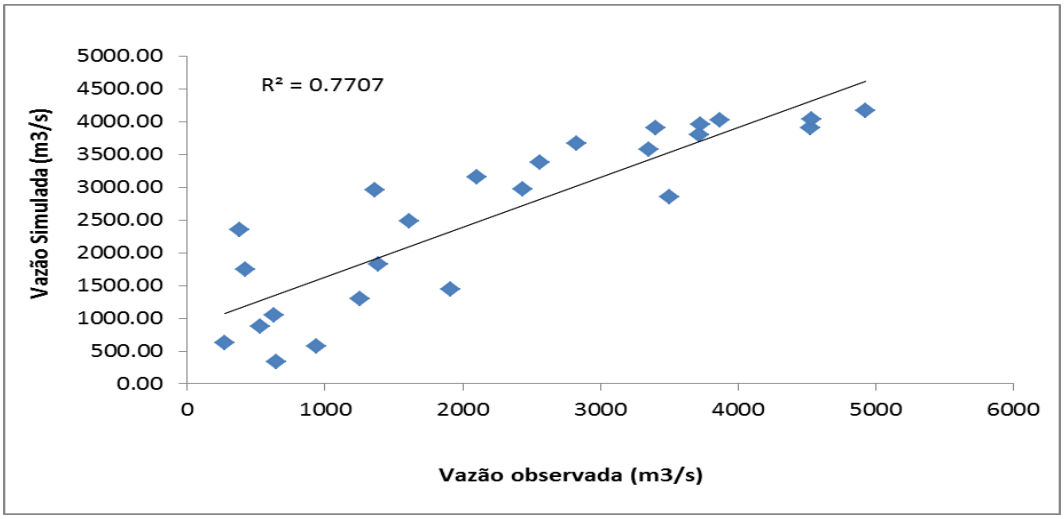

Figura 50: Ajuste linear entre as vazões simuladas e observadas no rio Serinhaém em 28/07/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

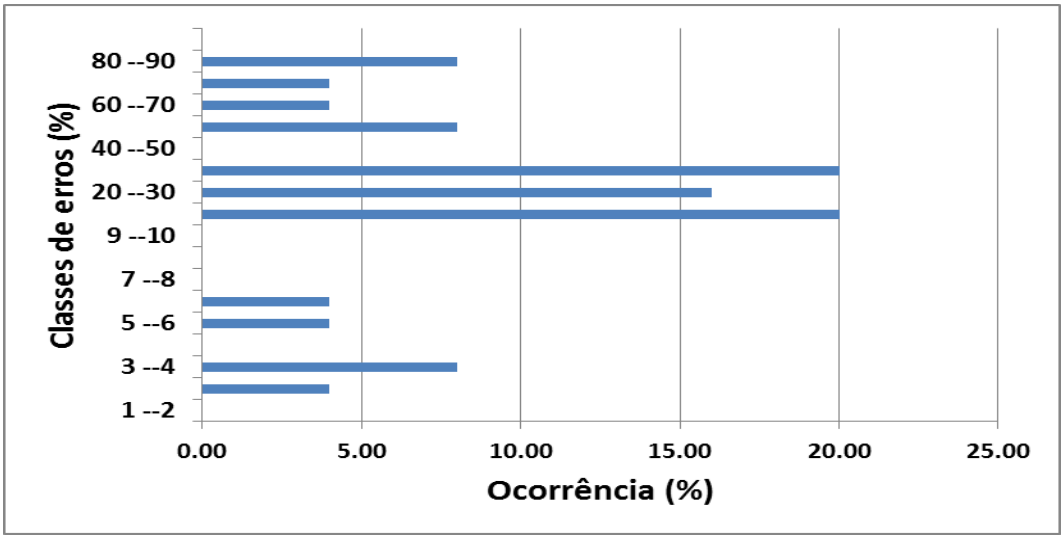

Figura 51: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 28/07/2005.

- **Correntes - 28/07/05**

O campo de velocidades de correntes no instante de vazão máxima (Figura 52) apresentou magnitudes de 0,05 a 0,45 m s^{-1} em direção ao oceano. O campo de velocidades residuais, apresentado na Figura 52, indica uma tendência próxima de zero do transporte durante o período monitorado. A velocidade residual em toda a seção demonstrou uma leve tendência de vazante (0,001 m s^{-1}), associada a um transporte de 11,4 m^3 s^{-1}.

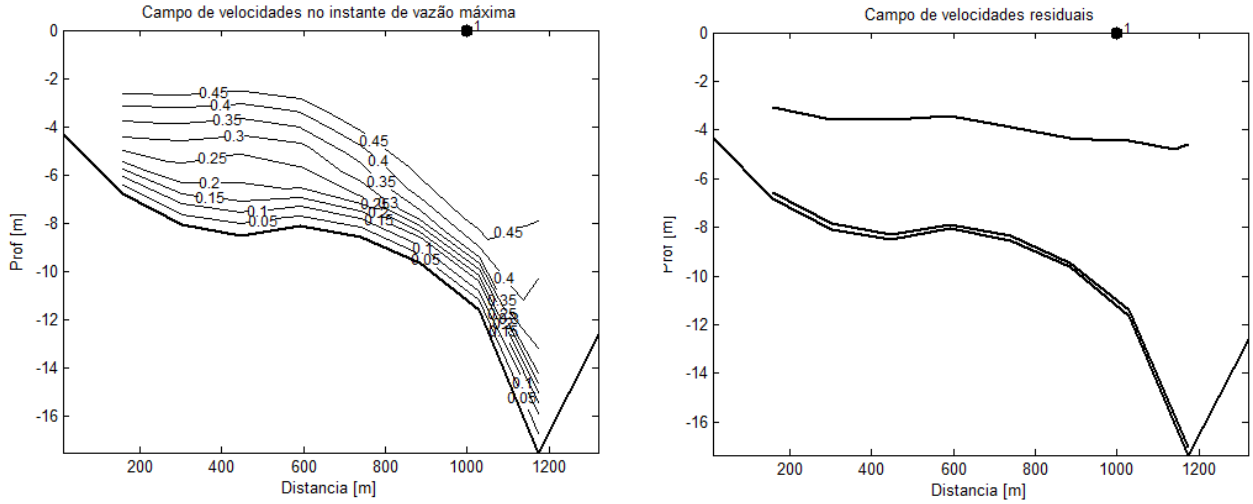

Figura 52: Campo de correntes (m s^{-1}) do perfil transversal do canal rio Serinhaém (Figura 19), para o ciclo de maré monitorado em 28/07/2005. O perfil batimétrico da seção (linha preta grossa) tem origem na margem esquerda do canal monitorado. O ponto 1 no gráfico indica o local onde foi extraído os dados de velocidade média na vertical da seção de ADCP.

As velocidades médias verticais das correntes retiradas no ponto 1 da seção de monitoramento de ADCP no rio Maraú em 29/07/2005 estão plotadas na Figura 53, juntamente com a maré simulada no local. A velocidade máxima registrada foi de 0,4 m s^{-1} durante a meia-maré de vazante.

O modelo reproduziu os picos de enchente e vazante, porém essas velocidades máximas estão sendo superestimadas (Figura 53). As correntes calculadas pelo modelo estão em fase com os dados observados nos instantes de máximas correntes. No entanto, observa-se que ocorre uma diferença de fase significativa durante as estofa de baixa-mar. O erro médio foi de 28%, a raiz do erro quadrado médio (REQ) foi 0,1 m s^{-1} e o coeficiente de correlação foi de 87%. A distribuição dos erros, apresentada na Figura 55, indica que a maior parte dos dados (21%) apresentaram erros entre 10 a 20%.

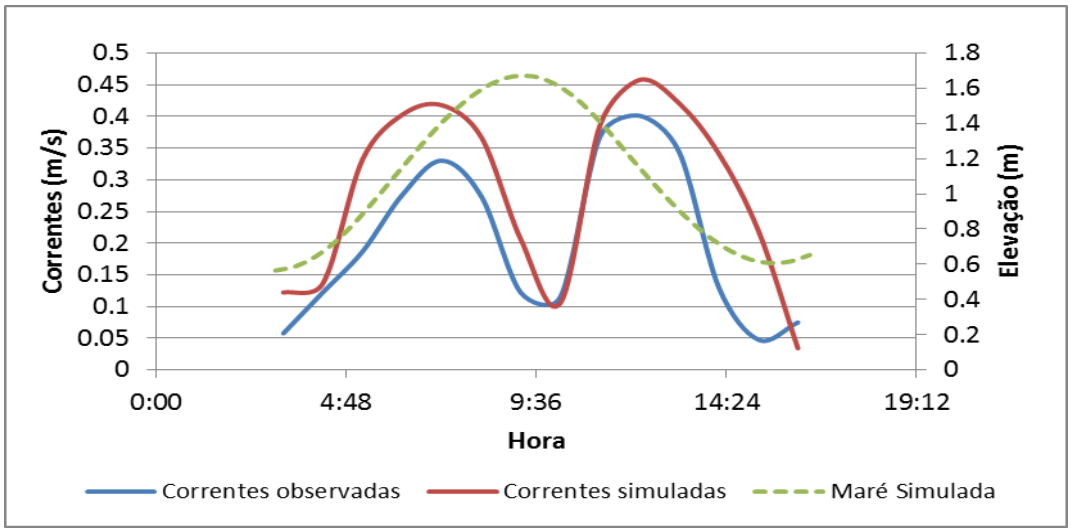

Figura 53: Velocidades das correntes observadas vs simuladas rio Serinhaém em 28/07/2005.

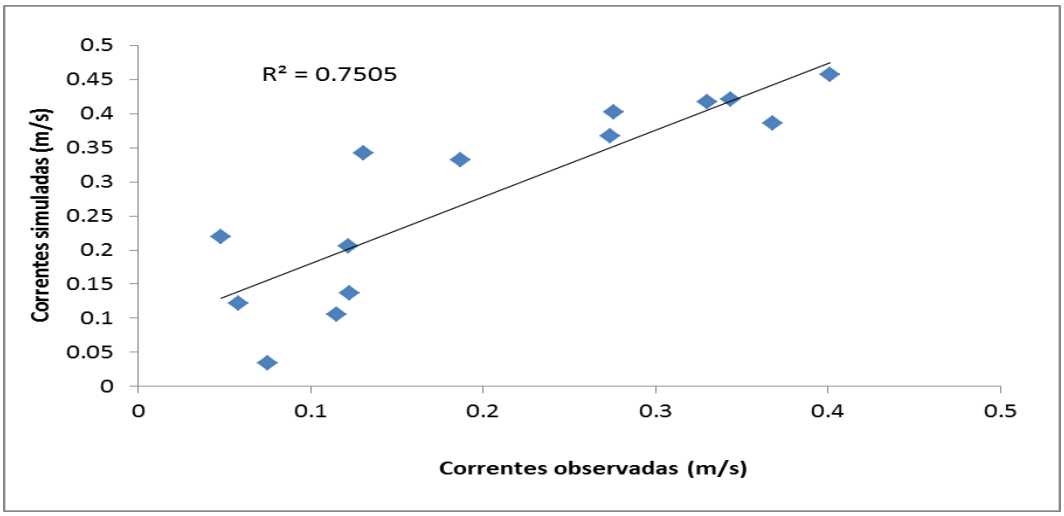

Figura 54: Ajuste linear entre as velocidades das correntes simuladas e observadas no rio Serinhaém em 28/07/2005. O valor R^2 indicado do gráfico equivale ao quadrado do coeficiente de correlação entre as duas séries de dados.

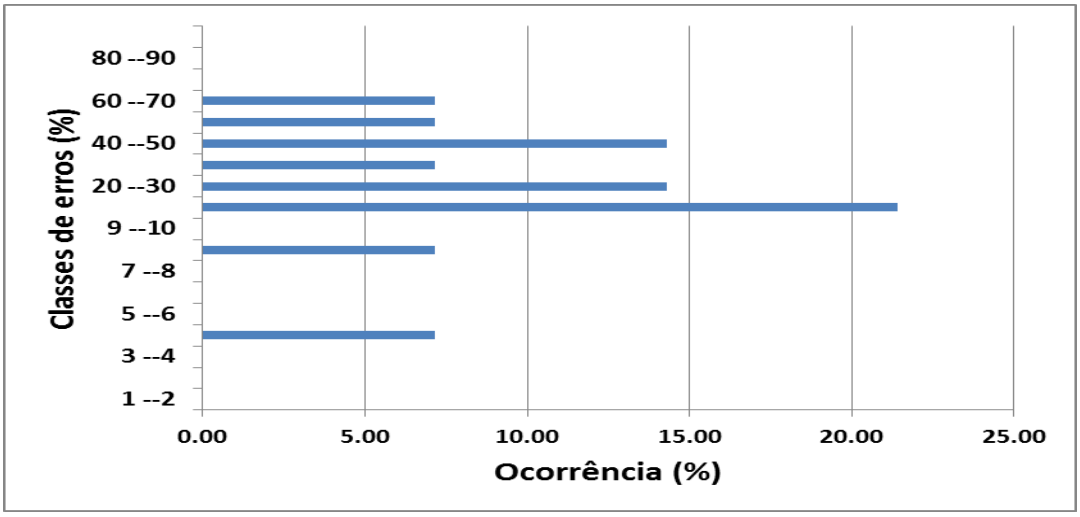

Figura 55: Distribuição dos erros do modelo em relação ao total de dados analisados em 28/07/2005.

5.2 SÍNTESES DA VALIDAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO E PADRÕES DE CIRCULAÇÃO RESULTANTES

Para caracterizar o ambiente através de um modelo hidrodinâmico, este deve ser capaz de simular os fenômenos que governam o ambiente em questão. Para conseguir tal precisão é necessário dispor de dados que representem fisicamente, com a maior fidelidade possível, o ambiente modelado. Entretanto, devido à insuficiência de dados é necessário muitas vezes fazer aproximações. No caso da modelagem da Baía de Camamu, foi adotado um esquema aproximado para representar a inclinação da região intermareal (que corresponde a 44% da área total), os efeitos meteorológicos não foram considerados e foi adotada uma densidade constante. Apesar das aproximações, o modelo RMA2 conseguiu reproduzir com fidelidade o sinal da maré astronômica na BC. Em relação aos fluxos observa-se que os resultados do modelo não foram tão fiéis aos dados observados em campo. O que se observou em geral, é que os maiores erros do modelo ocorreram em momentos de estofa, principalmente as de baixa-mar, quando as velocidades são mínimas. Nestes momentos o modelo não conseguiu acompanhar a fase do sinal de fluxo, o que pode ser atribuído às limitações do ADCP utilizado em medir fluxos muito lentos que ocorrem nestes instantes. Isso porque se verificou que o modelo foi capaz de reproduzir de forma aceitável a magnitude e a fase do sinal de fluxo nos instantes de máximas correntes e descargas.

A seguir são apresentados os padrões de circulação gerados pelo modelo. Nas figuras 56 a 59 são apresentados os campos de velocidade resultantes da simulação para o período de maré de sizígia, nos instantes de máximas velocidades: meia maré de enchente e meia maré de vazante. Os instantes selecionados pertencem ao último ciclo de maré da simulação mostrada na Figura 5. Observa-se que as correntes mais fortes ocorrem nos canais profundos que fazem a ligação da baía com o mar (ponta do Apaga-fogo e Barra do Mutá) e nos principais canais dos sistemas estuarinos, como: o canal do rio Serinhaém, o canal do rio Maraú, o canal a direita da Ilha Grande e nos canais dos rios da região central (Igrapiúna, Pinaré e Sorojó).

Como é difícil visualizar o padrão de correntes ao longo de toda a baía por causa da escala da mesma, optou-se por apresentar detalhes do escoamento na baía (Figuras 57 e 59) nas regiões com as velocidades mais expressivas. As Figuras 57 e 59 apresentam o padrão de correntes para a região detalhada nas Figuras 56 e 58 nos momentos de máximas velocidades (meia maré enchente e meia maré vazante, respectivamente). Pode-se observar que as velocidades são de aproximadamente 1.0 m/s neste momento, sendo que nos locais onde ocorre aprofundamento nos canais observam-se velocidade em torno de 1,2 m/s (amarelo). As velocidades máximas são da ordem de 1,38 m/s durante a meia maré de vazante, e ocorrem nas proximidades da Ilha Grande (canal do rio Maraú), na Barra do Mutá

e no canal do Serinhaém (Figura 59). As menores velocidades estão associadas aos períodos de estofa da maré, ou seja, quando o escoamento começa a inverter seu sentido que ocorre, em geral, meia-hora após a preamar e a baixa-mar.

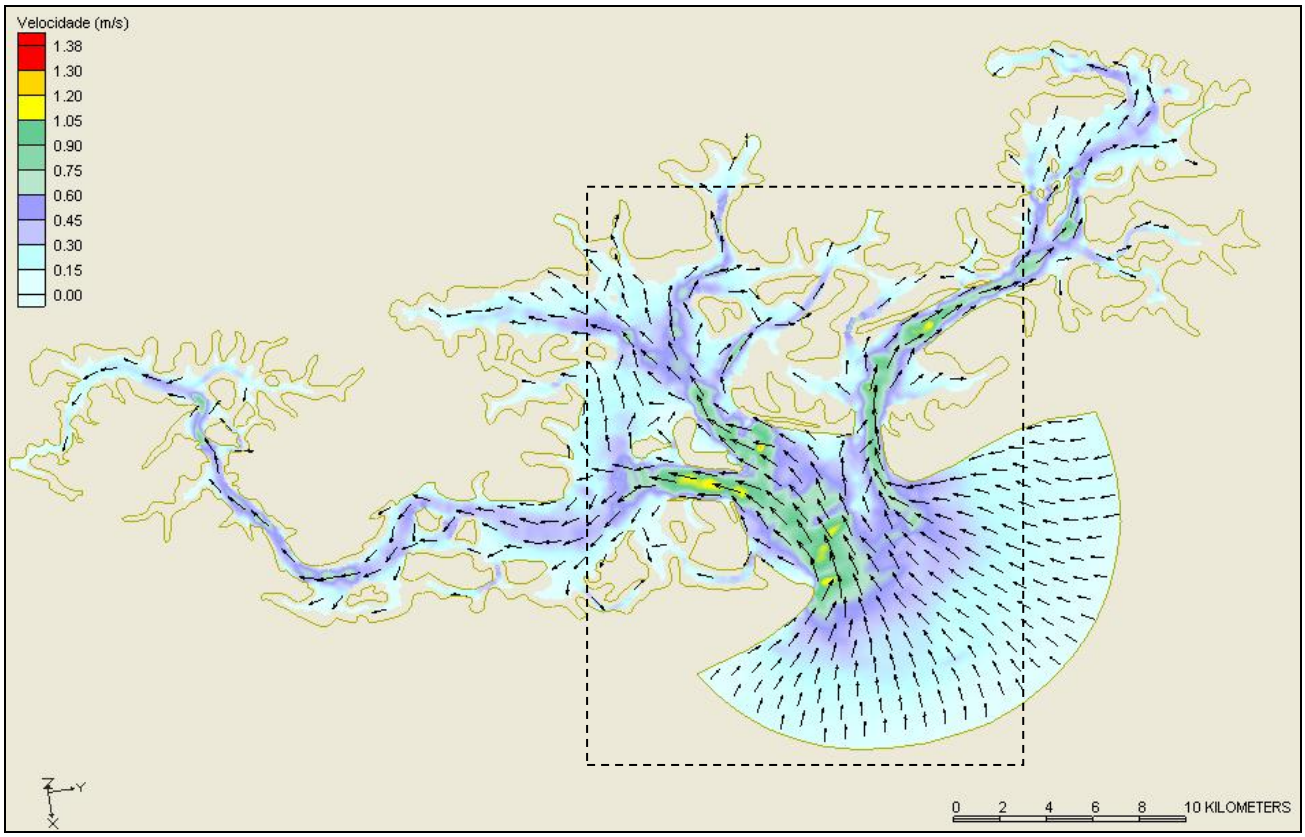

Figura 56: Campo de velocidades das correntes em meia maré enchente de sizígia.

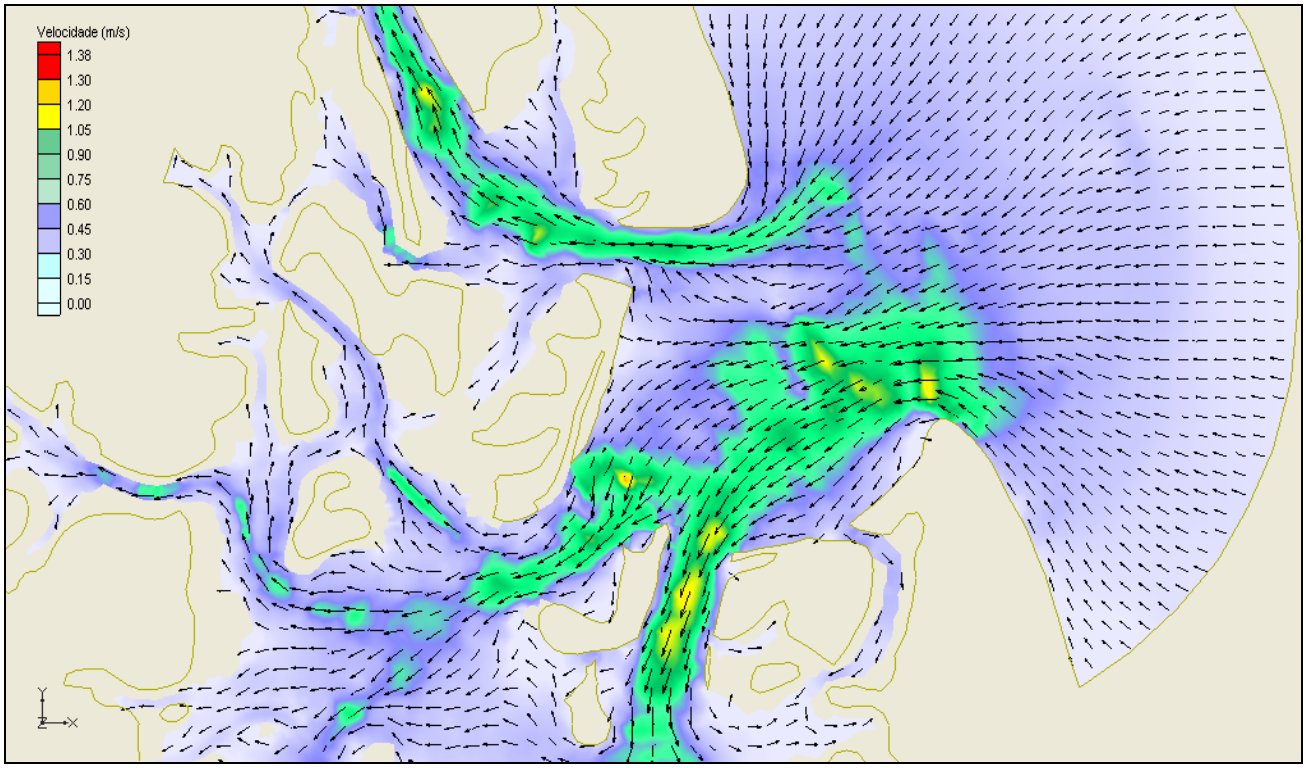

Figura 57: Campo de velocidades das correntes, em meia maré enchente de sizígia, nos locais das correntes mais intensas na BC. Detalhe da Figura 56.

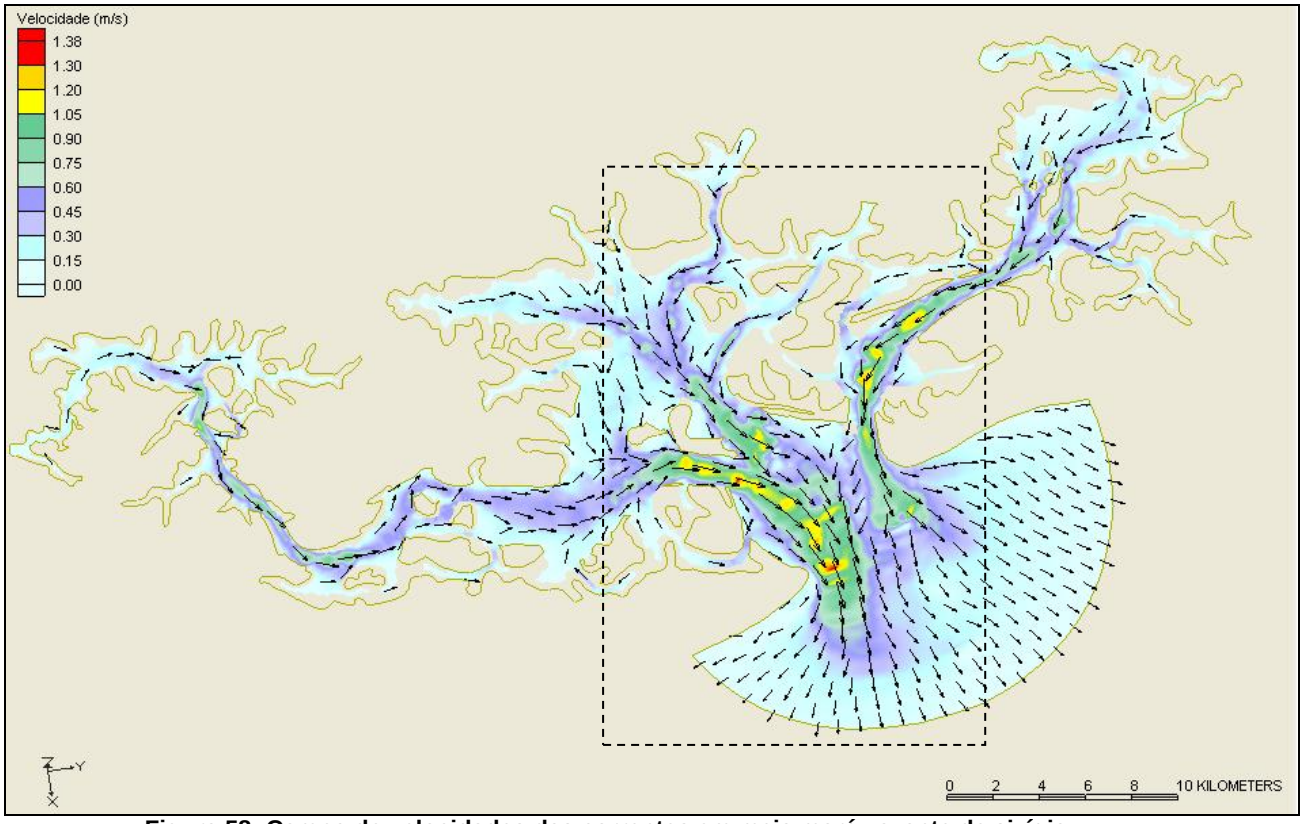

Figura 58: Campo de velocidades das correntes em meia maré vazante de sizígia.

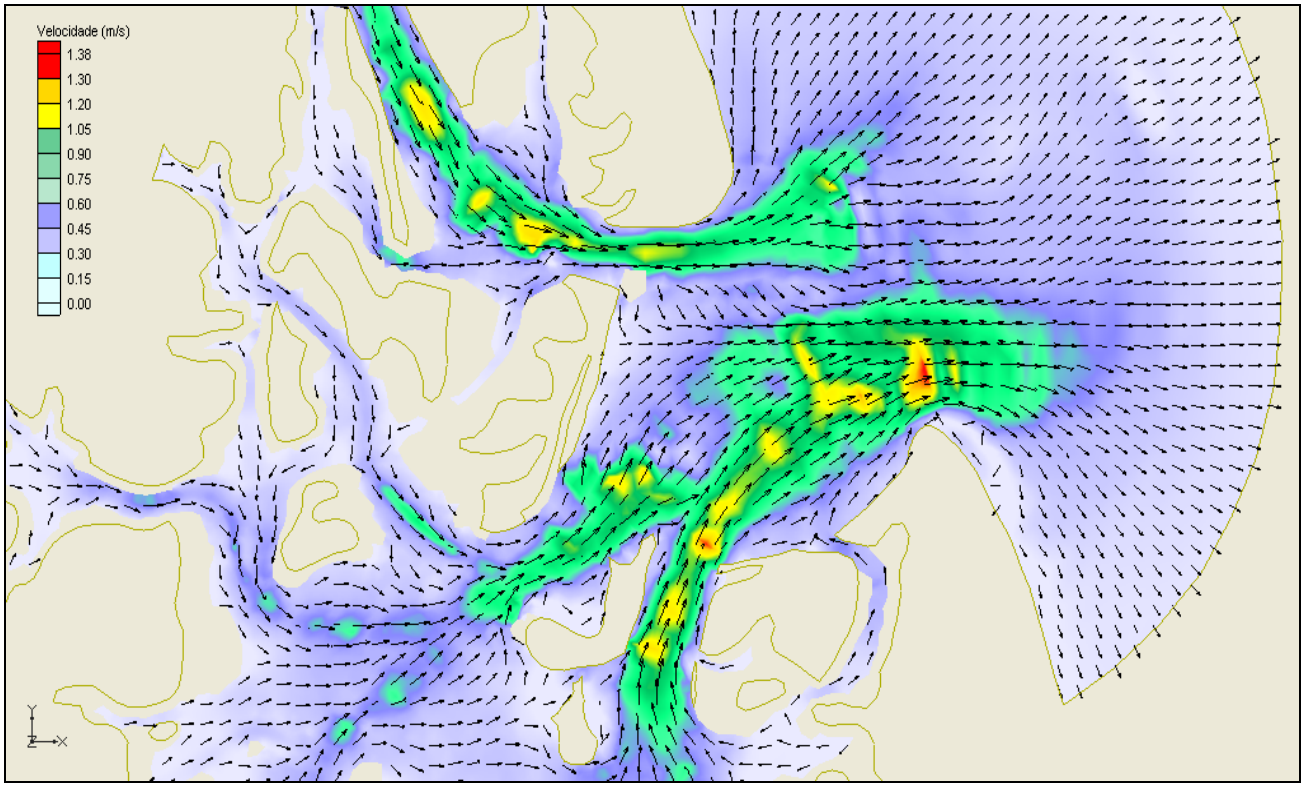

Figura 59: Campo de velocidades das correntes, em meia maré vazante de sizígia, nos locais das correntes mais intensas na BC. Detalhe da Figura 58.

As Figuras 60 a 63 apresentam os padrões de correntes para o caso de uma maré de quadratura para os instantes de meia maré de enchente e meia maré de vazante.

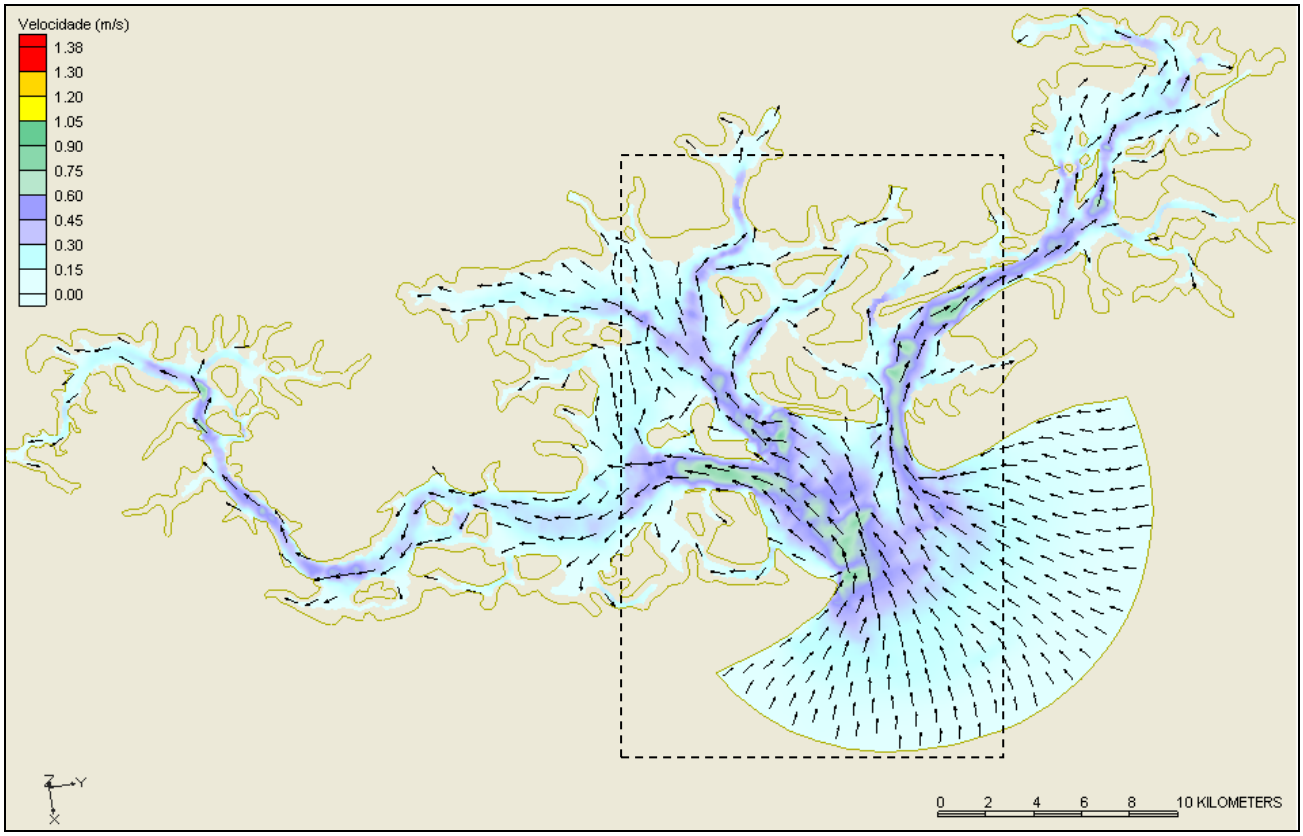

Figura 60: Campo de velocidades das correntes em meia maré enchente de quadratura.

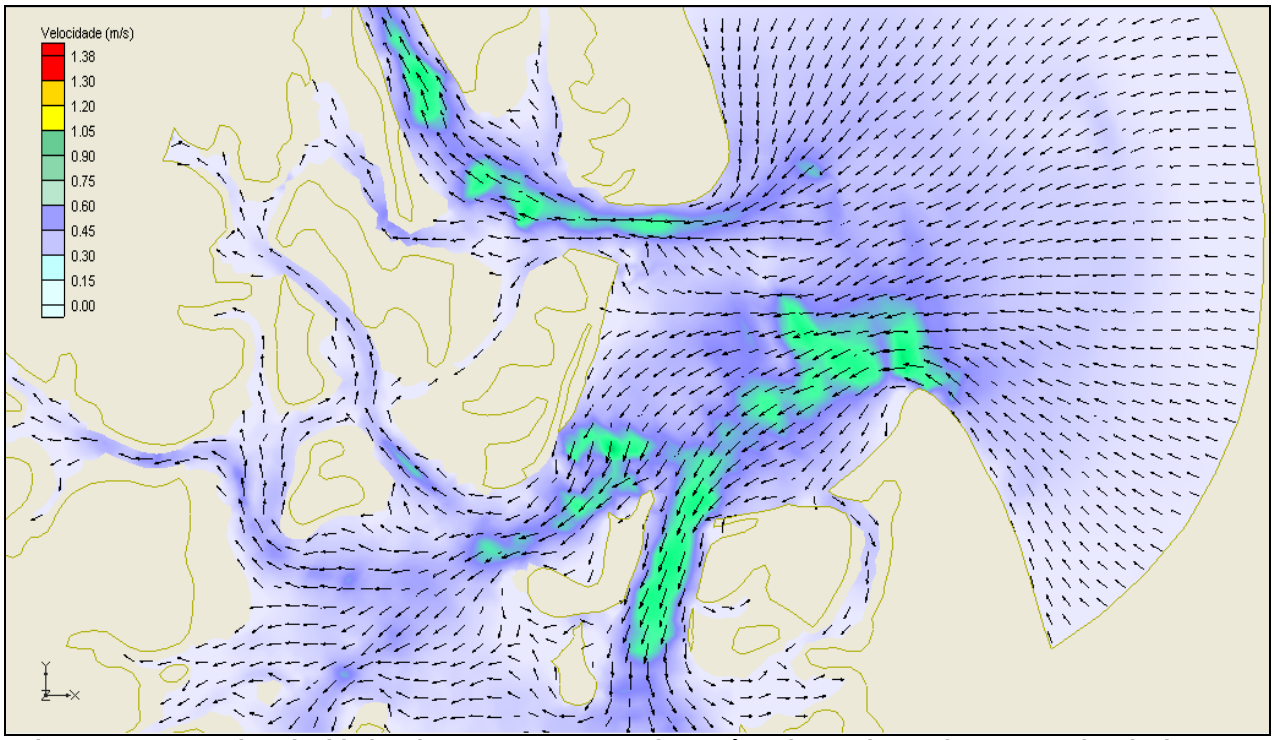

Figura 61: Campo de velocidades das correntes, em meia maré enchente de quadratura, nos locais das correntes mais intensas na BC. Detalhe da Figura 60.

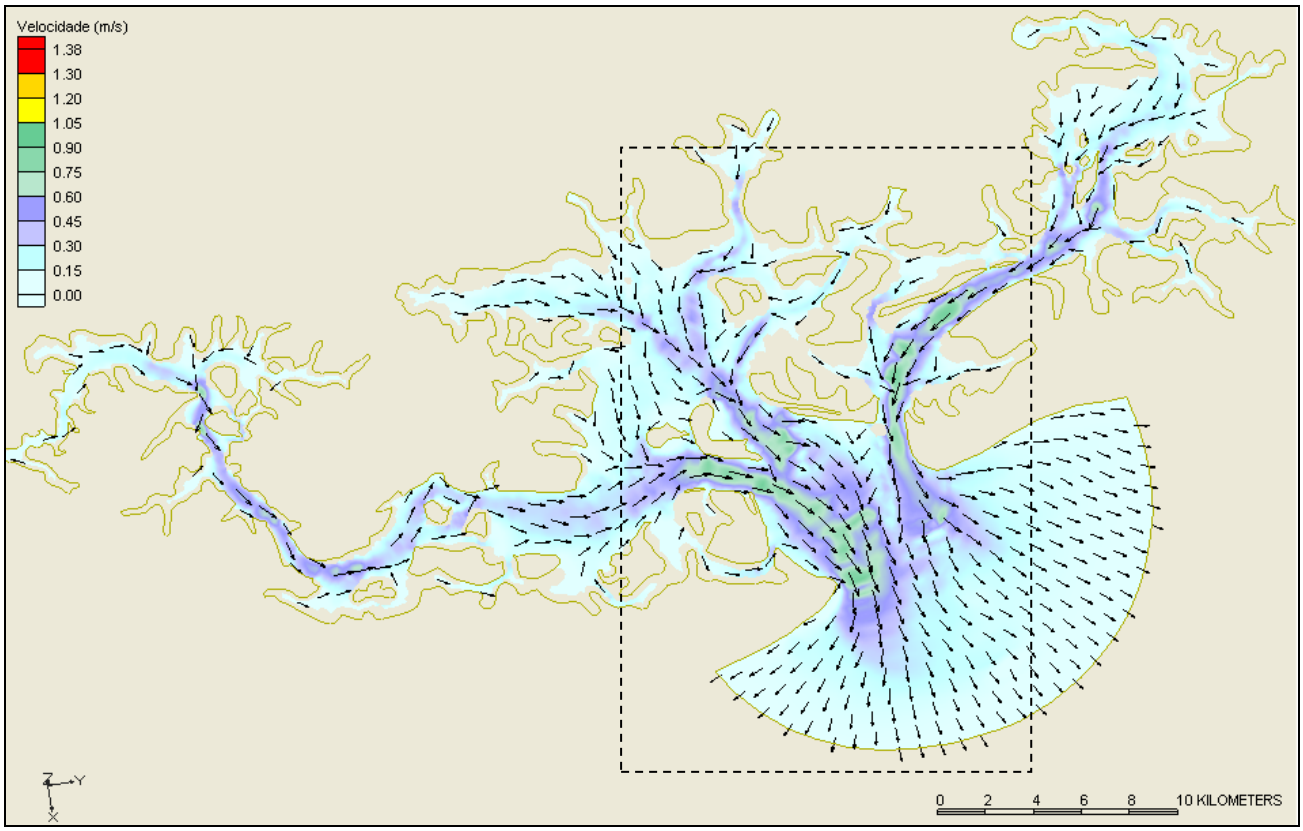

Figura 62: Campo de velocidades das correntes em meia maré vazante de quadratura.

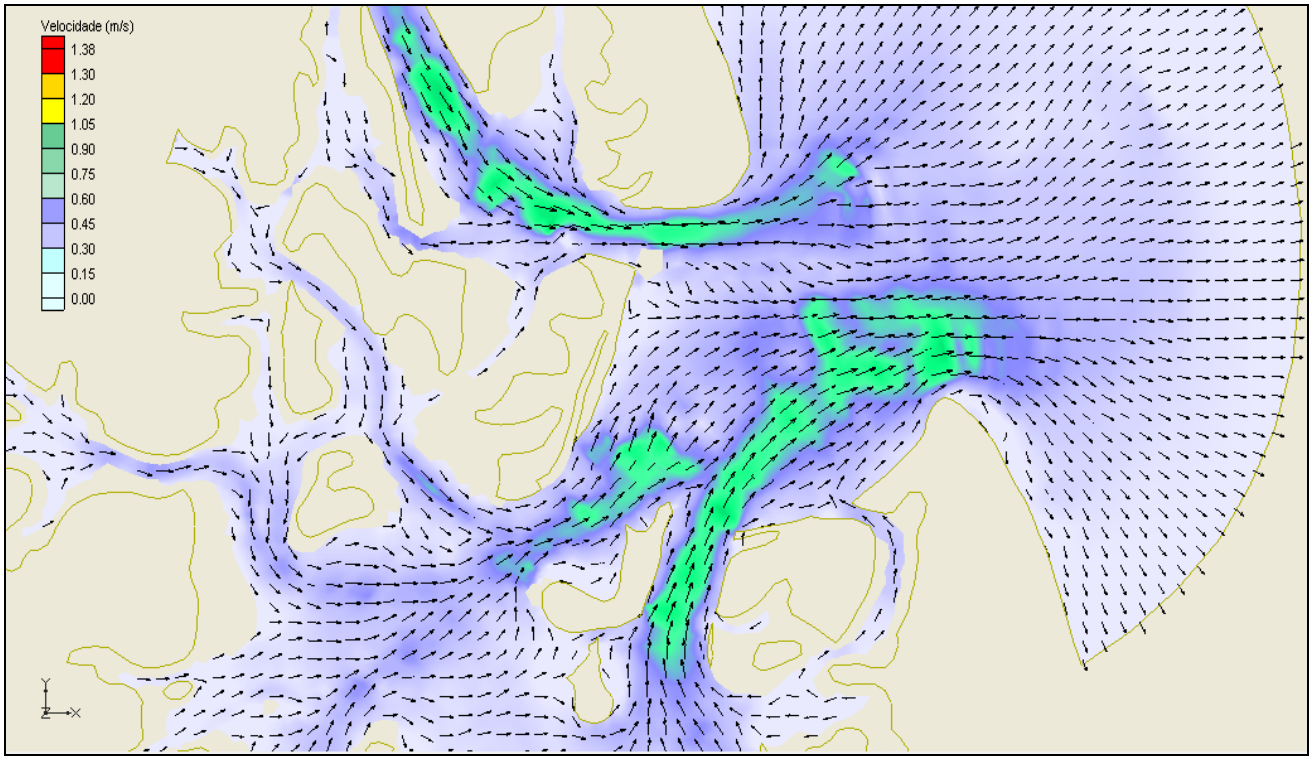

Figura 63: Campo de velocidades das correntes, em meia maré enchente de quadratura, nos locais das correntes mais intensas na BC. Detalhe da Figura 62.

Verifica-se, como esperado, que as velocidades neste caso são bem menores do que aquelas observadas durante uma maré de sizígia. Observa-se o mesmo padrão geral de escoamento simulado em condição de maré de sizígia, porém com velocidades máximas 30% menores, aproximadamente (Figuras 61 e 63).

A Figura 64 esta indicando as localizações dos pontos onde os dados de maré e velocidades foram retirados para posterior análise. O ponto E está localizado Fora da BC, enquanto que os pontos S3 e M3 ficam no trecho mais a montante dos estuários dos rios Serinhaém e Maraú, respectivamente.

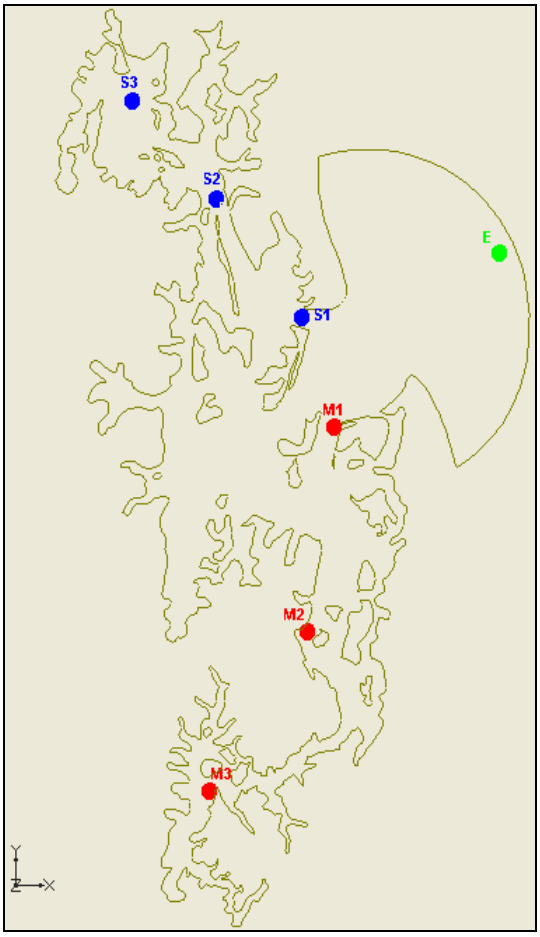

Figura 64: Localização dos pontos onde foram retirados os dados de maré e velocidade das correntes de maré.

As Figuras 65 e 66 apresentam a variação dos níveis d´água em pontos distintos (E, S3 e M3) da baía ao longo de dois ciclos de maré. A Figura 65 refere-se à maré de quadratura enquanto que a Figura 66 apresenta os resultados para a maré de sizígia.

Pode-se verificar na Figura 65, que durante a quadratura ocorre um atraso de fase de aproximadamente 1.5 horas, e de 2.0 horas, quando se compara os resultados entre a estação fora da baía (ponto E) e os pontos mais a montante dos estuários dos rios Serinhaém e Maraú (pontos S3 e M3, respectivamente). A maré no ponto S3 sofre uma

amplificação em torno de 12 cm em relação ao ponto E, enquanto que no ponto M3 ocorre uma amplificação de aproximadamente 10 cm. Durante a sizígia, Figura 66, o atraso de fase na estofa de preamar é similar ao período de quadratura, porém na estofa de baixa-mar ocorre um atraso de fase de aproximadamente 1.5 horas e de 2.5 horas quando se compara os resultados entre a estação fora da baía (ponto E) e os pontos mais a montante dos estuários dos rios Serinhaém e Maraú (pontos S3 e M3, respectivamente). A maré no ponto S3 sofre uma amplificação em torno de 8 cm em relação ao ponto E, enquanto que no ponto M3 ocorre uma amplificação de aproximadamente 2 cm.

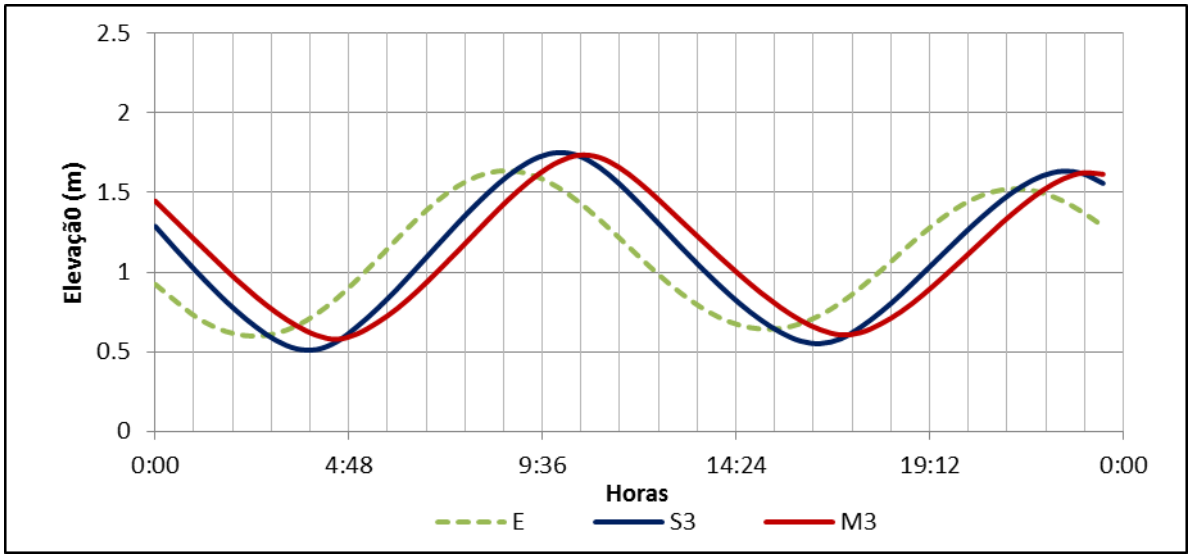

Figura 65: Variação do nível d'água nos pontos E, S3 e M3 durante uma maré de quadratura.

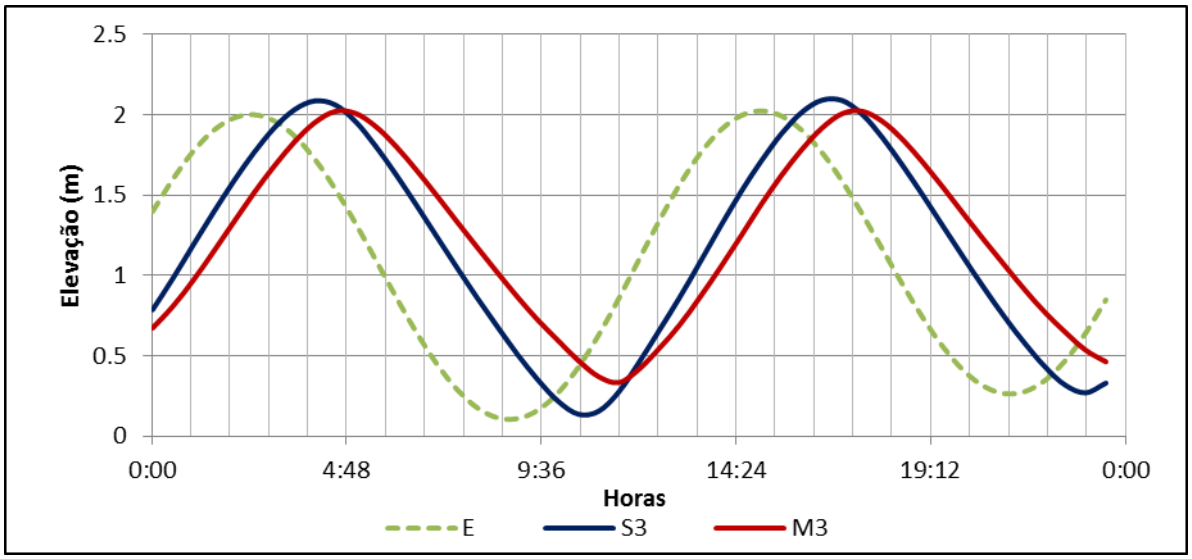

Figura 66: Variação do nível d'água nos pontos E, S3 e M3 durante uma maré de sizígia.

Diferentemente das correntes de maré em águas oceânicas, a velocidade das correntes em estuários e canais não está em fase com a amplitude da maré (DYER, 1997). Em águas

oceânicas, a maré se propaga como uma onda progressiva, e máximos valores de correntes de maré são observados na baixa-mar e na preamar, sendo que a inversão da direção ocorre aproximadamente na metade do tempo da vazante e da enchente. Já em estuários (HICKS, 2006), geralmente a maré é a combinação de uma onda progressiva com uma onda estacionária, e deste modo as velocidades máximas de corrente de maré são encontradas aproximadamente no meio da vazante e da enchente, e a mudança da direção da corrente ocorre na baixa-mar e na preamar.

A análise comparativa entre a amplitude da maré e o módulo da velocidade das correntes de maré (Figuras 67 e 68), para os pontos indicadas na Figura 64, permitiu notar que dentro da Baía de Camamu a maré comportou-se como uma mistura de uma maré progressiva com uma maré estacionária, visto que foi observada uma defasagem entre as estofas de enchente e vazante em relação às estofas de preamar e baixa-mar. Esse caráter progressivo vai diminuindo em direção a montante do estuário (Figuras 67 e 68).

Para o estuário do Serinhaém, Figura 67, pode-se verificar que as maiores velocidades acontecem à jusante do estuário (ponto S1), enquanto que as velocidades no trecho do estuário mais a montante (ponto S3) são mais fracas ao longo do ciclo de maré. Nas estações E e S1 as velocidades de vazante são as mais intensas, enquanto que na estação S2 essa tendência vai sendo modificada. A partir da estação S3, observa-se que prevalece às velocidades de enchente como as mais intensas. De todo modo, uma análise pontual das velocidades deve ser feita de maneira cautelosa visto que as velocidades são muito sensíveis à geometria do local, de modo que a velocidade em um dado ponto não seja representativa de um trecho do estuário.

A análise comparativa entre a altura da maré e a velocidade das correntes de maré, para o ponto S1, demonstra um atraso de aproximadamente 1 hora independente se a maré é de quadratura ou de sizígia (Figura 67). Este atraso indica que a maré neste local é a combinação de uma onda estacionaria com uma onda progressiva. No ponto S2, localizado um pouco mais no interior do estuário, a onda também é um pouco progressiva, mas o atraso parece ser um pouco menor, em torno de 30 minutos (em fase) na estofa de enchente, e de 1 hora (30minutos) na estofa de vazante para a maré de sizígia (quadratura). No ponto S3, localizado a montante do estuário, o caráter progressivo é menor, com atraso de 30 minutos na sizígia. Durante a quadratura verifica-se um atraso (em fase) de 30 minutos na estofa de enchente (vazante).

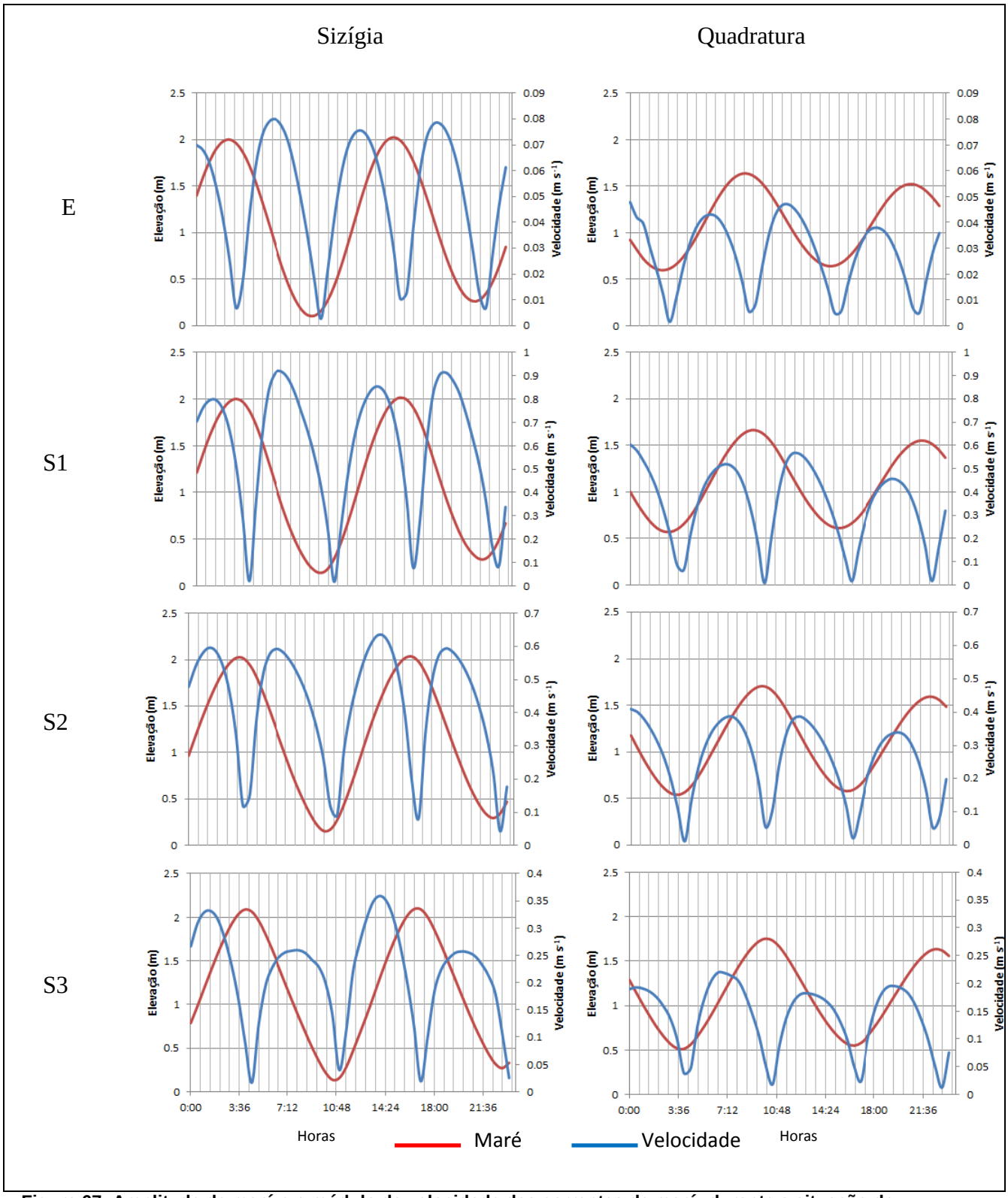

Figura 67: Amplitude da maré e o módulo da velocidade das correntes de maré, durante a situação de sizígia e quadratura, em pontos do estuário do rio Serinhaém.

Para o estuário do Maraú, Figura 68, pode-se verificar que as maiores velocidades acontecem à jusante do estuário (ponto M1), enquanto que as velocidades no trecho intermediário do estuário (ponto M2) são mais fracas ao longo do ciclo de maré. Nas

estações E e M2 as velocidades de vazante são as mais intensas, enquanto que na estação M1 existe uma alternância entre as enchentes e vazantes mais intensa. A partir da estação M3, observa-se a dominância das velocidades de enchente como as mais intensas.

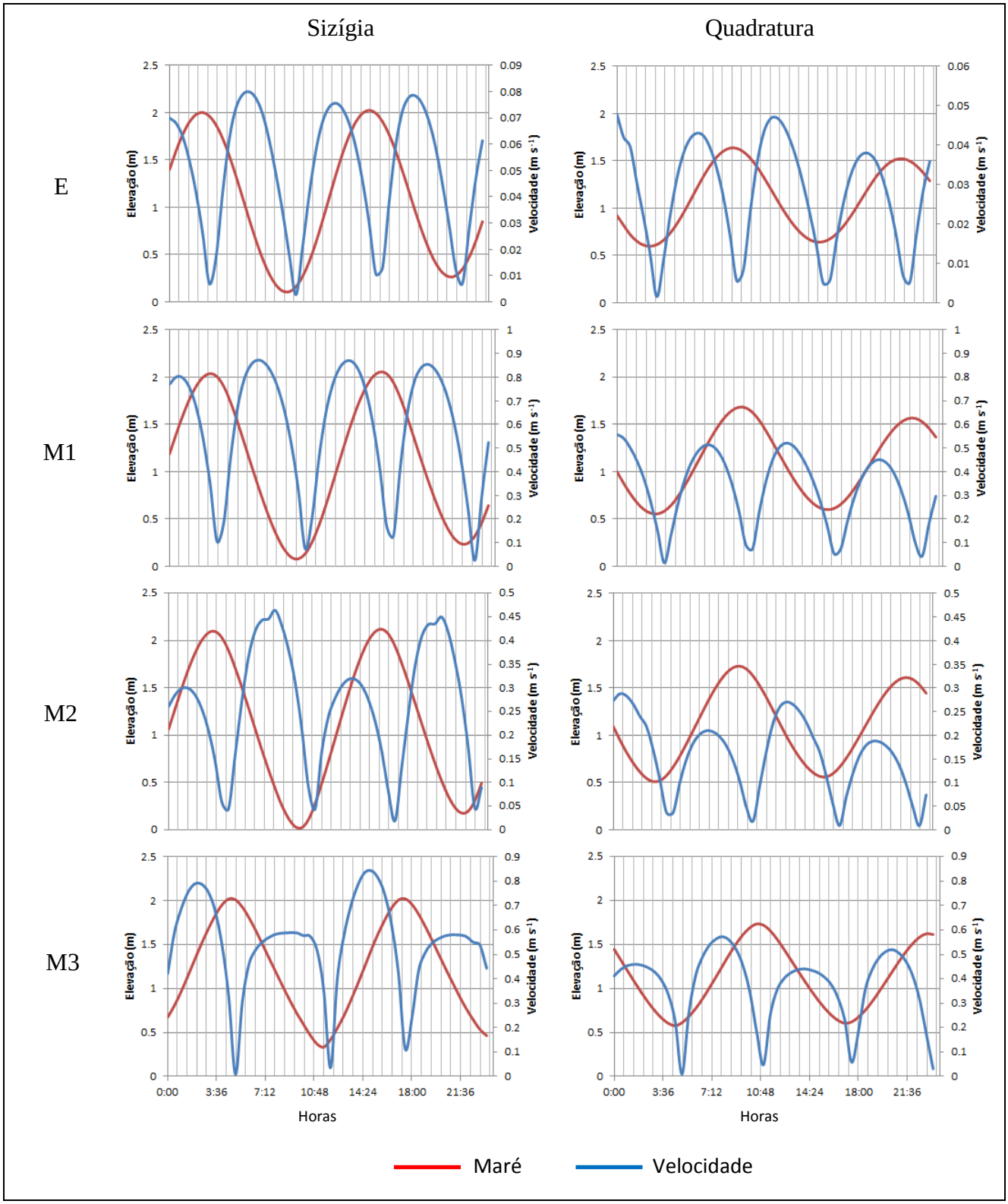

Figura 68: Amplitude da maré e o módulo da velocidade das correntes de maré, durante a situação de sizígia e quadratura, em pontos do estuário do rio Maraú.

A análise comparativa entre a altura da maré e a velocidade das correntes de maré, para o ponto M1, demonstrou um atraso de aproximadamente 30 minutos na maré de sizígia, e de 1 hora (30minutos) na estofa de enchente (vazante) na situação de quadratura (Figura 68). Este atraso indica que a maré neste local é a combinação de uma onda estacionaria com uma onda progressiva. No ponto M2, localizado um pouco mais no interior do estuário, a onda apresenta uma característica progressiva mais forte, com o atraso um pouco maior, em torno de 1 hora independente da maré. No ponto M3, localizado a montante do estuário, o caráter progressivo é menor, com atraso de 30 minutos para sizígia e quadratura.

5.3 Capacidade de Renovação das águas

A capacidade de renovação das águas da Baía de Camamu foi avaliada em uma simulação de 30 dias, utilizando-se como condição de contorno a série de maré apresentada na Figura 5 e a vazão dos principais rios (tabela 2). Para facilitar o entendimento na apresentação dos resultados da capacidade de renovação, a baía foi divida em quatro regiões (Figura 69): entrada da baía (estações antecedidas com **E**), rio Serinhaém (estações antecedidas com **S**), central (estações antecedidas com **C**), rio Maraú (estações antecedidas com **M**).

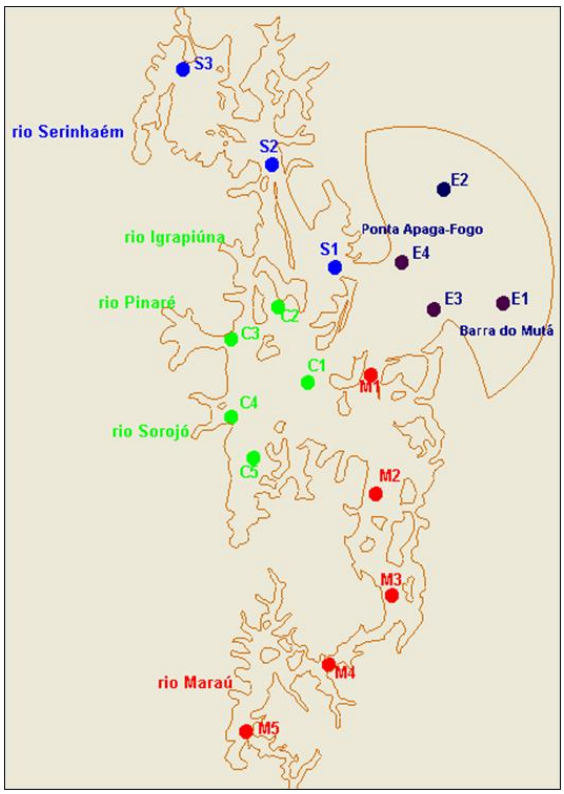

Figura 69: Estações de controle para as simulações da capacidade de renovação.

Da Figura 70 a 73 estão plotadas as curvas de renovação das águas em diferentes pontos na Baía de Camamu (ver estações de controle na Figura 69). Nos gráficos das curvas de

renovação observa-se um processo oscilatório de renovação das águas devido ao fluxo e refluxo causado pelas correntes de maré, de forma que um determinado local do estuário pode receber porções de “água suja” (i.e., provenientes de outras regiões do estuário) mesmo após ter atingido um valor de renovação superior. As maiores oscilações nas curvas de decaimento resultam das fortes correntes de sizígia, enquanto que na quadratura ocorre o oposto.

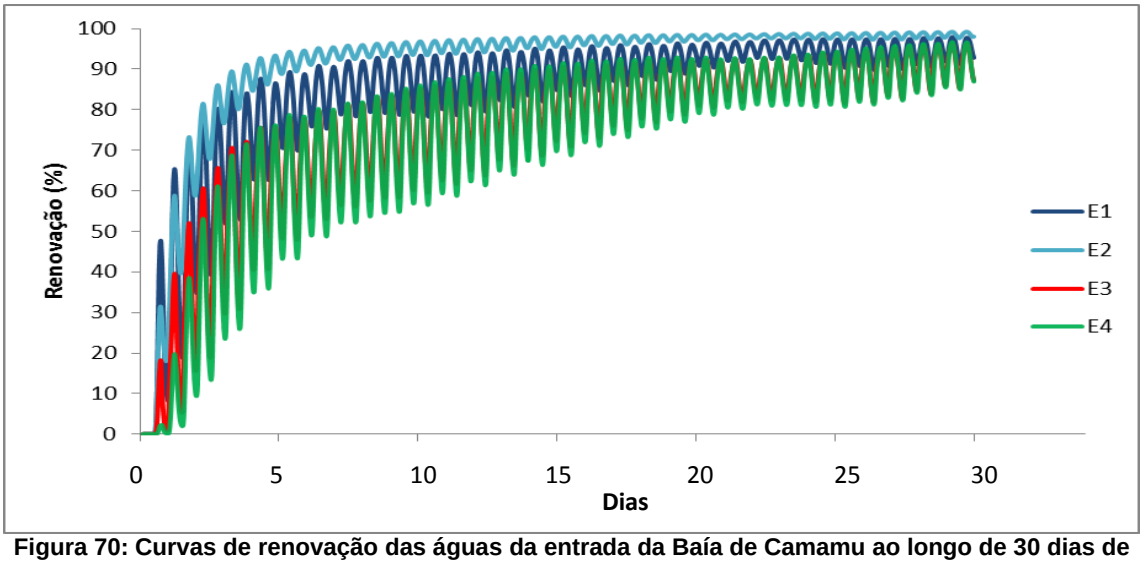

Figura 70: Curvas de renovação das águas da entrada da Baía de Camamu ao longo de 30 dias de simulação. Ver posicionamento das estações de controle na figura 69.

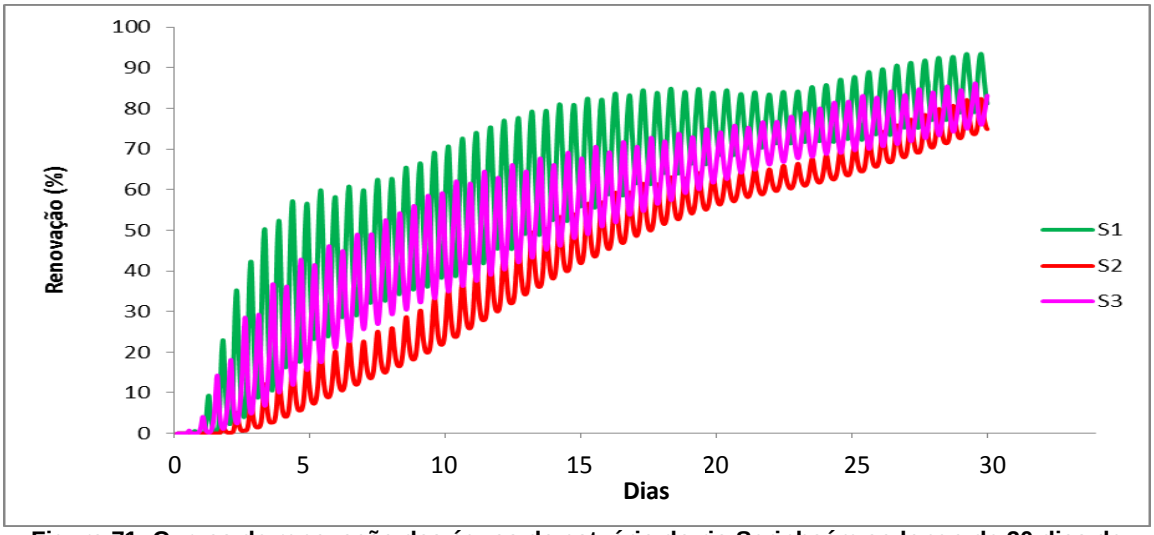

Figura 71: Curvas de renovação das águas do estuário do rio Serinhaém ao longo de 30 dias de simulação. Ver posicionamento das estações de controle na figura 69.

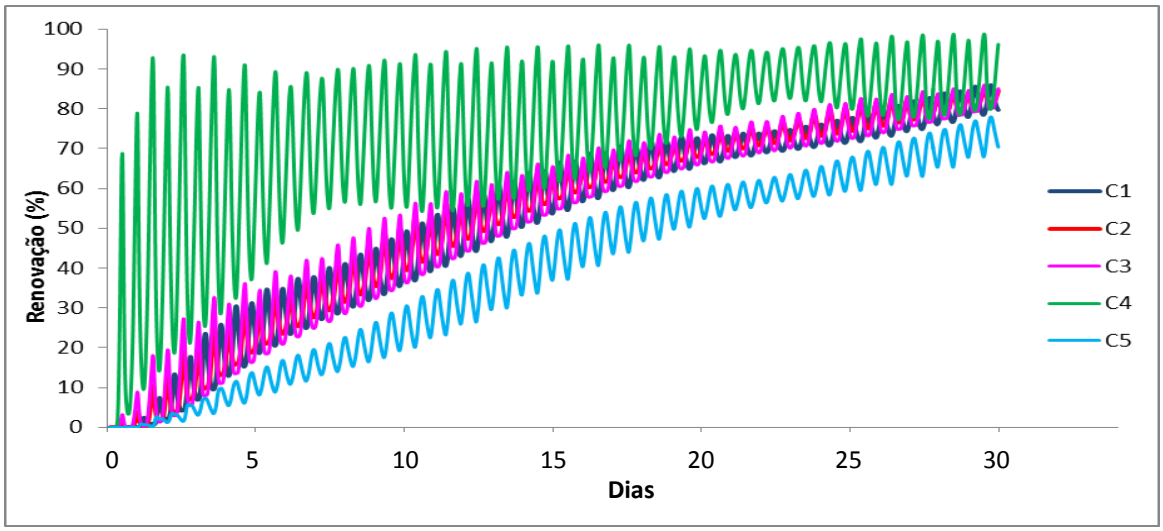

Figura 72: Curvas de renovação das águas da região central ao longo de 30 dias de simulação. Ver posicionamento das estações de controle na figura 69.

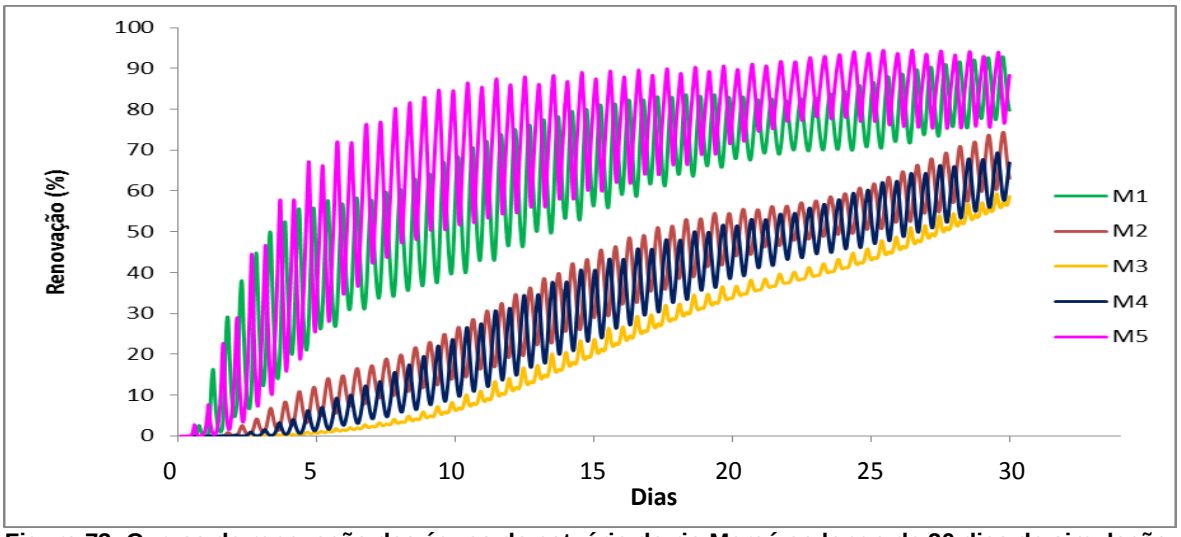

Figura 73: Curvas de renovação das águas do estuário do rio Maraú ao longo de 30 dias de simulação. Ver posicionamento das estações de controle na figura 69.

Em geral, as regiões mais próximas da boca da baía e das cabeceiras dos rios apresentam as melhores capacidades de renovação enquanto que o médio curso dos estuários apresenta uma fraca capacidade de renovar suas águas (Figura 70 até 73). Na Figura 72, que apresenta a capacidade de renovação das águas para a região central, verifica-se que as estações com as melhores capacidades de renovação estão localizadas próximas dos rios que possuem as maiores vazões (rios Igrapiúna e Sorojó).

As Figuras 74 e 75 mostram o percentual de renovação das águas da BC ao longo dos 30 dias de simulação. O resultado da simulação mostra que o interior da baía não se renova completamente em 30 dias.

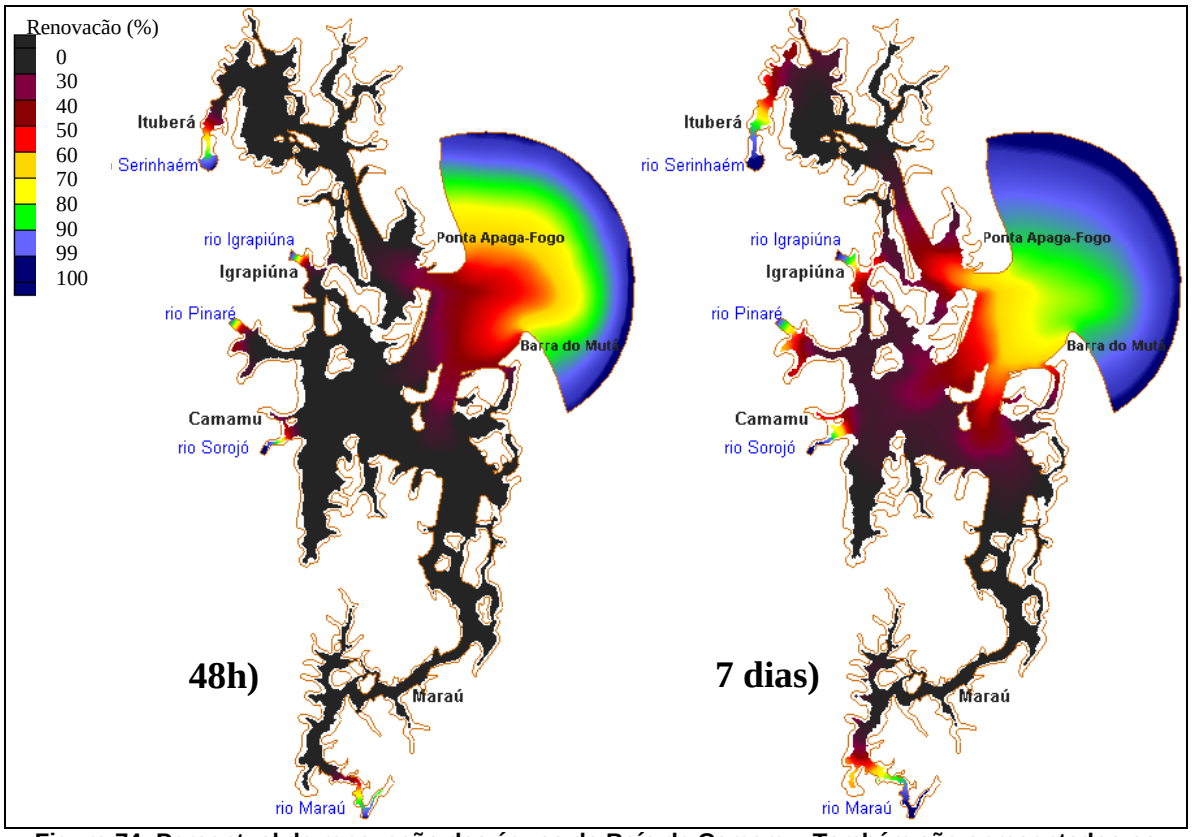

Figura 74: Percentual de renovação das águas da Baía de Camamu. Também são apresentados os principais rios e cidades ao redor da BC.

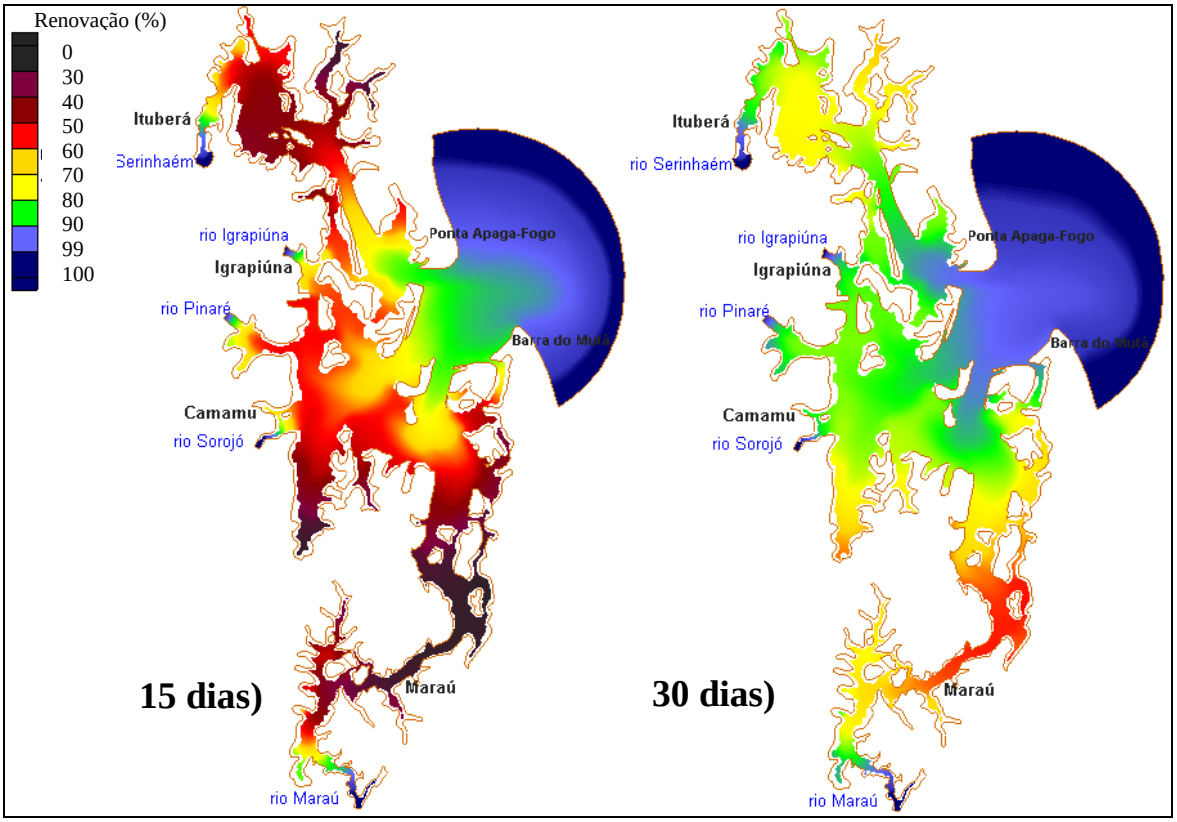

Figura 75: Percentual de renovação das águas da Baía de Camamu. Também são apresentados os principais rios e cidades ao redor da BC.

Pode-se verificar que o médio curso do estuário do rio Maraú apresenta as piores taxas de renovação, isto porque as correntes de enchente são mais intensas do que as correntes de vazante tanto para situação de sizígia quanto para quadratura, sendo que em quadratura a diferença é mais acentuada. Com isso, ocasiona-se um transporte com tendência de enchente, dificultando que a ´´água velha`` seja eliminada. Tal fato pode ser explicado pela pequena extensão da planície de inundação neste trecho, ocasionando enchentes mais fortes. Já o estuário do rio Serinhaém apresenta uma melhor capacidade de renovação devido ao fato do prisma de vazante ser maior do que o prisma de enchente na situação de quadratura, permitindo que durante esta fase a ´´água velha`` possa ser eliminada com maior eficiência.

No entanto, quando analisamos um cenário mais realista (63% de renovação) percebemos que grande parte das águas da baía se renova em 30 dias (Figuras 76 e 77). Os resultados das simulações indicam que o médio curso do estuário do rio Maraú merece uma atenção especial a cerca das questões ambientais, visto que esta é uma área naturalmente favorável ao acúmulo de contaminantes graças à lenta renovação de suas águas.

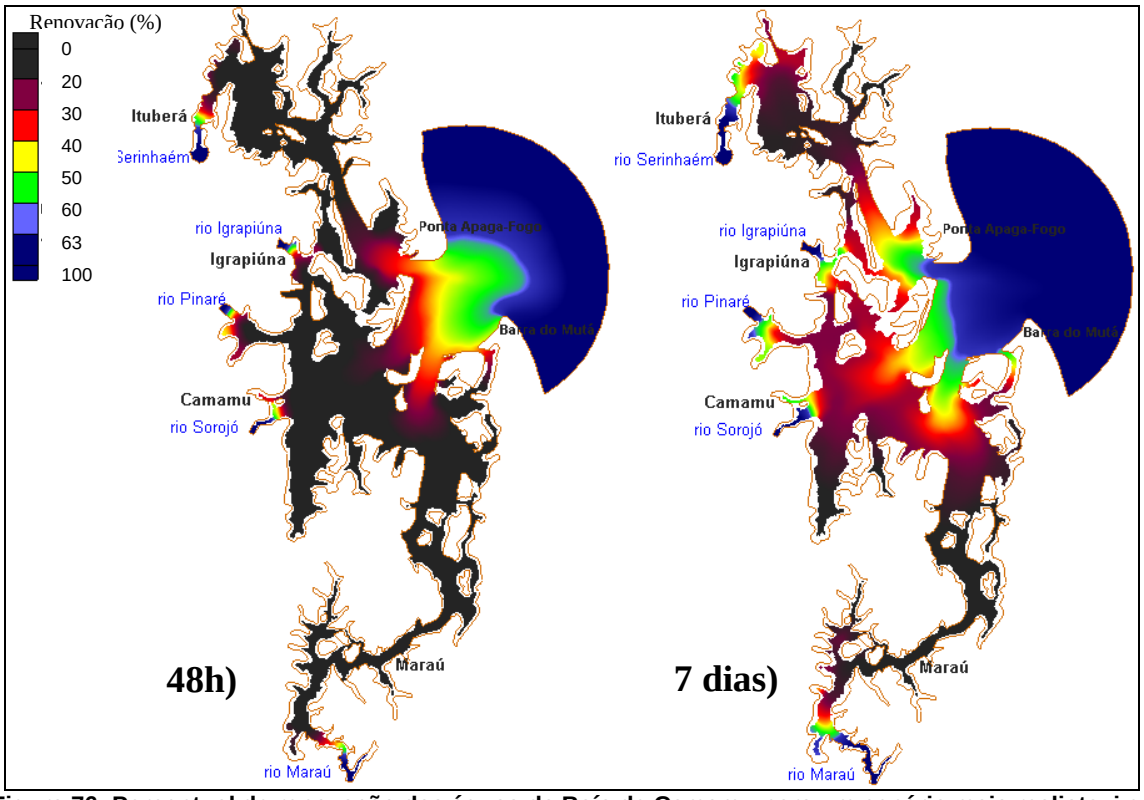

Figura 76: Percentual de renovação das águas da Baía de Camamu para um cenário mais realista, i.e., com 63% de renovação. Também são apresentados os principais rios e cidades ao redor da BC.

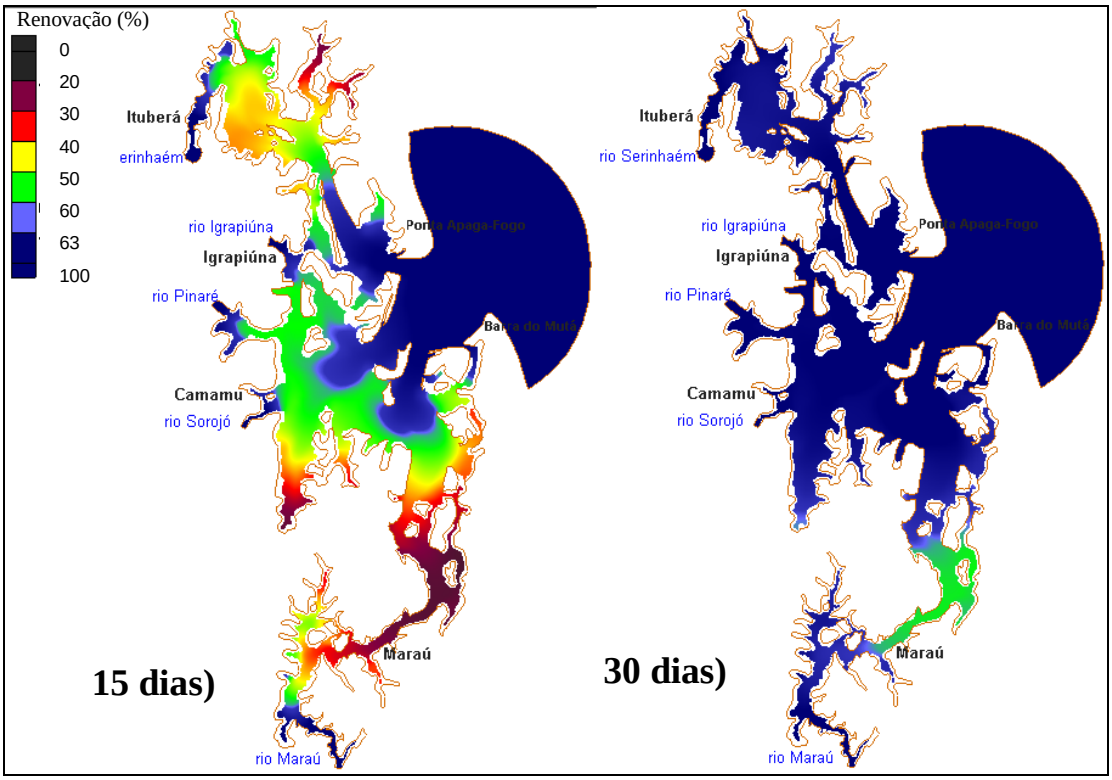

Figura 77: Percentual de renovação das águas da Baía de Camamu para um cenário mais realista, i.e., com 63% de renovação. Também são apresentados os principais rios e cidades ao redor da BC.

Como as águas da baía não se renovam completamente em 30 dias, os tempos de renovação a 100% e 63% foram calculados utilizando uma projeção logarítmica com base nas curvas de renovação calculadas anteriormente. A Figura 78 demonstra o tempo de renovação a 100% e 63%.

Em geral, pode-se dizer que a BC apresenta um tempo de renovação similar a algumas baías brasileiras, de 11 a 35 dias considerando 63% de renovação. O cálculo do tempo de renovação para 100% de renovação tende a apresentar valores superestimados (de 50 a 75 dias) devido a fração residual do traçador demorar muito tempo para ser eliminado, quando comparados ao tempo de residência para 63% de renovação. Simulações realizadas por Xavier (2002) indicam que as águas da Baía de Todos os Santos se renovam completamente em aproximadamente 3 meses, sendo que em 12 dias ocorre a renovação de 90%. Gaze (2005) indicou através de simulações que a baía de vitória apresenta tempo de residência relativamente elevados, entre 10 e 22 dias.

A saída da baía apresenta o menor tempo de residência, aproximadamente 12 dias. Os locais mais próximos das cabeceiras dos rios apresentam tempo de residência inferior ao médio curso estuarino devido à vazão fluvial que insere ´´águas novas`` no sistema. O estuário do rio Maraú apresenta os maiores tempos de residência. Vale ressaltar que regiões com maiores tempos de residência tendem a serem mais impactadas, por terem baixas renovações de água, a lançamentos de poluentes do que regiões com menores tempos de residência.

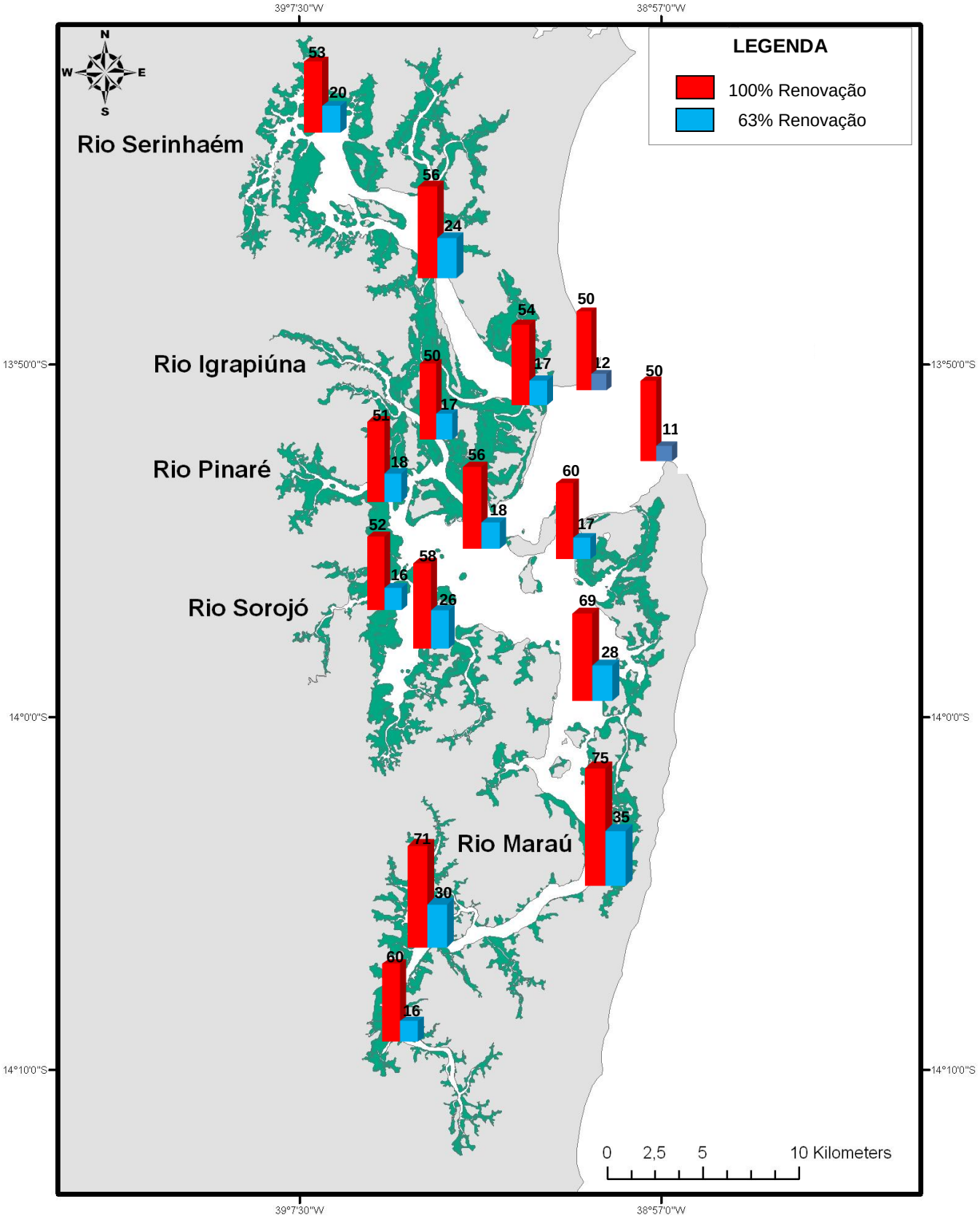

Figura 78: Tempo de renovação, em dias, das águas na Baía de Camamu.

Além disso, tempo de residência fornece uma estimativa em relação a capacidade de florações algais de um determinado ecossistema, pois ele indica se as microalgas terão no ambiente tempo de permanência suficiente para seu desenvolvimento. Ou seja, ambientes com menores tempos de residência terão menores possibilidades de ocorrerem florações quando se comparado com os ambientes com tempos de residência mais elevados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do ponto de vista científico, a Baía de Camamu (BC) é uma região ainda pouco estudada, ao passo que do ponto de vista econômico a BC é uma região em crescente expansão imobiliária e com um potencial enorme para o ecoturismo devido a suas características naturais. Desta forma, o intuito desta investigação foi fornecer, mesmo que numa primeira aproximação devido à escassez de dados observacionais, uma visão geral da circulação hidrodinâmica na BC através do modelo numérico bi-dimensional RMA2 (Research Management Associates, Version 4.45).

Apesar dos resultados numéricos apresentarem uma tendência a superestimar os valores de velocidade de correntes de maré, qualitativamente as simulações conseguiram capturar o comportamento e a tendência dos dados observacionais para o período de 20 a 29 de julho de 2005.

A análise dos resultados numéricos indica que cerca de 80% dos valores de erro médio percentual absoluto encontram-se em classes de erro inferiores a 10%. Além disso, o histograma apresentou uma distribuição bimodal, com a maioria dos valores concentrados em classes inferiores a 4% e 10-20%. Acredita-se que as maiores diferenças entre observação e simulação sejam decorrentes da falta de detalhamento batimétrico e da ausência de estudos hidrológicos na região que permitissem a avaliação do escoamento em regiões de pouca profundidade e da parametrização estresse de fundo.

Outro resultado importante foi a investigação do tempo de renovação das águas interiores do complexo estuarino da Baía de Camamu através da ultilização de um traçador passivo. Esta análise foi feita como forma de indicar possíveis áreas e subáreas passíveis de acúmulo de substâncias poluentes e/ou pouco prováveis para a prática e o desenvolvimento de atividades de aquicultura/maricultura neste complexo estuarino. Observou-se que as áreas que apresentam menores taxas de renovação de suas águas interiores concentram-se no ramo sul da BC, que compreende o rio Maraú, e a sul do rio Sorojó, tanto para tempos de renovação correspondentes a 100% e 63% da concentração inicial durante um período de integração de 30 dias.

Do ponto de vista observacional fica evidente a necessidade de campanhas oceanográficas para levantamento de dados hidrográficos, batimétricos e de vazão de rios em períodos de

seca e chuvoso para a determinação da circulação hidrodinâmica na BC. Por outro lado, do ponto de vista numérico, existe a necessidade de avaliar a circulação na região de estudo levando-se em conta não apenas o regime de marés, mas também o padrão de ventos característico dos períodos seco e chuvoso.

Portanto, acredita-se que os resultados inéditos apresentados neste trabalho possam auxiliar no desenho amostral de campanhas observacionais futuras por órgãos ambientais, municipais e estaduais no desenvolvimento controlado e no gerenciamento sustentável desse ecossistema ainda pouco explorado.

7. REFERÊNCIAS

ABDELRHMAN, M., (2005). Simplified modeling of flushing and residence times in 42 embayments in New England, USA, with special attention to Greenwich Bay, Rhode Island Estuarine. **Coastal and Shelf Science**, pp.339-51.

AMARAL, K. J. ; ROSMAN, P. C. C.; AZEVEDO, J. P. S.(2004) Estuário do Rio Macaé: Modelagem Computacional como Ferramenta para o Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos. In: Congreso sobre Metodos Numericos y sus Aplicaciones, Bariloche. **Anais Mecanica Computacional**, 2004. v. XXIII. p. 1167-1185.

ANP (2005) Agência Nacional de Petróleo. **Ministério de Minas e Energia**, http://www.brasil rounds.gov.br.

AMORIM, F. N.(2005). **Caracterização Oceanográfica da Baía de Camamu e Adjacências e Mapeamento das Áreas de Risco a Derrames de óleo**. Dissertação de mestrado em geologia costeira – Universidade Federal da Bahia.

BAHIA (2001). **Empresa Bahiana de Turismo**. Zoneamento Ambiental da APA Península de Maraú. Salvador, CD-ROM.

ESPINHEIRA, C. C.(2010). **BAÍA DE CAMAMU: UMA PROVÁVEL ÁREA DE REFERÊNCIA?**. Monografia do curso de graduação em oceanografia-Universidade Federal da Bahia.

FRANKLIN, T. S.(2009). **A ocupação da orla da Baía da Ribeira e seus impactos sobre a hidrodinâmica local. Uma investigação através de modelagem numérica –Salvador-Ba**. Dissertação de mestrado em geologia costeira – Universidade Federal da Bahia.

FRENCH, P. W.(1997). Coastal and Estuarine Management. London, Routledge.

FROEHLICH, D.C.(2004). **Aplicação da modelagem física e computacional a um escoamento fluvial**. Dissertação de mestrado em Engenharia de recurso hídricos e ambiental – Universidade Federal do Paraná.

GENZ, F.; CIRANO, M. e LESSA, G. (2005) Processamento de Dados de Correntes Adquiridos com ADCP para Caracterização de Estuários, In: **Anais do II Congresso Brasileiro de Oceanografia**, Vitória, ES, BRA.

JOUON, A., DOUILLET, P., OUILLON, S. & FRAUNIE, P., (2006). Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model. **Continental Shelf Research**, p.1395–1415.

KING, I.P., (1990). Program Documentation - RMA2 - A Two Dimensional Finite Element Model for Flow in Estuaries and Streams. Lafayette: **Resource Management Associates**, p.296.

KING, I. et al., (2005). Users Guide to RMA2 WES Version 4.5. Valhalla: **Environmental Modeling Research Laboratory**, p.296.

LACERDA, L.D.. A zona costeira: O domínio das interações. Disponível em: <www.institutomilenioestuarios.com.br/zonacosteira.html>. Acesso em: 26 outubro 2010.

LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, R. K. P. e TESTA, V. (2003) Corals and Coral Reefs of Brazil, In: Latin **America Coral Reefs**, pp. 9–52, Boston, USA, Elsevier.

LETTER, J. a. (2003). Users Guide for RMA4 Version 4.5. US Army, Engineer Research and Development Center, Water Experiment Station, **Coastal and Hydraulics Laboratory** , p. 167.

LOPES, R.M., (2009). Informe sobre as espécies exóticas invasoras marinhas no Brasil. **Ministério do Meio Ambiente**. Série Biodiversidade 33. Brasília.

MONSEN, N.E., CLOERN, J.E., LUCAS, L.V. & MONISMITH, S.G., (2002). A comment on the use of flushing time, residence time and age as transport time scales. **Limnology and Oceanography**, pp.1545-53.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MTLAB using T_TIDE. **Computers & Geosciences**, n.28, 929-937pp.

PRITCHARD, D.,(1952). Estuarine Hydrography. **Advances in Geophysics**, Vol 1, Academic press, New York, pp.243-80.

ROCHA, A. B., CHACALTANA, J. A., RIGO, D., et al.(1999). "Uso de modelagem na identificação de padrões de escoamento para a Baía do Espírito Santo". In: **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte.

ROSMAN, P.C.C. (2001) "Um Sistema Computacional de Hidrodinnâmica Ambiental". In: **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5**, cap. 1. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH.

TILMAN et al., (2001). Forecast agriculturally driven global environmental change. **Science**. v. 292, pp. 281-284.

XAVIER, A.G., (2002). **Análise da Hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos – BA**.(COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Oceânica, Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, p.222.