UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

DANIEL IZOTON SANTIAGO

# Simulação Numérica do Padrão de Escoamento no Canal de Acesso ao Porto de Vitória, ES.

**Monografia**

Vitória, abril de 2004.

**DANIEL IZOTON SANTIAGO**

# Simulação Numérica do Padrão de Escoamento no Canal de Acesso ao Porto de Vitória, ES.

Monografia apresentada ao curso de graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de **Oceanógrafo.**

Prof. orientador: Dr. Julio Tomás Aquije Chacaltana.

Vitória, abril de 2004.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

# Simulação Numérica do Padrão de Escoamento no Canal de Acesso ao Porto de Vitória, ES.

Daniel Izoton Santiago

Prof. Drº Julio Tomás Aquije Chacaltana
Orientador – DEA/CT/UFES

Prof. Drª Viviane Testa
Examinadora Interna – DERN/CCHN/UFES

Prof. Drº Daniel Rigo
Examinador Externo – DEA/CT/UFES

Coordenadora do curso de Oceanografia: Prof. Drª Viviane Testa

Vitória, Março de 2004.

# Agradecimentos

Ao professor Julio Tomás Aquije Chacaltana pela orientação, por todo apoio, paciência e amizade.

Aos amigos do PPGEA/UFES (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) e colegas do GEARH e EMANA, com quem compartilhei bons momentos, pelas oportunidades e experiências que incentivaram o meu prosseguimento nessa área da pesquisa oceanográfica. Especialmente a Amílcar, Camila, Cláudio, Gelcílio, Márcio, Mônica e Sívia.

Aos colegas e amigos da graduação em oceanografia pela companhia e dificuldades vencidas.

Aos meus pais por me apoiarem incondicionalmente em todas as decisões que fiz durante minha vida acadêmica e as minhas irmãs por me auxiliarem nos momentos em que precisei durante este tempo.

**SOMOS QUEM PODEMOS SER**

*Um dia me disseram*
*Que as nuvens não eram de algodão*
*Um dia me disseram*
*Que os ventos às vezes erram a direção*

*E tudo ficou tão claro*
*Um intervalo na escuridão*

*(...)*
*Um dia me disseram*
*Quem eram os donos da situação*
*Sem querer eles me deram*
*As chaves que abrem esta prisão*

*(...)*
*Um dia me disseram*
*Que as nuvens não eram de algodão*
*Sem querer eles me deram*
*As chaves que abrem esta prisão*

*E tudo ficou tão claro*
*O que era raro ficou comum*

*Quem ocupa o trono tem culpa*
*Quem oculta o crime também*
*Quem duvida da vida tem culpa*
*Quem evita a dúvida também tem*

*Somos quem podemos ser*
***Sonhos que podemos ter***

Engenheiros do Hawaii

# Resumo

O objetivo deste trabalho foi estudar e avaliar o padrão de escoamento no canal de acesso ao Porto de Vitória, contribuindo para o entendimento da hidrodinâmica e dispersão de poluentes em suas águas. O trabalho enfoca a circulação das águas no canal causada predominantemente pelo movimento das marés, através do uso do modelo computacional integrado na vertical DIVAST (Depth Integrated Velocities and Solute Transport). Uma malha computacional com células de 10x10m de lado foi definida e implantada na região de estudo. Foram utilizadas condições de contorno de elevação no contorno leste e fluxo no contorno oeste. Os valores de elevação e fluxo utilizados como condições de contorno foram obtidos de resultados numéricos de uma aplicação do mesmo modelo DIVAST já calibrado para uma região de maior domínio, que abrangia todo o estuário do entorno da Ilha de Vitória, definida por uma malha computacional de 25x25m de lado. A avaliação dos resultados dos campos de velocidade gerados pelas simulações numéricas puderam auxiliar na compreensão do padrão geral de escoamento no canal de acesso ao Porto de Vitória e de regimes de circulação local, indicando a ocorrência de vórtices ou recirculações em algumas regiões ao longo do canal.

# Sumário

**1. INTRODUÇÃO** ..... **8**

**2. OBJETIVOS** ..... **12**

2.1 OBJETIVO GERAL ..... 12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 12

**3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** ..... **14**

3.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS DE MARÉS E CORRENTES DE MARÉS EM ÁGUAS COSTEIRAS ..... 14
*3.1.1 Marés* ..... *14*
*3.1.2 Correntes de Maré* ..... *15*
3.2 MARÉS E CORRENTES DE MARÉ EM ESTUÁRIOS E CANAIS ..... 16
3.3 CONCEITOS BÁSICOS DOS PROCESSO DE ESPALHAMENTO DE CONSTITUINTES RELACIONADOS À HIDRODINÂMICA EM CANAIS DE MARÉ E ESTUÁRIOS ..... 18
3.4 MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA DA HIDRODINÂMICA DE CORPOS D'ÁGUA ..... 20
3.5 USO DE MODELOS INTEGRADOS NA VERTICAL EM MODELAGEM DE ESTUÁRIOS E CANAIS DE MARÉ ..... 21
3.6 ESTUDOS PRETÉRITOS NO CANAL DE ACESSO AO PORTO DE VITÓRIA ..... 22
3.7 O MODELO NUMÉRICO DIVAST ..... 25

**4. METODOLOGIA** ..... **29**

4.1 ÁREA DE ESTUDO ..... 29
4.2 LEVANTAMENTO DE DADOS OCEANOGRÁFICOS ..... 31
*4.2.1 Dados de velocidade das correntes* ..... *31*
*4.2.2 Dados de elevação de maré* ..... *32*
*4.2.3 Dados de batimetria e rugosidade de fundo* ..... *32*
*4.2.4 Fatores não considerados* ..... *33*
4.3 IMPLANTAÇÃO DO MODELO NA ÁREA DE ESTUDO ..... 34

**5. RESULTADOS** ..... **36**

5.1 RESULTADOS DOS REGISTROS EXPERIMENTAIS DE ELEVAÇÃO E VELOCIDADE ..... 36
5.2 RESULTADOS NUMÉRICOS DE ELEVAÇÃO E VELOCIDADE PARA A ESTAÇÃO EXPERIMENTAL ..... 39
5.3 RESULTADOS NUMÉRICOS DOS CAMPOS DE VELOCIDADE ..... 41

**6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS** ..... **47**

6.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGISTROS EXPERIMENTAIS DE ELEVAÇÃO E VELOCIDADE ..... 47
6.2 RESULTADOS DE ELEVAÇÃO E VELOCIDADE NUMÉRICOS PARA A ESTAÇÃO EXPERIMENTAL ..... 48
6.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS DOS CAMPOS DE VELOCIDADE ..... 49

**7. CONCLUSÕES** ..... **53**

**8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS** ..... **55**

**9. REFERÊNCIAS** ..... **57**

**ANEXOS** ..... **61**

ANEXO A ..... 62
ANEXO B ..... 63

# Capítulo 1

# INTRODUÇÃO

## 1. INTRODUÇÃO

As regiões costeiras são bastante relevantes no que diz respeito à ocupação e desenvolvimento de atividades antrópicas. Cerca de 60% da população mundial vive em um raio de até 60 km da orla litorânea e estima-se que esta proporção aumente para 75%, em 2025 (AGENDA 21, 1992; IUCN, 1992). Nessas áreas se desenvolvem atividades econômicas de grande importância como a pesca, a aqüicultura, o transporte e comércio marítimos, e o turismo, que é privilegiado pela grande diversidade paisagística. Tais cenários abrigam uma miríade de hábitats diversos e produtivos, como os estuários e manguezais, que devem ser conservados para a manutenção de sua diversidade biológica e para a sustentabilidade das atividades extrativistas antrópicas.

O adensamento demográfico nas zonas costeiras, aliado à falta de planejamento urbano, gera graves problemas ambientais, que representam uma ameaça aos ecossistemas naturais e vêm afetando a sociedade. O principal problema emergente no início deste milênio está relacionado aos recursos hídricos. Nas últimas décadas têm se manifestado em todo o mundo crises sociais e econômicas decorrentes de conflitos no uso múltiplos das águas devido a práticas inadequadas de uso do solo e das águas nas bacias hidrográficas.

A maioria das cidades litorâneas brasileiras encontram-se em estado crítico com relação a degradação da qualidade de suas águas, devido a lançamentos de efluentes domésticos e industriais nas águas costeiras e estuarinas sem tratamento adequado, muitas vezes em níveis superiores ao da capacidade dispersiva e de autodepuração desses corpos d’água. Outros impactos relevantes sobre as águas, particularmente em regiões portuárias, são o vazamento de óleo de embarcações e mudanças na hidrodinâmica e no processo de transporte de sedimentos e solutos, resultantes de alterações na geometria do corpo d’água causadas por obras como aterros ou dragagens. Urge nos municípios costeiros a necessidade de programas de gestão ambiental que contemplem o gerenciamento da qualidade dos recursos hídricos marinhos e auxiliem na resolução desses problemas.

Nesse contexto, Vitória é uma cidade típica que passa por esses desafios. Esta cidade se destaca nacionalmente quanto a sua infra-estrutura e atividade portuária, de grande importância para a economia do estado do Espírito Santo. O funcionamento e desenvolvimento das atividades do Porto de Vitória englobam o Cais de Vitória, situado em Vitória, e os cais de Paul e Capuaba, situados no município de Vila Velha. No canal que dá acesso ao Porto de Vitória, o trânsito de embarcações é intenso e foi incrementado com a instalação de terminais de combustíveis líquidos após as recentes descobertas de óleo no litoral capixaba. Planos de prevenção e de contingência a possíveis acidentes com derramamento de óleo são necessários e também demonstram uma preocupação com a região. As águas na região do canal de acesso ao Porto de Vitória servem ainda a usos diversos, com destaque para o desenvolvimento de esportes náuticos, como o remo, e para o turismo, devido ao seu reconhecido valor paisagístico. Entretanto ocorre a disposição de esgotos domésticos em diversos pontos ao longo do canal, contribuindo para a contaminação e degradação da qualidade de suas águas.

Tendo em vista a múltipla interação dos processos físicos, o movimento das águas em baías e estuários resulta em grande complexidade. A circulação das águas tem profunda influência no ciclo de vida dos organismos marinhos, na distribuição de nutrientes, no transporte e dispersão do plâncton, sedimentos e contaminantes (esgotos, óleo, metais pesados). Portanto, além de representar especial interesse à navegação e ao planejamento de obras costeiras, o conhecimento de forma integrada dos padrões de escoamento do sistema hídrico é fundamental para a gestão da qualidade das águas.

Atendendo a essa necessidade, recentemente os modelos computacionais têm sido muito utilizados como ferramentas poderosas em simulação hidrodinâmica e de qualidade de água, com reconhecida importância no auxílio ao gerenciamento costeiro. Esses modelos consideram a complexidade dos processos físicos que governam o funcionamento dos ambientes costeiros, podendo reproduzir satisfatoriamente, através de simulações, os fenômenos que ocorrem na natureza. O crescimento do uso desses modelos é atribuído ainda a: (i) possilidade de prever cenários de interesse que podem ser simulados pelo modelo e fornecer relações causa/efeito, (ii) disponibilidade de computadores pessoais mais baratos e com

capacidade de processamento cada vez maior, (iii) existência de softwares livres relacionados à modelagem de processos costeiros, e (iv) difusão de técnicas sofisticadas de levantamento de dados em campo associado ao aumento da capacidade de registro de equipamentos.

Alguns trabalhos têm sido desenvolvidos na aplicação de modelagem hidrodinâmica das águas costeiras de Vitória-ES (ROCHA, 2000; CASTRO, 2001; BARROS, 2002; CONCEIÇÃO, 2003; MACIEL, 2004), usando-se o modelo DIVAST (Depth Integrated Velocities and Solute Transport). Rigo (2004) implantou e calibrou este modelo para a hidrodinâmica da região do entorno da Ilha de Vitória considerando as áreas de manguezal no processo de escoamento. Obteve bons resultados para elevação e correntes de maré simulados na estação em Santo Antônio, na região do canal de acesso ao Porto de Vitória. Porém o foco desse trabalho foi o escoamento nas regiões estuarinas com planícies de maré e pouco ainda foi explorado acerca do padrão de escoamento na região do canal de acesso ao Porto de Vitória em maior detalhe nos trabalhos anteriores, com exceção do trabalho desenvolvido por Conceição (2003), que estudou processos de dispersão de manchas de óleo a partir de pontos do canal de acesso ao Porto de Vitória.

Tendo em vista o que foi discutido, o presente trabalho propõe o estudo da circulação das águas do canal de acesso ao Porto de Vitória, utilizando o modelo computacional DIVAST, visando contribuir para o entendimento de sua hidrodinâmica e de processos advectivos e dispersivos em suas águas. Esse estudo é realizado considerando a maré como a única forçante para a circulação. A pequena contribuição dos rios não é significativa para a hidrodinâmica geral da região, por isso não foi considerada. A atuação dos ventos no canal também foi menosprezada devido à grande variabilidade espacial e temporal dessa forçante, não previsível, e cujo efeito na hidrodinâmica é bem menos representativo que o efeito das marés.

# Capítulo 2

# OBJETIVOS

# 2. OBJETIVOS

## 2.1 Objetivo geral

- Contribuir para o entendimento da hidrodinâmica e transporte de poluentes no canal de acesso ao Porto de Vitória.

## 2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a hidrodinâmica da região do canal de acesso ao porto de Vitória com o auxílio do modelo computacional DIVAST (Depth Integrated Velocities and Solute Transport), considerando a maré como a única forçante para o escoamento.

# Capítulo 3

# Revisão Bibliográfica

# 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 3.1 Fundamentos básicos de marés e correntes de marés em águas costeiras

Os ambientes costeiros são regiões onde efeitos de maré e correntes sobrepõem-se a efeitos de rios, fazendo com que processos de escoamento assumam características bastante complexas (FISCHER, 1979). A subida e descida periódicas do nível do mar e as correntes de enchente e vazante são as características mais notáveis dos movimentos da água em regiões costeiras. A onda de maré é a força motriz principal que governa os padrões de circulação dos ambientes costeiros e estuarinos, sendo de fundamental importância o conhecimento de sua dinâmica para a compreensão do comportamento hidrodinâmico nesses ambientes (MIRANDA *et. al.*, 2002). Nesta seção serão descritos fundamentos importantes acerca dos fenômenos das marés e correntes em águas costeiras. Para maiores detalhes pode-se consultar Brown *et. al.* (1989).

### 3.1.1 MARÉS

As ondas de maré são ondas longas geradas no oceano pela ação conjunta das forças gravitacionais do sistema Sol, Lua e Terra. À medida que a maré progride em direção ao continente e alcança a plataforma continental, sofre uma desaceleração. Isso ocorre porque têm comprimento de onda muito grande relativo à profundidade em água costeiras, portanto se deslocam como ondas de águas rasas, de modo que a velocidade de propagação da onda de maré ($c$) é controlada somente pela profundidade local sendo obtida pela relação $c = \sqrt{gh}$ (sendo g, a aceleração devido à gravidade e h, a profundidade local). Conseqüentemente, como a energia da onda se conserva, enquanto a velocidade da onda de maré diminui quando esta se propaga para águas rasas, a sua altura aumenta. Desse modo, em regiões costeiras a amplitude de maré é maior que no oceano (TRENHAILE, 1997).

A maré é classificada como semidiurna, quando apresenta duas preamares e duas baixa-mares em um dia lunar (24,84 horas), sendo 6,21 horas de vazante e de enchente, totalizando um período de 12, 42 horas; diurna, quando há uma preamar e

uma baixa-mar em um dia lunar; e semidiurna com desigualdade ou diurna com desigualdades (também denominadas mistas), quando apresenta marcante desigualdade diurna. Verifica-se ainda que as amplitudes da oscilação da maré variam com as fases da Lua, sendo mínima durante as quadraturas (quartos crescentes e quartos minguantes), e máxima durante as sizígias (luas cheias e luas novas) (BROWN, 1989).

Efeitos intrínsecos à interação da onda de maré com a geometria em águas rasas são responsáveis pelas elevações e correntes de maré em regiões costeiras não serem normalmente ondas senoidais perfeitas, exibindo assimetrias observadas nos registros de elevações de maré (MIRANDA *et. al.*, 2002).

Como a velocidade de propagação da onda é dependente da profundidade da água, viajando mais lentamente em águas de menor profundidade, a distância percorrida pela crista da onda em dado intervalo de tempo excede a percorrida pelo cavado da onda. Isso resulta numa distorção da forma da onda, que vai se intensificando à medida que esta penetra em águas rasas. Essa assimetria é verificada em registros de elevação do nível do mar em estuários de forma alongada, da ordem de cem quilômetros, em que se verifica um intervalo de tempo menor para o enchimento, e um intervalo mais longo para a vazante. Pela equação da continuidade, geram-se velocidades maiores de enchente (MCDOWELL & OCONNOR, 1977).

### 3.1.2 CORRENTES DE MARÉ

O movimento das águas costeiras causado pela maré é impulsionado por forças advindas de gradientes horizontais de pressão provenientes, basicamente, da inclinação da superfície livre da água em relação à superfície de nível, devida às diferenças de elevação entre uma crista e um cavado da onda longa. O deslocamento horizontal da massa de água constitui as correntes de maré. Estas necessariamente têm a mesma periodicidade que a onda de maré. As correntes são mais intensas em águas costeiras que em águas oceânicas, visto que são originadas do gradiente de pressão entre a crista e o cavado da onda longa, diretamente relacionado à altura da maré (TRENHAILE, 1997).

### 3.2 Marés e correntes de maré em estuários e canais

Nesta seção são abordados processos físicos relacionados às interações da onda de maré com a geometria do corpo d'água e aspectos da hidrodinâmica em estuários e canais de maré. Os estuários possuem modelos de circulação muito variáveis no espaço e no tempo. A circulação é geralmente mais intensa que em rios e os fatores que afetam predominantemente o comportamento hidrodinâmico são o fluxo de água doce, as oscilações de maré, a ação do vento, a estratificação de densidade e a geometria do estuário. Estes fatores, agindo separadamente ou em sinergia, geram um padrão de escoamento bastante complexo (MIRANDA, 2002).

Dentre os fatores que ocasionam a distorção da onda de maré em estuários estão a existência de extensas planícies de maré. Essas áreas formam uma zona alagável entre-marés, que pode armazenar um grande volume de água comparado ao volume do canal principal. A propagação da maré é mais lenta na região entre-marés, pois o atrito nessas áreas é maior, resultando em velocidades mais baixas. Próximo à baixamar, a maré se propaga predominantemente nos canais principais, mais profundos, onde o atrito é menor. Isto pode resultar em um tempo de maré enchente mais longo que o tempo de maré vazante e, conseqüentemente, velocidades maiores durante as vazantes, resultando em uma dominância de vazante (EISMA et. al, 1998). A intensidade desse efeito está relacionada à variação entre o volume de água presente nos canais principais e o volume de água armazenado nas planícies de maré, sendo, portanto, maior nas situações de maré de sizígia, onde a área alagada é maior. Outro fator que acentua a distorção na onda de maré é existência de vegetação de mangue associada às planícies de maré, que aumenta a resistência ao escoamento, exercendo importante influencia sobre esse. Seus efeitos têm sido discutidos por alguns pesquisadores (WOLANSKI et. al., 1980; MAZDA et al., 1995; FALCONER et. al., 2001; BLANTON et. al., 2001; RIGO, 2004).

As correntes de maré dependem do gradiente horizontal do nível e não do valor absoluto do nível d'água em determinado lugar. Assim sendo, em um canal de maré ou em um estuário com dominância da maré, não é possível, nem de forma aproximada, obter uma relação unívoca entre o nível d'água e a velocidade média

do escoamento, como realizado para rios. Não há, portanto, como construir uma curva chave para esse tipo de corpo d'água. Supondo águas de densidade aproximadamente uniforme, um canal de maré só apresentará escoamento quando surgirem diferenças no nível d'água no seu interior, independentemente da topografia do fundo. Devido ao caráter periódico da maré, o escoamento em um canal de maré é fundamentalmente oscilatório, ou seja, apresenta inversões periódicas e sistemáticas de sentido não havendo, assim, a possibilidade do escoamento ser permanente. Portanto, é possível encontrar as correntes as mais variadas, inclusive com sentidos inversos, para um mesmo valor (instantâneo) do nível d'água num canal de maré, sendo o escoamento obrigatoriamente transiente. (MELO, 1997). O escoamento pode ser ainda classificado como turbulento e não-uniforme, como é típico de canais naturais (CHOW, 1959).

As correntes em estuários e canais estreitos fluem predominantemente numa única direção, no sentido do continente por metade do ciclo de maré (enchente) e no sentido inverso pela outra metade do ciclo (vazante). Esse movimento tem uma séria implicação no tempo de residência de poluentes dispostos em estuários e na deposição de sedimentos, já que esses constituintes podem retornar com a maré enchente (KJERVE, 1988). Raramente os fluxos de corrente de maré inversos possuem a mesma velocidade escalar, porque o pico de velocidades de enchente e vazante tende a ser desigual devido à interação de constituintes harmônicas de maré de diferentes períodos e fatores intrínsecos a geometria do corpo d'água (definida pela batimetria e linha de costa).

Em mares, baías e estuários largos a força de Coriolis causa uma deflexão constante na direção das correntes de forma que as partículas d'água, num ciclo de maré, tendem a seguir trajetórias mais ou menos elípticas. Esse comportamento pode então ser convenientemente representado por meio de elipses de maré, diagramas em que vetores representam velocidade e direção do escoamento, medidos em locais específicos ao longo de um ciclo de maré. É comuns as elipses de maré serem assimétricas. Em estuários, além do efeito da geometria e rugosidade, somam-se efeitos das planícies de maré e fluxos de rios no escoamento. Um processo comumente observado é o retardo do fluxo das correntes

em direção ao fundo em um perfil da coluna d'água, como conseqüência da fricção com o leito que produz cisalhamento vertical na corrente. Desse modo elipses de maré na superfície e perto do fundo estão freqüentemente fora de fase, de forma que as correntes de superfície e fundo giram em diferentes horários, havendo escoamento inverso em um intervalo próximo à virada da maré. Escoamento inverso entre correntes de superfície e fundo ocorre também em estuários com estratificação da coluna d'água ocasionada pela diferença de salinidade no perfil vertical, comum em estuários onde há aporte d'água doce significativo em relação ao prisma de maré (BROWN, 1989).

> Diferentemente da maré em águas oceânicas, em estuários e canais a velocidade das correntes não está em fase com a amplitude da maré. Na ausência de atrito com o fundo, a onda se propaga até o final do estuário, onde é refletida e retorna. Caso o tempo necessário para que isto ocorra seja igual ao período da onda de maré, ela ira interagir com a próxima onda de maré entrando no estuário (ressonância), gerando uma onda estacionária. Esta onda possuirá amplitude máxima no fundo do estuário (ponto antinodal), igual ao dobro da onda original. A uma distância igual a 1/4 do comprimento de onda em direção a boca do estuário (ponto nodal), a amplitude é zero, não havendo variação de maré, porém neste ponto as velocidades horizontais são máximas. Em estuários curtos, o ponto nodal situa-se na região marinha adjacente, fora do estuário. A amplitude é máxima no final do estuário, mas a magnitude das correntes aumenta em direção a boca do estuário. Neste caso, a preamar e a baixamar ocorrem simultaneamente para todos os pontos do estuário e coincidem com o instante em que a direção das correntes inverte. A amplitude neste caso encontra-se defasada de 90° em relação à velocidade de corrente. Em estuários em que a energia da onda de maré é completamente dissipada pelo atrito com o fundo antes de ser refletida ou em canais infinitamente longos, a onda de maré apresenta um comportamento progressivo. Neste caso, a amplitude de maré e a magnitude das correntes diminuem em direção ao fundo do estuário e encontram-se em fase, com velocidades máximas de enchente ocorrendo na preamar. Na prática, a maioria dos estuários tem alguma dissipação da energia de maré antes e depois da reflexão e a maré resultante é a mistura de uma onda estacionária com uma contribuição progressiva (DYER, 1997).

## 3.3 Conceitos básicos dos processo de espalhamento de constituintes relacionados à hidrodinâmica em canais de maré e estuários

O processo de transporte e misturamento de constituintes em estuários pode ser afetado por oscilações de maré, por vazão de água doce, por estratificações de densidade e pelo vento. A combinação total desses fatores resulta no complexo padrão de circulação das águas do estuário. A forma geométrica do estuário também

é de grande relevância no que diz respeito ao seu comportamento hidrodinâmico e, conseqüentemente, às características resultantes de transporte e misturamento de constituintes. Dentre os diversos aspectos a serem considerados, ressalta-se a existência das zonas de baixas trocas de massa com o canal principal, as chamadas "zonas mortas" e regiões de recirculação (LEWIS, 1997). Os fatores físicos influenciam diretamente nos processos de natureza física no que concerne à diluição de constituintes. A seguir são apresentados os conceitos básicos de cada processo, segundo Fischer (1979):

- Advecção: transporte de um constituinte pela corrente líquida;
- Convecção: transporte vertical de um constituinte causado pela existência de gradientes verticais de temperatura;
- Difusão molecular: espalhamento do constituinte pelo movimento aleatório molecular das partículas no fluido;
- Difusão turbulenta: espalhamento do constituinte pelo movimento aleatório das partículas do fluido;
- Advecção diferenciada: refere-se ao transporte de partículas de fluido num campo de escoamento com significativos gradientes espaciais de velocidade, ou seja se verificam deslocamentos relativos significativos entre camadas adjacentes;
- Dispersão: espalhamento de constituintes devido a ação conjunta da difusão (molecular e turbulenta) e da advecção diferenciada;
- Mistura: espalhamento do constituinte no corpo d'água receptor, resultante de uma ação global envolvendo qualquer processo que cause este espalhamento.

A advecção e a difusão, principalmente a difusão turbulenta e, por conseguinte a dispersão, normalmente têm significativa contribuição no processo de depuração de um determinado constituinte em um canal de maré ou estuário. A convecção terá papel significativo no processo de espalhamento caso haja gradiente de densidade (temperatura e salinidade) entre o constituinte e o corpo receptor (FISHER, 1979).

### 3.4 Modelagem matemática e numérica da hidrodinâmica de corpos d'água

A modelagem da hidrodinâmica emprega na sua formação as equações baseadas nos princípios físicos de conservação da massa (continuidade) e de conservação da quantidade de movimento (2ª Lei do movimento de Newton). Segundo Lewis (1997), na simulação de processos de escoamento e transporte de constituintes em corpos d'água costeiros e estuarinos, o ideal seria a utilização de modelos tridimensionais. A alternativa mais usual na simulação de processos de escoamento e transporte de constituintes em regiões costeiras é a redução do modelo tridimensional para um modelo bidimensional, por exemplo, integrado na profundidade. Segundo Falconer (1976), o emprego de modelos integrados na vertical é aceitável quando os fluxos de quantidade de movimento são predominantemente horizontais e existe pouca ou nenhuma estratificação no corpo d'água a ser estudado.

As equações matemáticas para a modeladem de corpos d'água são geralmente complexas e não possuem solução analítica, sendo sua solução realizada via um método numérico. A idéia básica dos métodos numéricos é o processo de discretização, que reduz o problema físico contínuo a um problema discreto, que pode ser resolvido pelo computador. Os métodos numéricos são métodos aproximados para solução de equações diferenciais parciais. Os métodos numéricos mais usuais em engenharia são os métodos das diferenças finitas e dos elementos finitos (ROSMAN, 1989). No trabalho aqui desenvolvido utiliza-se um modelo baseado no método das diferenças finitas. Neste método, a região de interesse é representada por uma série de pontos ou nós discretizados em uma malha, e a relação entre os valores nestes pontos é obtida através da expansão truncada da série de Taylor.

As equações matemáticas precisam de condições de contorno para encontrar uma única solução. Condições de contorno usadas em modelos hidrodinâmicos aplicados às regiões costeiras incluem a especificação de velocidades normais nulas, ao longo de fronteiras de terra, e condições de elevação de maré ou fluxo (velocidades ou vazão) ao longo de fronteiras abertas. A escolha adequada de condições de fluxo e elevação de maré em fronteiras abertas tem se mostrado determinante no sucesso da calibração de modelos hidrodinâmicos.

### 3.5 Uso de modelos integrados na vertical em modelagem de estuários e canais de maré

Para se calibrar um modelo, devem ser confrontadas as observações feitas em campo, na região estudada, com os resultados obtidos pelo modelo. O processo de calibração implica no ajuste dos fatores inexatos conhecidos, como o coeficiente de rugosidade do fundo ou condições de contorno, buscando-se alcançar concordância entre o modelo e os dados medidos em campo. A exigência básica para que os modelos numéricos possam funcionar de forma satisfatória, é que o levantamento dos dados de batimetria seja feito com bastante cuidado (ODD e MURPHY apud ROCHA, 2000), assim como a sua representação numérica no modelo.

Segundo Stelling (1986) apud Maciel (2004), a acurácia da propagação da velocidade da onda de maré é influenciada por muitos parâmetros, como contorno numérico, passo de tempo, comprimento da malha, batimetria, geometria, fricção do fundo, viscosidade, entre outros. É preciso que a o espaçamento da malha escolhida garanta a consistência da solução do problema físico em questão. A consistência está relacionada com a aproximação do sistema discreto de equações em diferenças finitas com o sistema de equações diferenciais parciais. Isto significa que o erro de truncamento obtido na expansão da solução aproximada por série de Taylor deve tender a zero (ROSMAN, 1989).

Mazda et al. (1995) utilizaram um modelo integrado na vertical para investigar a assimetria de maré causada pela vegetação de manguezal em um canal de maré hipotético. Os autores apontam que o arrasto provocado pela vegetação de manguezal é o principal mecanismo no controle da elevação do nível d'água e das velocidades na região estudada.

Melo et al. (1997), investigaram numericamente o padrão de escoamento governado pela onda de maré na baía de Florianópolis, usando um modelo hidrodinâmico integrado na vertical. Os resultados do modelo indicaram que há um padrão de onda de maré estacionária da componente $M_2$ (componente de maré lunar semidiurna) dentro da baía com um antinodal situado no meio baía sul. O padrão de correntes

associado com o padrão de ondas é tal que algumas partículas ou substâncias podem ser transportadas pelo escoamento das águas do rio acumulando em torno da região do antinodo, onde o escoamento tende a convergir.

Araújo et al. (2000) realizaram estudos no estuário do rio Massagana, próximo ao Porto de Suape, no Estado de Pernambuco, utilizando um modelo hidrodinâmico integrado na vertical. Os resultados representaram de maneira satisfatória a hidrodinâmica do estuário nas condições típicas de maré de sizígia.

Sankaranarayanan et. al. (2003) aplicaram à Baía de São Francisco (EUA) o modelo hidrodinâmico integrado na vertical, BFHYDRO. As condições de contorno nas fronteiras abertas consistiam de elevações ao longo das fronteiras abertas e fluxo nas descargas fluviais. Os resultados da comparação entre os dados de elevação medidos e simulados para 5 estações foram considerados satisfatórios, com um erro médio para elevações e correntes menor que 7% e 9%, respectivamente. Também foram bem reproduzidas pelo modelo as assimetrias diurnas e semidiurnas dos registros de maré e das correntes.

### 3.6 Estudos pretéritos no Canal de Acesso ao Porto de Vitória

Poucos estudos foram realizados enfocando a hidrodinâmica do canal de acesso ao Porto de Vitória. O regime de marés da região é de micromarés e a maré foi classificada por Barros (2002) como semidiurna com desigualdades diurnas, a partir da observação dos dados de registros de elevação, sendo a componente harmônica de maré $M_2$ (lunar semidiurna) a principal para a região, com período de 12,4 h e amplitude de 46,2 cm para o Porto de Vitória. As componentes harmônicas para o Porto de Vitória são apresentadas no ANEXO A (FEMAR, 2000).

Barros foi um dos primeiros a realizar um estudo científico de investigação da hidrodinâmica da região, tendo realizado um estudo analisando registros de elevação de maré e correntes obtidos em monitoramentos de campo, de forma a identificar os processos físicos que influenciam no padrão de escoamento das águas do entorno da Ilha de Vitória. Também aplicou o modelo DIVAST para a região,

usando uma malha de células quadradas com 25 metros de lado. Segundo o autor, os resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico não conseguiram reproduzir a assimetria da maré observada nos registros experimentais para diferentes partes do estuário, o que poderia estar relacionado à influência dos manguezais sobre o padrão de correntes na região, não considerados em seu trabalho, e que deveriam ser inseridos no modelo hidrodinâmico. Os resultados numéricos encontrados para as velocidades indicaram boa concordância de fase, porém, com magnitudes inferiores àquelas observadas em campo. O mesmo autor faz uma revisão das publicações de cartas de correntes de maré para o Porto de Vitória:

> A carta de correntes para o Porto de Vitória (MARINHA DO BRASIL, 1962) descreve as velocidades de correntes resultantes do efeito da maré (para uma situação de maré de sizígia média) associada ao fluxo normal do rio, para a época. Nessa publicação, são observados valores máximos de enchente de 0,70ms-1 e até 1,5ms-1 durante as vazantes, para os estreitamentos do canal. Observações são feitas quanto ao efeito da ação de ventos fortes atuando sobre a região, sendo descrita uma maior duração do escoamento superficial no sentido do vento atuante (enchentes no caso de ventos de NE e vazante para a situação de ventos de SW).
>
> O "Roteiro – Costa Leste" (MARINHA DO BRASIL, 1998), publicação de auxilio a navegação com informações sobre a costa e os portos brasileiros, traz as seguintes informações sobre a corrente de maré no canal de acesso ao Porto de Vitória
>
> - nas proximidades da pedra da Baleia, do baixio do Tagano e da Pedra Maria Catoré, pode atingir velocidades elevadas na vazante, de até 2,9 nós (1,5ms$^{-1}$) na sizígia;
> - entre o morro do Penedo e as pedras das Argolas, varia entre 2 nós (1,03m/s$^{-1}$) e 3 nós (1,54m/s$^{-1}$) (Figura 4);
> - normalmente, a de enchente é menor do que a de vazante.
>
> E sobre a corrente de maré, no Porto de Vitória:
>
> - no cais comercial, na vazante empurra o navio para o cais, dificultando as manobras, sendo mais acentuada em frente aos armazéns 1 e 2, e reduzindo, gradativamente, entre o 2 e o 5;
> - na margem oposta, tem a direção paralela à do cais.

Alguns desses detalhes podem ser oservados na figura 1 do Anexo B, que apresenta a região do canal de acesso ao Porto de Vitória, extraída da carta náutica n° 1401.

Conceição (2003), usando o método de derivadores para monitoramento, simulou o movimento de manchas de óleo a partir de pontos do canal de acesso ao porto de

Vitória e estimou o risco de aporte ao manguezal do Rio Aribiri na Baía de Vitória – ES e avaliou a influência das variáveis meteo-oceanográficas (essencialmente ventos e correntes de maré) no processo dispersivo de óleo na região.Chacaltana e Rigo (2003) implantaram e calibraram o modelo DIVAST para a Baía de Vitória, usando uma malha de células quadradas de 25 metros de lado, com o intuito de avaliar a influência das planícies de mangue na hidrodinâmica da baía para dois cenários: com mangue e sem mangue. Os resultados numéricos para a maré de sizígia mostraram um acréscimo de até 50% nas velocidades de escoamento com a consideração das planícies de inundação do mangue. Rigo (2004), continuando o estudo com este modelo observou ainda, dentre outros resultados, que o manguezal da região norte do sistema estuarino da baía de vitória tem um papel importante na deformação da onda de maré, provocando um atraso na propagação da maré no entorno da preamar, favorecendo o aumento do tempo da enchente, a diminuição do tempo de vazante e resultando na dominância das correntes de vazante, influenciada pelo volume de água armazenado no manguezal.

Santiago e Chacaltana (2003) utilizaram o modelo DIVAST para simular as correntes de maré geradas pela componente harmônica de maré $M_2$ na região do canal de acesso ao Porto de Vitória e identificaram na extensão do canal a dominância das correntes de vazante, com inversão para dominância de enchente nas regiões com vórtices intensos e pequenas ilhas, onde a seção do fluxo principal era reduzida. Também observaram a ocorrência de vórtices e zonas de estagnação.

Uma análise dos dados da Tábua de Maré publicada pela DHN, para o Porto de Vitória no ano de 2004, mostrou que os níveis máximos e mínimos de maré previstos em relação ao nível de referência da DHN para o Porto de Vitória, foram de 1,7 e –0,2 metros, respectivamente. Os níveis máximos ocorrem nos meses de abril e maio, em condições de sizígia, enquanto que os níveis mínimos ocorrem nos meses de julho, agosto, setembro e outubro, também em condições de sizígia, conforme se observa na Figura 1.

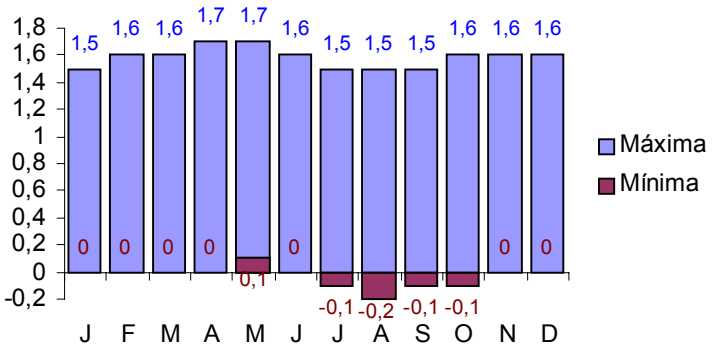


Figura 1 -Variação dos valores de máximos e mínimos do nível de marés para o Porto de Vitória, em relação ao nível de referência da DHN .

As alturas máximas e mínimas de maré para o período de previsão do ano de 2004 foram de 1,7m e 0,2m, respectivamente. As máximas alturas ocorrem nos meses de abril, agosto e outubro, associadas às condições de sizígia, enquanto as mínimas alturas, ocorrem nos meses de março, abril, setembro e outubro, associadas às condições de quadratura, conforme se observa na Figura 2.

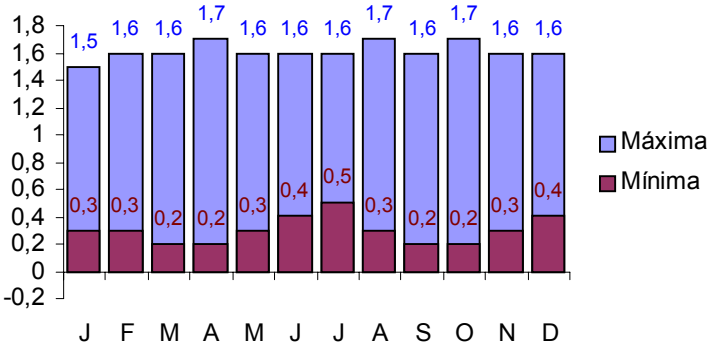


Figura 2 - Amplitudes máximas e mínimas das marés para o Porto de Vitória.

### 3.7 O modelo numérico DIVAST

O modelo utilizado neste estudo é o DIVAST (Depth Integrated Velocities and Solute Transport); um código computacional escrito em linguagem Fortran, desenvolvido por Falconer (1976) para estudar problemas relacionados à hidrodinâmica e à qualidade de água em corpos d'água rasos. Esse modelo é integrado na vertical e

utiliza o método numérico de diferenças finitas para a solução das equações governantes do escoamento. Neste método, a região a ser modelada é representada através de pontos discretos em uma malha composta de células quadradas, abrangendo toda a região de estudo. As equações são resolvidas dentro da malha computacional. A seguir são descritas suas equações fundamentais e características:

EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

A equação da continuidade pode ser representada da seguinte forma:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = q_m \tag{1.1}$$

EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

As equações hidrodinâmicas para o movimento nas direções x e y são representadas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \beta pU}{\partial x} + \frac{\partial \beta pV}{\partial y} = fq - gH\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\rho_a}{\rho}C_w W_x\sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ - \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{H^2C^2} + \varepsilon\left[2\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial x \partial y}\right]\end{aligned} \tag{1.2}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial \beta qU}{\partial x} + \frac{\partial \beta qV}{\partial y} = -fp - gH\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\rho_a}{\rho}C_w W_y\sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ - \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{H^2C^2} + \varepsilon\left[\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y}\right]\end{aligned} \tag{1.3}$$

onde:

$p\ (=UH),\ q\ (=VH)$ Descargas por unidade de largura nas direções x e y respectivamente ($m^3/s/m^2$);

$q_m$ Descarga-fonte por unidade de área horizontal ($m^3/s/m^2$);

$U, V$ Componentes de velocidade médios na profundidade nas direções x e y respectivamente (m/s);

| | |
|---|---|
| $\beta$ | Fator de correção do momentum. Para um perfil de velocidade vertical não-uniforme, $\beta$ =1 ; |
| $f = 2\omega \operatorname{sen}\varphi$ | Parâmetro de Coriolis devido à rotação da Terra ($s^{-1}$). Onde $\omega$ é a velocidade de rotação angular da Terra, $\omega = 2\pi/(24 \times 3600) = 7.27 \times 10^{-5}$ (radianos/s); e $\phi =$ ângulo geográfico da latitude (graus); |
| $g$ | Aceleração gravitacional (=9.806 $m/s^2$); |
| $H$ | Profundidade total da água; (m) |
| $\eta$ | Elevação da superfície da água acima do datum (m); |
| $h$ | Profundidade da água abaixo do datum (m); |
| $\rho_a$ | Massa específica do ar ($\cong$ 1,292$kg/m^3$); |
| $\rho$ | Massa específica do fluido ($kg/m^3$); |
| $C$ | Coeficiente de rugosidade de Chezy ($m^{½}/s$); |
| $C_w$ | Coeficiente de resistência do ar/fluido (admensional); |
| $\in$ | Viscosidade turbulenta média na profundidade ($m^2/s$); |
| $x, y$ | Coordenadas (m). |
| $W_x$ , $W_y$ | Componentes da velocidade do vento na superfície nas direções x e y, respectivamente, medida a 10 metros de altura (m/s) |
| t | Tempo (s) |

O tipo particular de esquema, de diferenças finitas, utilizado neste modelo é baseado no Alternating Direction Implicit Method (método implícito da direção alternada), ou ADI, técnica que envolve a subdivisão de cada passo de tempo em dois meio passos de tempo. No primeiro meio passo de tempo a elevação da água $\eta$ e a componente U da velocidade são solucionadas implicitamente na direção x, enquanto que as outras variáveis são representadas explicitamente. Similarmente, para o segundo meio passo de tempo, a elevação da água $\eta$ e a componente V da são solucionadas implicitamente na direção y, com as outras variáveis sendo representadas explicitamente. Com as condições de contorno incluídas, as equações em diferenças finitas resultantes para cada passo de tempo são solucionadas usando-se o método de eliminação de Gauss e substituição anterior. Um sistema de malha deslocada e organizada no espaço é utilizado, onde a variável $\eta$ está localizada no centro de cada célula da malha, U e V no centro dos lados de cada célula da malha. As profundidades são especificadas diretamente no centro de cada lado das células (FALCONER, 1976).

# Capítulo 4

# Metodologia

# 4. METODOLOGIA

## 4.1 Área de estudo

A região investigada neste estudo é a região do canal de acesso ao Porto de Vitória, um trecho do estuário do entorno da Ilha de Vitória que se situa ao sul da mesma, orientado no sentido leste-oeste (Figura 3). Está entre as coordenadas 40°16' e 40°22 W e 20°19' e 20°20' S e possui aproximadamente de 8,5 km de extensão. Sua largura varia de 180m no estreitamento junto ao Penedo a 1400m próximo a terceira ponte e sua profundidade média é de cerca de 7 m (calculado através de: $H_m$=V/A; onde $H_m$ é a profundidade média do canal, $V$ é o volume em sua extensão ao nível médio de maré, e A é a área de superfície do canal), havendo em seu eixo longitudinal um canal dragado continuamente a 13 m de profundidade para o acesso de navios ao Porto de Vitória (Figura 4).

Figura 3 – Representação dos limites da malha computacional (retângulo vermelho) na região de estudo. A região em verde representa as áreas ocupadas por vegetação de mangue.

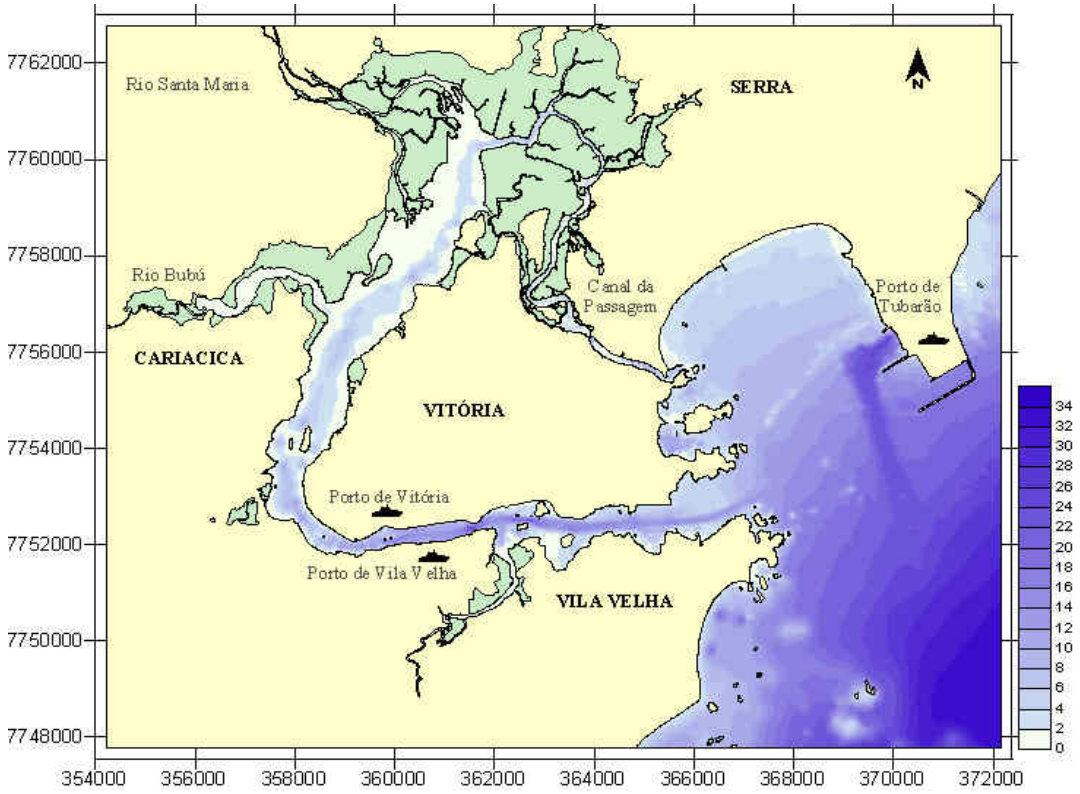


Figura 4 – Mapa batimétrico da Baía do Espírito Santo e entorno da Ilha de Vitória (RIGO, D., 2001; GEARH, 2002).

No estreitamento do Penedo e ao norte da Ilha das Pombas (figura 1, anexo B), as profundidades são maiores alcançando 24 m. Na região central está a desembocadura do estuário do Aribiri, um canal regido predominantemente pela maré, sem aporte fluvial significativamente importante para a representação hidrodinâmica local e que possui cerca de 70 hectares de vegetação de mangue. Entretanto, essa área é pequena quando comparada à extensão total de mangue no entorno da Ilha de Vitória, de cerca de 2000 hectares, que correspondem a aproximadamente 50% da área imersa do sistema estuarino do entorno da Ilha de Vitória durante as preamares de sizígia.

A hidrodinâmica da região do canal de acesso ao Porto de Vitória é regida predominantemente pela maré. A maré é semidiurna, sendo a componente harmônica de maré M2 (lunar semidiurna) a principal para a região, com período de 12,4 h e altura de 46,2 cm para o Porto de Vitória. A maré apresenta desigualdades diurnas. Registros de medições de correntes na região da Terceira Ponte próximo

ao ponto A (figura 3), e em Santo Antônio próximo ao ponto B (figura 3) e em região mais interna da Baía de Vitória mostram que há uma dominância das correntes de vazante que se intensifica para o interior da baía. Essa dominância está associada à intensificação das velocidades de vazante, devido ao efeito do volume de água armazenado nas planícies de maré ao fim da preamar (RIGO, 2004). No entanto, pode ocorrer redução ou inversão da dominância durante as marés de quadratura (BARROS, 2002). A maré apresentou alturas máximas de 1,7 m na maré de sizígia e 0,9 m na maré de quadratura para os períodos observados.

## 4.2 Levantamento de dados oceanográficos

Foi realizado o levantamento de uma série de informações medidas em campo necessárias à implantação do modelo computacional na região de estudo, incluindo-se registros de elevação do nível do mar e velocidades de correntes, utilizados na comparação dos resultados das simulações realizadas com o modelo numérico. Esses dados de elevação e velocidade correspondem a um período de três semanas, entre agosto e setembro de 2002, abrangendo fases de maré de quadratura e de maré de sizígia, levantados em estação em Santo Antônio, dentro do domínio modelado (GEARH, 2002b).

### 4.2.1 DADOS DE VELOCIDADE DAS CORRENTES

Estes dados (GEARH, 2002b) foram registrados com o uso de correntógrafo Sensordata (SD-6000), com capacidade de memória para registro de velocidade de correntes (intensidade e direção), com precisão de $\pm 1{,}0 cm.s^{-1}$, e configurado para leitura de dados em intervalos de coleta de 10 minutos. O aparelho foi instalado na região de Santo Antônio (posição UTM SAD69: 358201.9 W; 7752460.97 S) a cerca de 60% da profundidade da coluna d'água, a qual representa uma melhor aproximação para um valor médio das velocidades num perfil ao longo da vertical. Os dados de direção das correntes foram corrigidos para compensação da declinação magnética para a região.

#### 4.2.2 DADOS DE ELEVAÇÃO DE MARÉ

Esses dados (GEARH, 2002b) foram registrados na região de Santo Antônio (posição UTM SAD69: 358169.43 W; 7753189.6 S) através do uso de marégrafos Global Water WL300, que consistem em sensores de pressão com precisão de ±0,5 cm, instalados em tubos tranqüilizadores que eliminam a interferência das ondas curtas. Possuem módulo com capacidade para armazenamento dos dados, tendo sido utilizado um intervalo de 10 minutos para a amostragem de dados de altura de maré.

#### 4.2.3 DADOS DE BATIMETRIA E RUGOSIDADE DE FUNDO

Uma boa representação da batimetria da região modelada é fundamental para a representação correta dos campos de velocidade pelo modelo hidrodinâmico. Foram utilizadas informações de um amplo levantamento batimétrico realizado pelo GEARH (2002a) na região do canal de acesso ao canal do Porto de Vitória e dados batimétricos digitalizados dacarta náutica 1401 da Marinha do Brasil, 8° edição (DHN, 2002), e de folhas de bordo. No ANEXO B encontram-se as figuras da região do canal de acesso ao Porto de Vitória, extraídas da carta náutica 1401. A batimetria interpolada está representada na figura 4. Outro parâmetro fornecido ao modelo numérico foi o comprimento da rugosidade equivalente do fundo, utilizando o coeficiente de Chézy, que representa a resistência ao escoamento causada pelo atrito com o fundo. Mapas faciológicos, do estudo realizado por Paiva e Albino (2000), e folhas de bordo da marinha, com indicações do material granulométrico de fundo foram analisados para a discretização desse parâmetro de rugosidade, em termo da rugosidade equivalente de fundo, conforme classificação de valores recomendados para a rugosidade equivalente de fundo ($k_s$) (Tabela I), conforme a natureza granulométrica do material de fundo do canal, que varia de argila a areia grossa (Figura 5).

Tabela I: Valores recomendados para o equivalente da rugosidade de fundo ($k_s$) (ROSMAN, 1999)

| Tipo de Fundo | $k_s$ |
|---|---|
| Fundo arenoso | 0,0070 m <$k_s$< 0,0500 m |
| Fundo com vegetação | 0,0500 m <$k_s$< 0,1500 m |
| Fundo com obstáculos | 0,1500 m <$k_s$< 0,4000 m |

O coeficiente de Chézy ($C$) é relacionado ao coeficiente de fricção de Darcy-Weisbach (λ) como segue:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$$

com λ, para escoamentos turbulentos e de superfície hidraulicamente rugosa, dado por:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 5.75 \log\left(12.27 \frac{H}{k_s}\right)$$

onde $k_s$ é a altura da rugosidade equivalente do fundo.

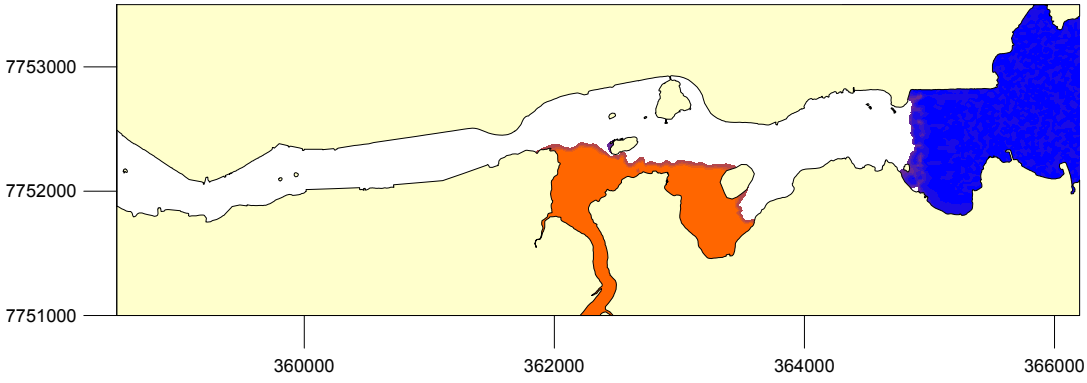


Figura 5 – Rugosidade no canal de acesso ao Porto de Vitória. As cores correspondem em granulometria: em vermelho à fração argila, em lilás à areia media a fina, e em azul à areia grossa.

#### 4.2.4 FATORES NÃO CONSIDERADOS

Não foram considerados na modelagem os efeitos dos ventos, descargas fluviais e áreas de inundação (planícies de maré). O efeito dos ventos foi desprezado devido a sua difícil previsibilidade, tendo-se o interesse de estudar isoladamente o efeito das

correntes de maré na circulação. Descargas fluviais não foram consideradas por serem muito pouco significativas as vazões dos canais que interceptam o canal de acesso ao Porto de Vitória. Também se preferiu simplificar o processamento numérico, ao ignorar as áreas de inundação, que respondem por uma parcela muito pequena de área no manguezal do Rio Aribiri, relativamente à área total de escoamento.

### 4.3 Implantação do modelo na área de estudo

A área estudada foi digitalizada através da carta náutica da DHN 1401 e carta de levantamentos do IBGE. Uma malha computacional precisou ser definida para a região. Nesse sentido, uma malha computacional mais refinada e que mantivesse a consistência do esquema numérico poderia resultar em um aumento do entendimento do padrão de escoamento na região, tal como a observação de recirculações ou vórtices de menor escala espacial. Entretanto, quanto maior o refinamento, maior a demanda por esforço computacional e tempo de processamento para a modelagem. Criou-se uma malha refinada para a região específica a ser estudada, composta por células quadradas de 10x10 metros abrangendo o domínio modelado (retângulo vermelho, figura 2), sobre a região digitalizada. O espaçamento de 10x10 metros foi escolhido em virtude de possibilitar a representação numérica das pequenas ilhas presentes na região modelada, além de um bom delineamento do contorno das margens do canal. Também a batimetria utilizada (GEARH, 2002a), fornecia grande resolução de até 10 metros, sobretudo na área adjacente ao Porto. Dada a carência de dados experimentais, utilizou-se em suas condições de contorno para fronteira aberta, resultados numéricos obtidos pelo modelo de malha de maior domínio e mais grosseira (25x25 m de lado) utilizado por Rigo (2004).

As condições de contorno fornecidas para o modelo foram elevações de maré ao longo do limite leste (A na Figura 3) e velocidades ao longo do limite oeste (B na Figura 3), obtidas de resultados numéricos do modelo de Rigo (2004). Valores de elevação foram utilizados em A e valores de velocidade em B.

# Capítulo 5

# Resultados

## 5. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados registros de medição e de simulações para elevações de maré e correntes para marés de quadratura e de sizígia.

### 5.1 Resultados dos registros experimentais de elevação e velocidade

Na figura 6 são apresentados os dados de velocidade na forma polar, para estação na proximidade do vão central da 3ª Ponte.

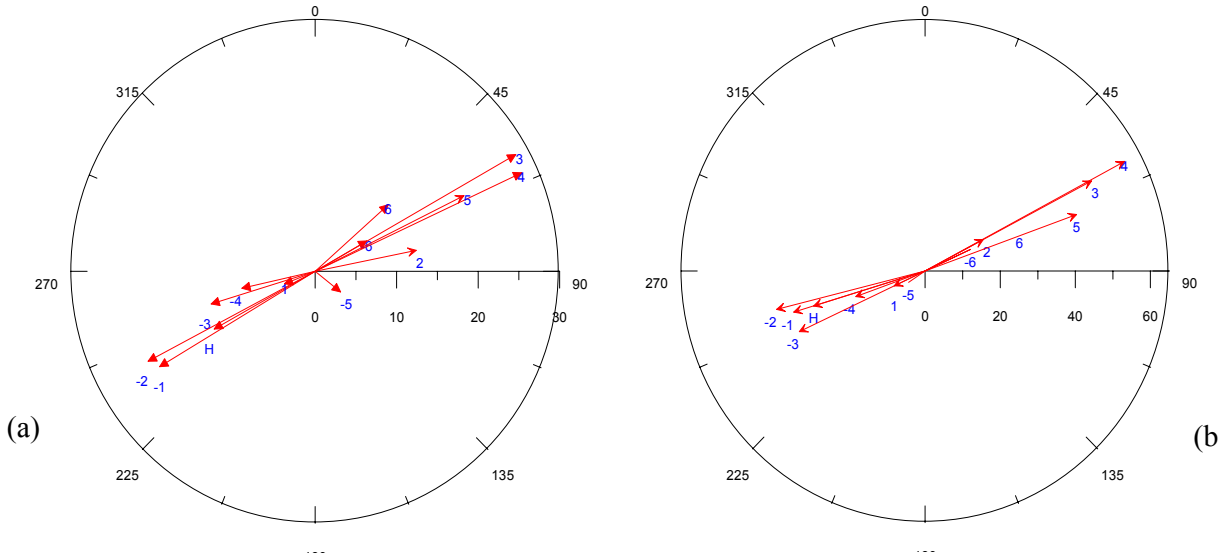


Figura 6 – Elipses de maré para a estação da 3° ponte (C1) para uma maré de quadratura (a) e para uma maré de sizígia (b). O raio da circunferência dá a escala de intensidade do vetor velocidade, em cm/s. O ângulo é no sentido horário, em relação ao norte. H indica o instante de maré alta e os demais vetores são referenciados em relação a H, em horas. Sinal negativo representa a enchente e positivo a vazante.

Na figura 7 são apresentados os dados dos registros de elevação e velocidade, para estação de Santo Antônio.

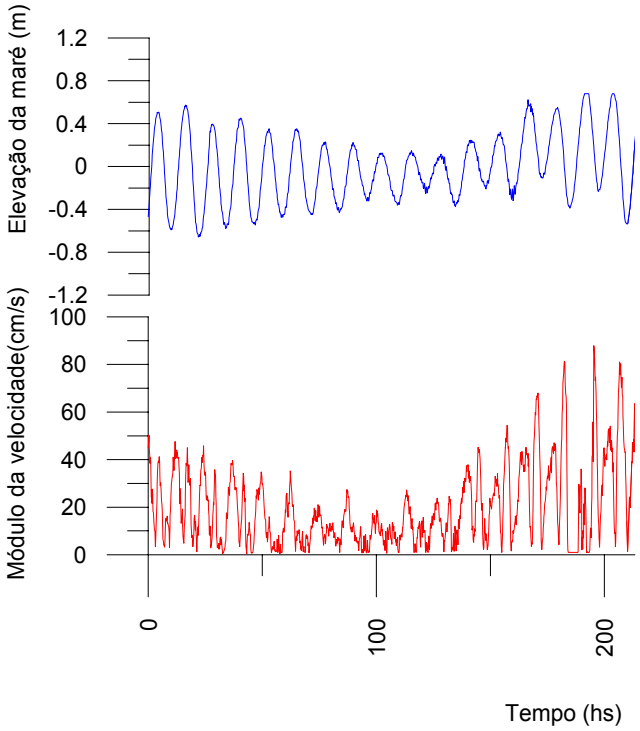


Figura 7 – Elevações de maré e velocidades na estação de Santo Antônio para o período de levantamento de dados.

Na figura 8 são apresentadas a elevação de maré e a velocidade (direção e magnitude) para uma maré de quadratura e uma maré de sizígia na estação de Santo Antônio.

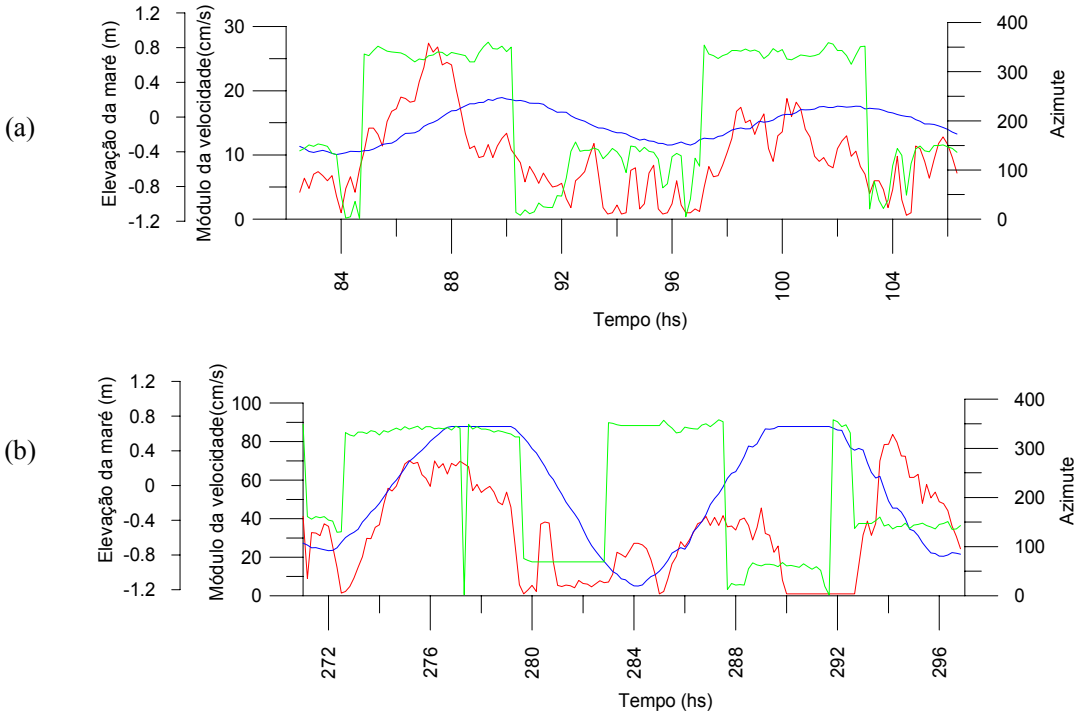


Figura 8 – Elevações de maré (linha azul), velocidades (linha vermelha) e direção do escoamento (azimute: ângulo com a direção norte no sentido horário; linha verde) em Santo Antônio. (a) Maré de quadratura, (b) Maré de sizígia.

## 5.2 Resultados numéricos de elevação e velocidade para a estação experimental

São apresentados resultados das simulações numéricas deste trabalho (malha refinada), comparadas aos resultados do modelo com a malha de maior domínios (malha global, resultados do modelo utilizado por Rigo (2004)) e com os dados de medições registradas em campo (experimental).

A figura 9 apresenta as elevações de maré para estação de Santo Antônio para uma maré de quadratura. Já na figura 10 são apresentadas as velocidades para estação de Santo Antônio para uma maré de quadratura. A figura 11 apresenta as elevações de maré para estação de Santo Antônio para uma maré de sizígia. São apresentadas na figura 12 as velocidades para estação de Santo Antônio para uma maré de sizígia.

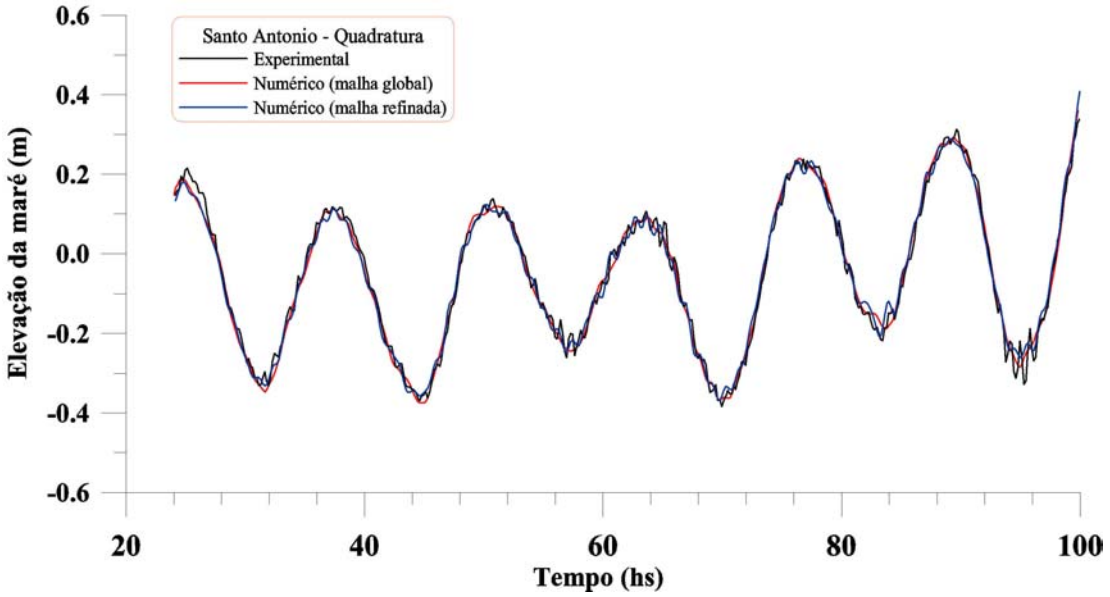


Figura 9: Elevação de maré (modelado com malha refinada, modelado com malha global, e registro medido) na quadratura em Santo Antônio.

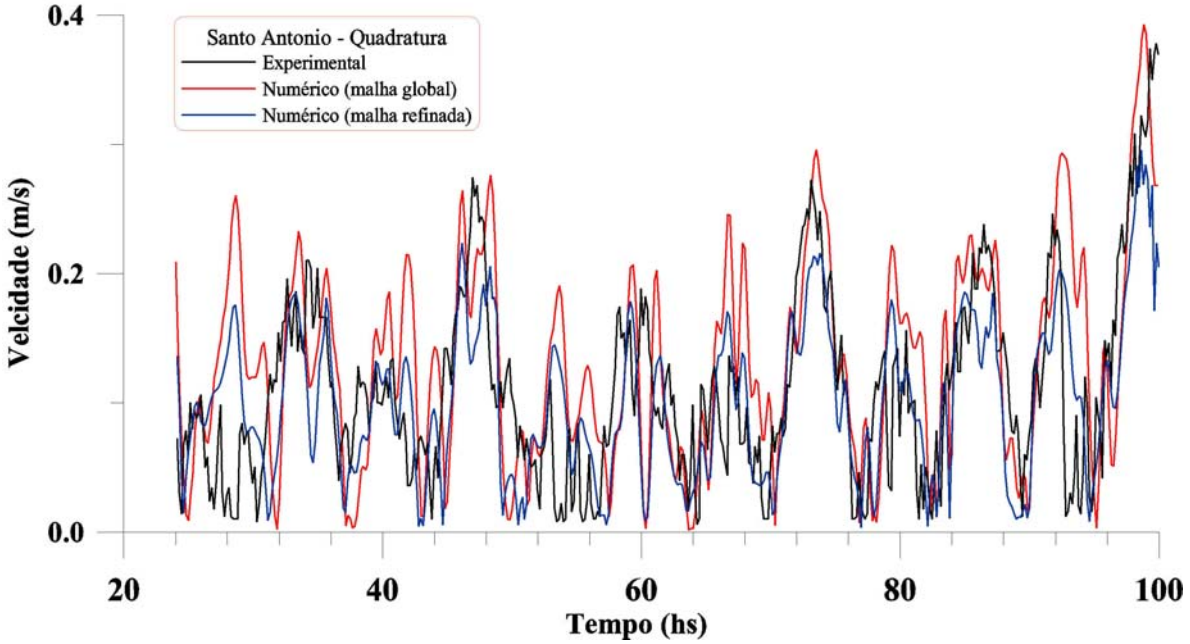


Figura 10: Magnitude de correntes (modelado com malha refinada, modelado com malha global, e registro medido) na quadratura em Santo Antônio.

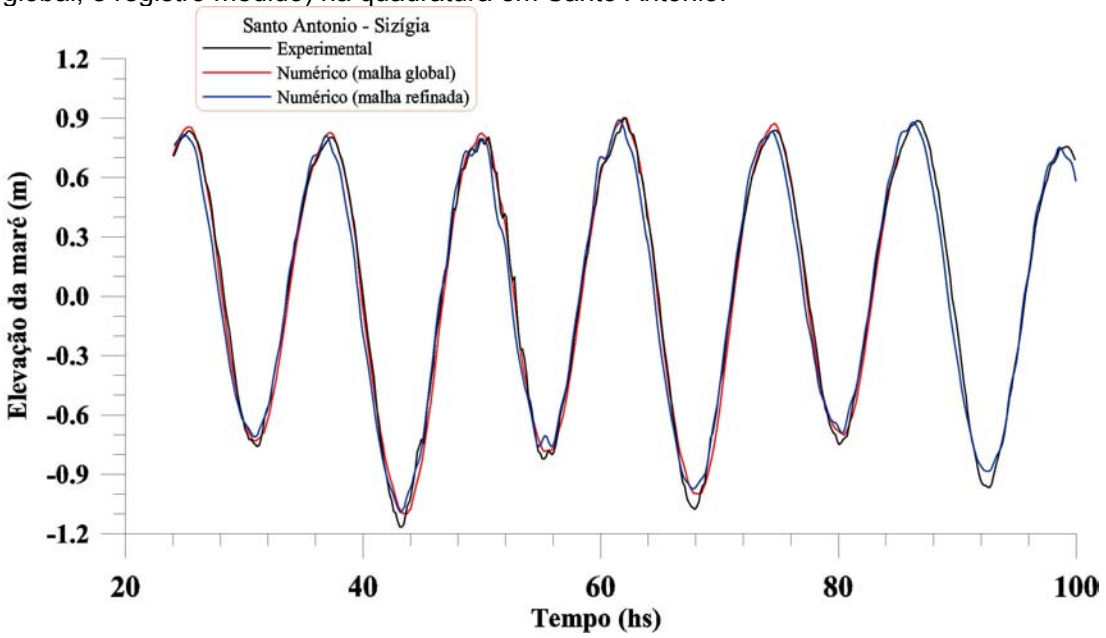


Figura 11: Elevação de maré (modelado com malha refinada, modelado com malha global, e registro medido) na sizígia em Santo Antônio.

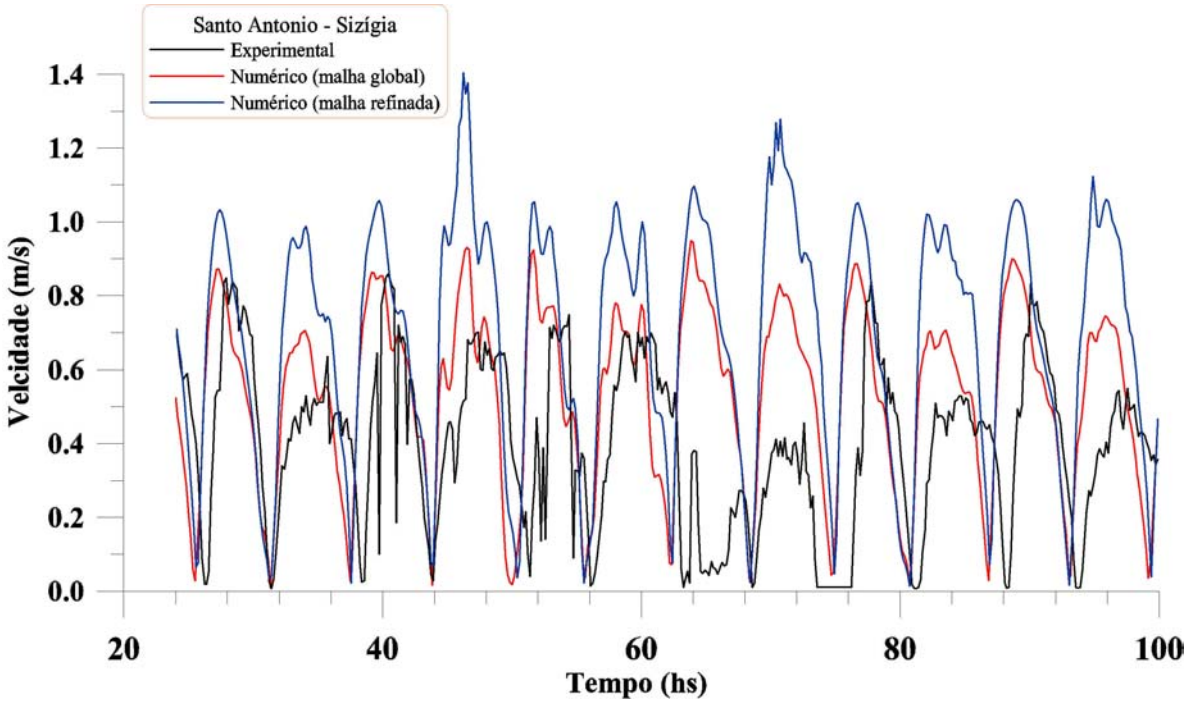


Figura 12: Magnitude de correntes (modelado com malha refinada, modelado com malha global, e registro medido) na sizígia em Santo Antônio.

### 5.3 Resultados numéricos dos campos de velocidade

Os resultados dos campos de velocidade ao longo do canal de acesso ao Porto de Vitória, típicos de marés de quadratura e sizígia, em situações de enchente e vazante de maré, são apresentados nas figuras 13 até 20.

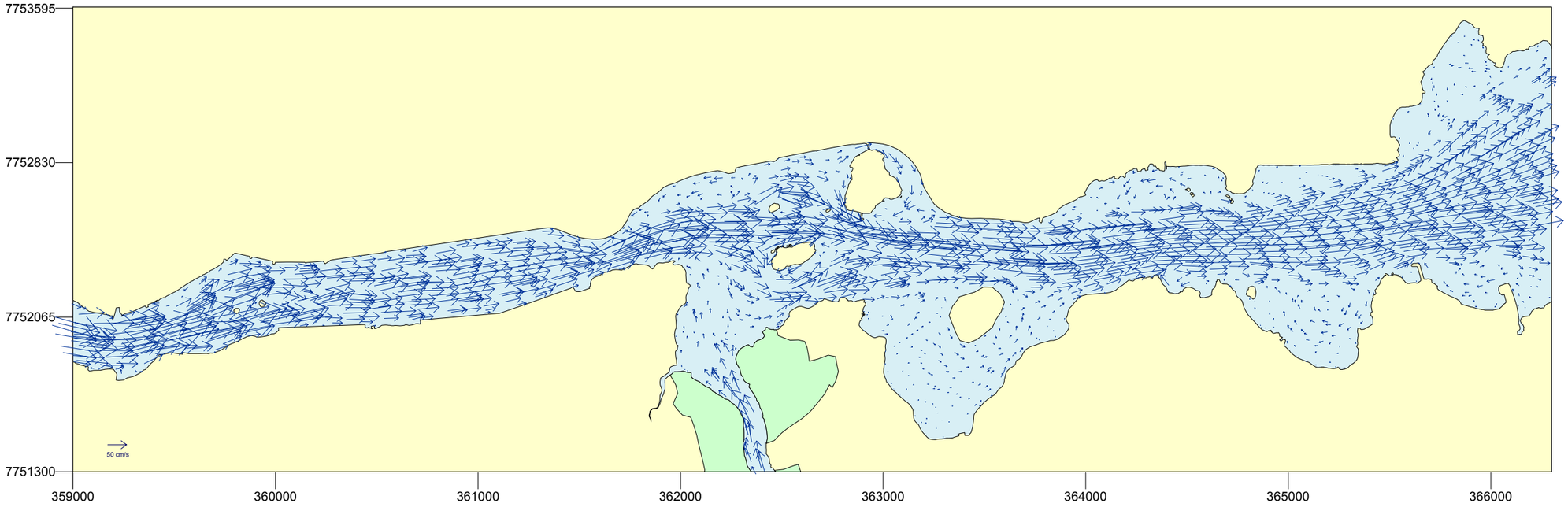


Figura 13. Campo de velocidades para uma situação típica de vazante na sizígia (2,5 horas após o início da vazante em Santo Antônio).

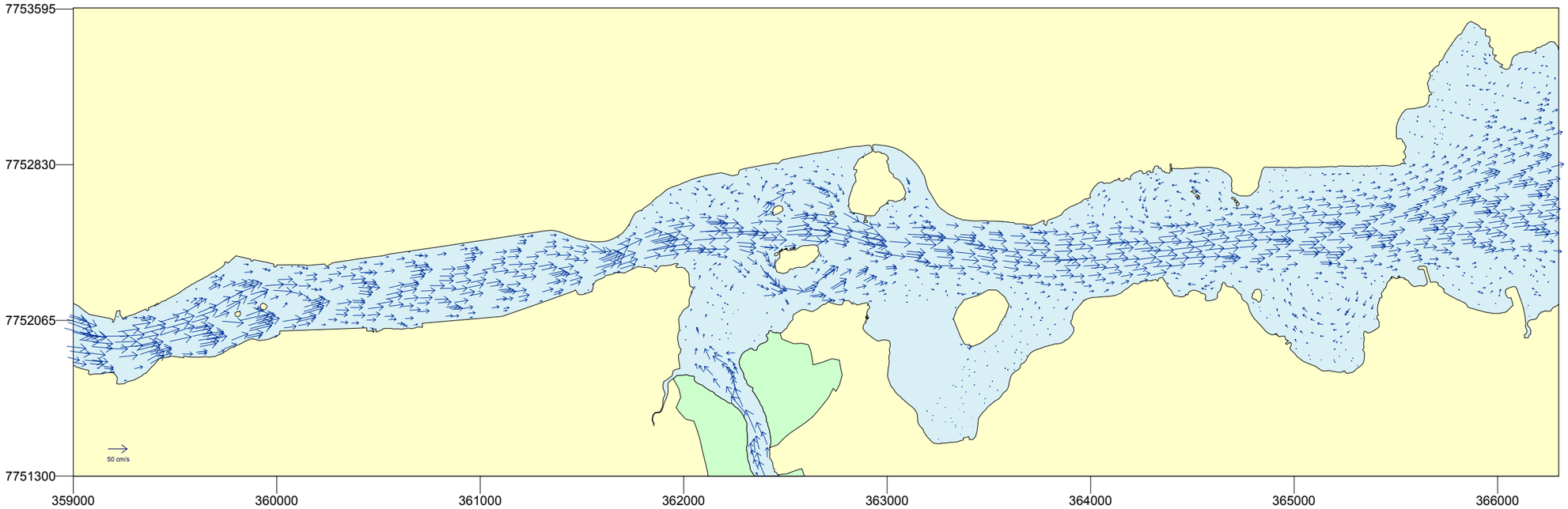


Figura 14. Campo de velocidades para uma situação típica de vazante na sizígia (4,5 horas após o início da vazante em Santo Antônio).

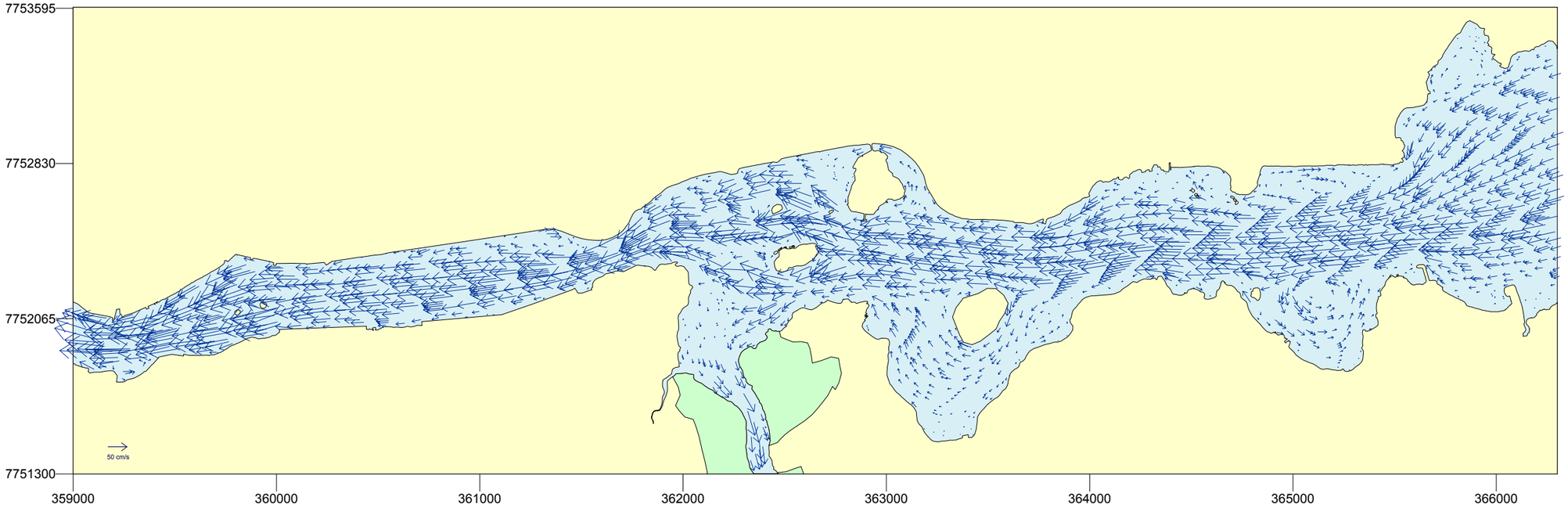


Figura 15: Campo de velocidades para uma situação típica de enchente na sizígia (2,5 horas após o início da enchente em Santo Antônio).

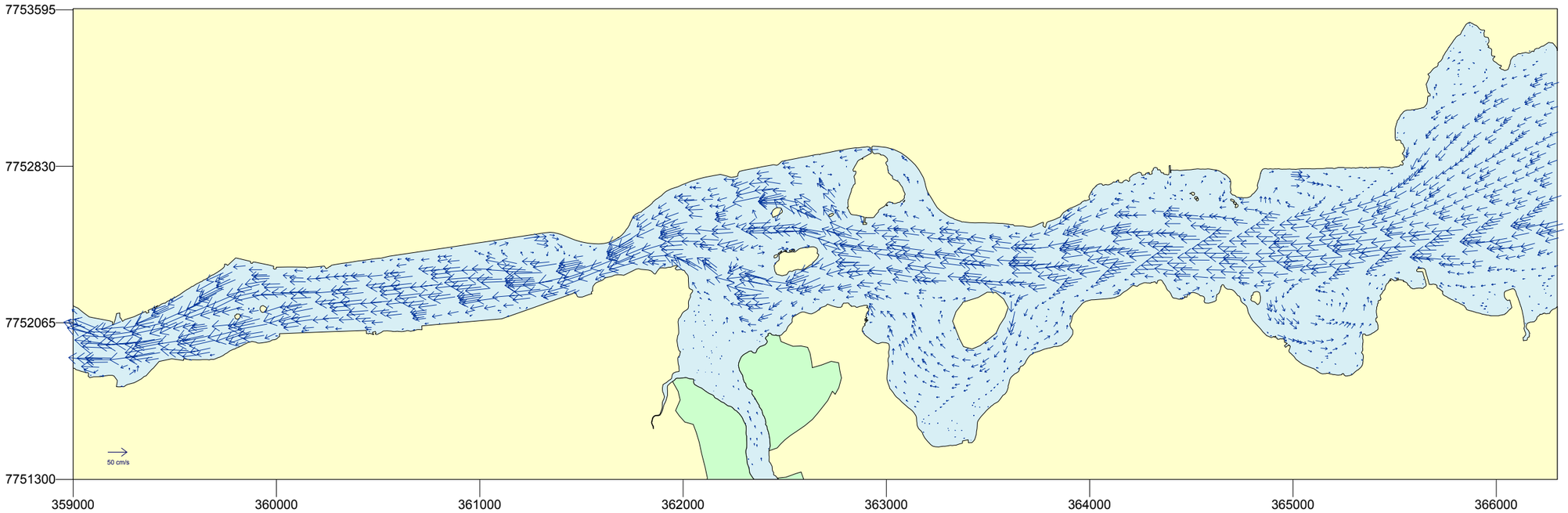


Figura 16. Campo de velocidades para uma situação típica de enchente na sizígia (5 horas após o início da enchente em Santo Antônio).

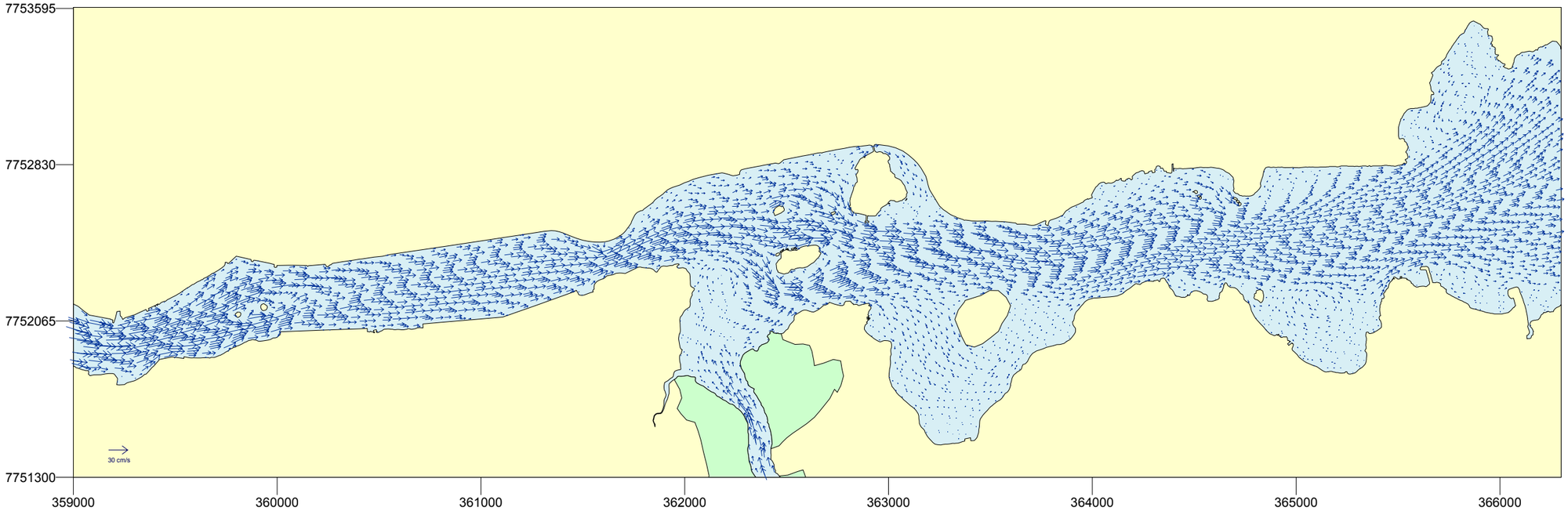


Figura 17. Campo de velocidades para uma situação típica de vazante na quadratura (2 horas após o início da vazante em Santo Antônio).

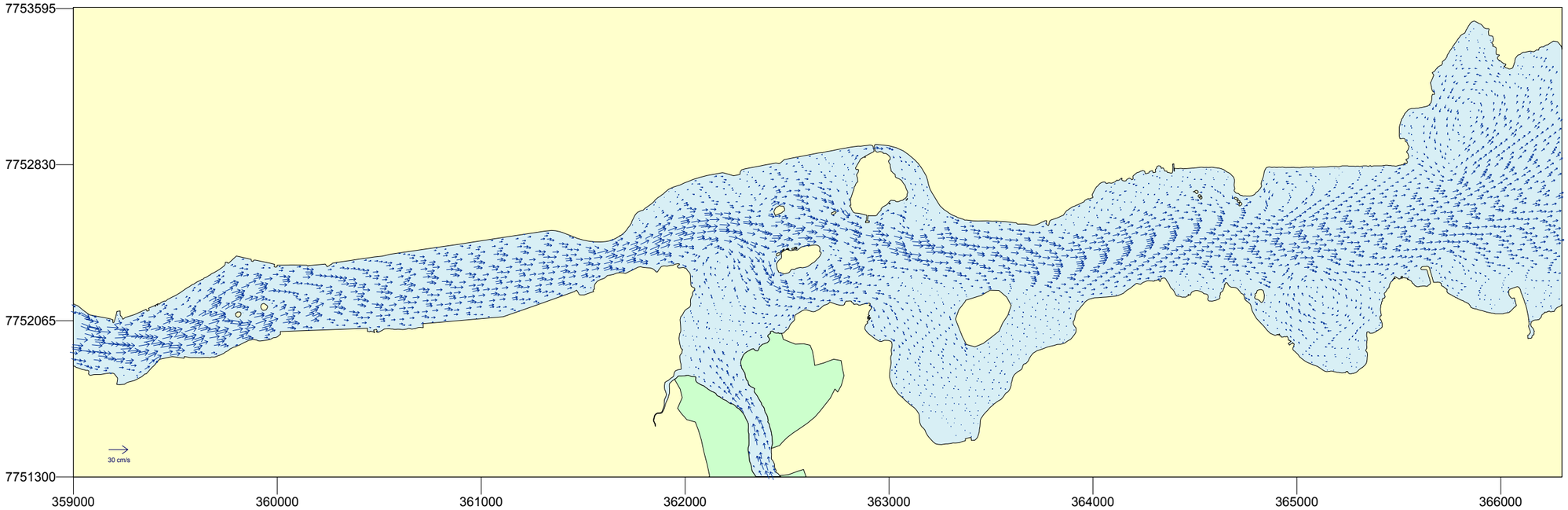


Figura 18. Campo de velocidades para uma situação típica de vazante na quadratura (4 horas após o início da vazante em Santo Antônio).

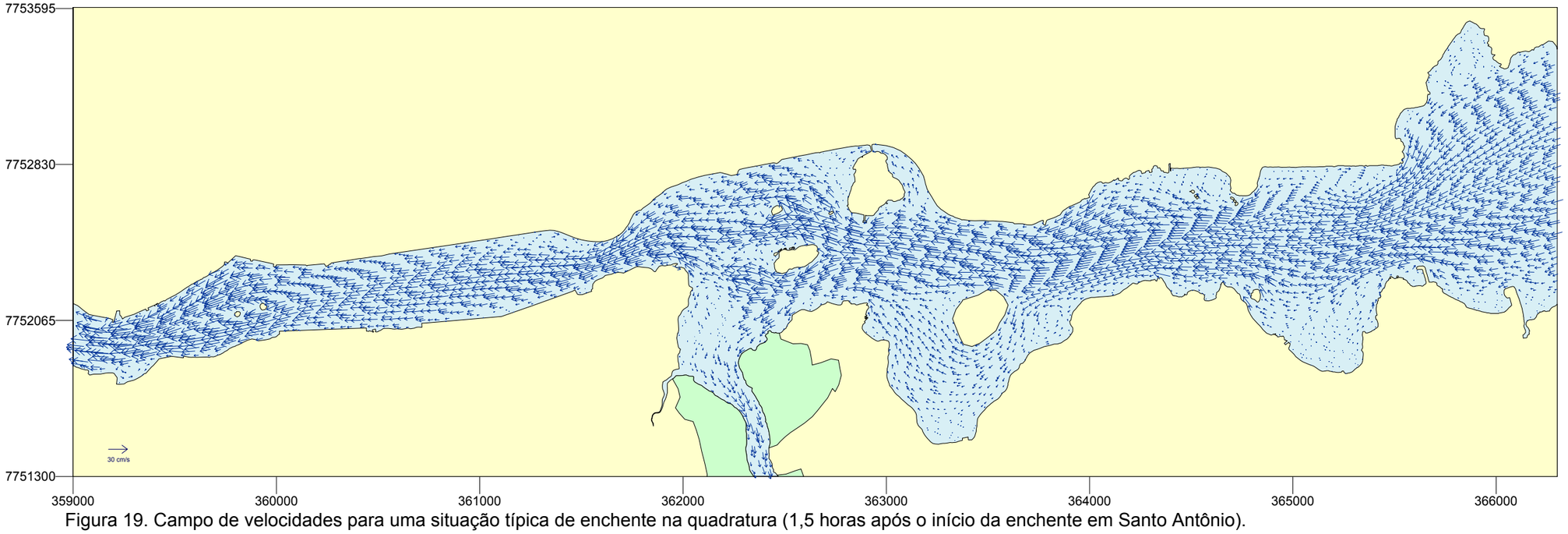


Figura 19. Campo de velocidades para uma situação típica de enchente na quadratura (1,5 horas após o início da enchente em Santo Antônio).

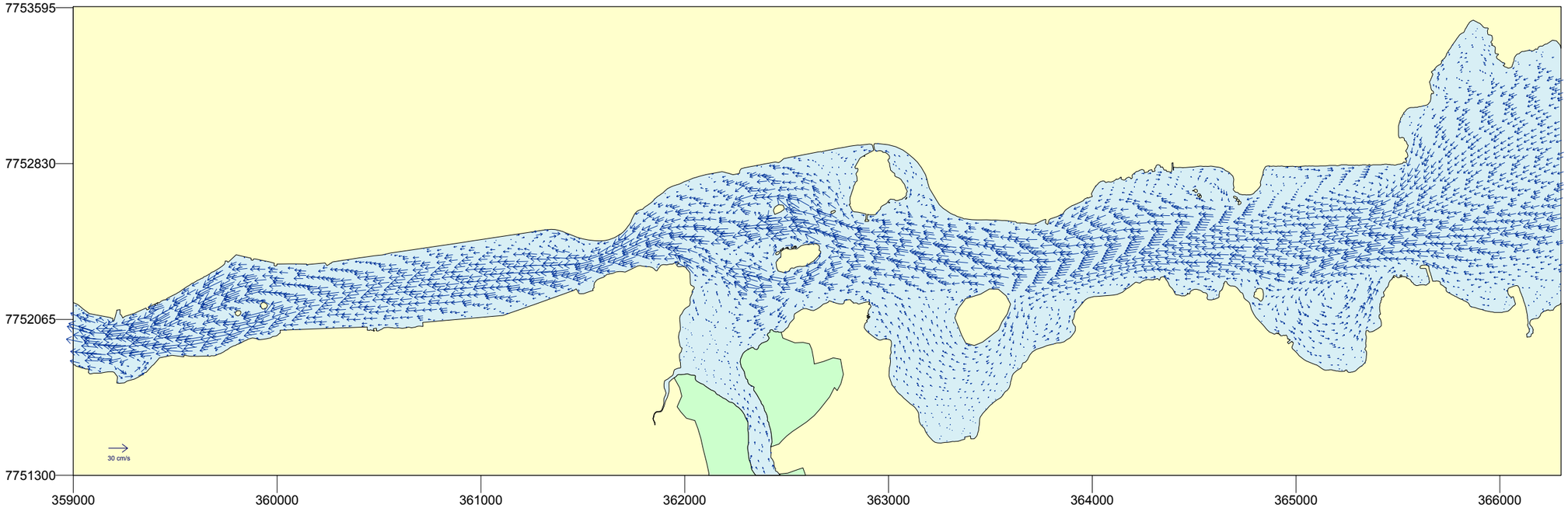


Figura 20. Campo de velocidades para uma situação típica de enchente na quadratura (2,5 horas após o início da enchente em Santo Antônio).

# Capítulo 6

# Discussão dos resultados

# 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

## 6.1 Resultados da análise de registros experimentais de elevação e velocidade

Na terceira ponte verifica-se que as velocidades são predominantemente a nordeste, durante o período de vazante e no predominantemente no sentido sudoeste na enchente (Figura 6). No período de quadratura a inversão da direção do escoamento é mais gradual, ocorrendo uma deflexão até que a inversão tenha se completado, que no período analisado, se deu em um intervalo de até 80 minutos. No período de sizígia a inversão tende a ser repentina. As velocidades máximas encontradas para as enchentes e vazantes de quadratura foram de 0,20ms-1 e 0,30ms-1 respectivamente, e 0,45ms-1 e 0,65ms-1 para as enchentes e vazantes de sizígia. Há uma assimetria nas correntes de maré, com dominância de vazante, particularmente durante as marés de sizígia.

Dados de correntes registrados na estação de Santo Antônio (Figura 7) permitem observar que as velocidades máximas encontradas para as enchentes e vazantes de quadratura foram de 0,43ms-1 e 0,37ms-1 respectivamente, e 0,72ms-1 e 0,85ms-1 para as enchentes e vazantes de sizígia. No período de sizígia as velocidades mais intensas são no sentido de vazante, com um intervalo de enchente mais prolongado. Durante a aproximação da quadratura, entretanto, notou-se uma tendência à inversão da dominância, com velocidades de enchente superiores às de vazante e o tempo de vazamento da maré foi até oitenta minutos maior que o tempo de enchimento.

A figura 5 mostra as elevações de maré e as velocidades de corrente para Santo Antônio registradas em campo com um correntógrafo Sensordata (SD-6000), com capacidade de memória para registro de velocidade de correntes (intensidade e direção), com precisão de ±1,0 cm/s-1, configurado para leitura de dados a cada 10 minutos. O escoamento se dá predominantemente no sentido norte-noroeste durante a enchente e sul-sudeste durante a vazante. Na maré de sizígia o

escoamento no sentido de vazante pode variar bastante entre marés consecutivas, podendo exibir velocidades dirigidas para o sentido leste (Figura 8).

Nos períodos de alturas de maré intermediárias, em Santo Antônio a dominância é de velocidades de enchente, enquanto nas maiores marés a dominância é de vazante. Nos períodos de quadratura, as maiores velocidades são obtidas na enchente, porém as magnitudes são baixas e o comportamento é oscilante, não apresentando uma tendência geral clara. As velocidades tendem a ser maiores mais para o meio da enchente e mais distribuídas durante a vazante. Na sizígia as maiores velocidades da enchente são alcançadas na segunda metade da enchente.

## 6.2 Resultados de elevação e velocidade numéricos para a estação experimental

Na maré de quadratura os resultados das elevações de maré obtidas pelo modelo para a malha refinada foram bastante coincidentes com os resultados obtidos por Rigo (2004) na malha global, de maior domínio (Figura 9). O erro médio quadrático da elevação em relação ao registro experimental foi de apenas 2%. As correntes modeladas com a malha refinada foram menores que as modeladas pela malha global, e se aproximaram bem do registro medido em campo, sendo que os valores de velocidade se afastaram um pouco mais somente nos picos de maior velocidade (Figura 10). Houve uma boa representação das velocidades e da dominância das correntes.

Na maré de sizígia, houve uma diferença entre os resultados de elevação numérica da malha refinada e da malha global, com as maiores diferenças no entorno da preamar (Figura 11). A propagação da onda de maré ao longo do canal foi mais rápida nas simulações de sizígia realizadas, o que se observa pelo registro de elevação adiantamento da fase da vazante da maré simulada em comparação ao registro de medição. Para a maré de sizígia a dominância das velocidades não foi bem reproduzida e os resultados obtidos apresentaram magnitudes de 20 a 60 cm/s superiores em relação ao registro experimental.

### 6.3 Análise dos resultados numéricos dos campos de velocidade

Nas figuras 13 a 20 são apresentados os campos de velocidades numéricos para situações típicas de maré vazante e de maré enchente para quadratura e sizígia. Os campos de velocidade exibem um padrão similar nas marés de quadratura e de sizígia, porém nesta última atingem-se maiores magnitudes.

Na entrada do canal de acesso ao Porto de Vitória, próximo a 3ª Ponte, as correntes foram mais intensas na área do canal dragada a 13 metros de profundidade, mas durante o período de maior intensidade das correntes há uma menor diferença entre as velocidades ao longo da seção transversal.

Os campos de velocidade simulados mostram o escoamento na entrada do canal de acesso ao Porto de Vitória ocorrendo em forma de jato durante o período de maior intensidade das correntes. Ao longo da extensão longitudinal do canal principal de escoamento (região dragada, onde as profundidades são maiores) se desenvolvem maiores velocidades de escoamento. As velocidades diminuem com a proximidade das margens e regiões rasas. As diferenças existentes entre as velocidades ao longo deste canal para um mesmo instante de tempo são determinadas principalmente pela área de seção do escoamento. Velocidades máximas são observadas em estreitamentos da seção entre o Penedo e entre a Ilha das Pombas e Ilha das Tendas (Figura 2, ANEXO B), onde velocidades atingem até 1,15 m/s e 1,0 m/s respectivamente, na maré de sizígia. As correntes são, em geral, unidirecionais e alinhadas ao canal, à exceção de elipses de maré formadas próximo dos limites oeste e leste da região de estudo e onde ocorrem vórtices.

Observou-se nas simulações dos campos de velocidade a formação de alguns vórtices em ambos os lados do canal, nas reentrâncias da costa em locais que vão desde o limite leste à entrada do canal até o saco do Aribiri, onde está localizado o porto da Companhia Portuária de Vila Velha (CPVV). Alguns vórtices como o que se observou na Enseada de Vila Velha (Figura 2, ANEXO B), permanecem durante toda a vazante e enchente, sendo que o sentido rotacional se inverte com a inversão do escoamento. A magnitude dos vórtices obedece de maneira geral a uma proporção

com a velocidade de escoamento no canal central, dependendo do estágio da maré enchente ou maré vazante. Alguns vórtices possivelmente desenvolvem-se em virtude da existência de reentrâncias da costa com batimetria rasa, que ocasionam o cisalhamento das camadas do fluido induzindo movimentos rotacionais. Suas velocidades são geralmente baixas, menores que 10 cm/s-1 e constituem zonas de baixa advecção. Na sizígia, entretanto em alguns momentos atingiu-se nos vórtices da Enseada de Vila Velha, velocidades de até 30 cm/s. É presico ter cautela na avaliação destes resultados, podendo haver erros na magnitude de velocidade desses vórtices em função das condições de contorno utilizadas.

A ocorrência de vórtices pode ter importância representativa para os processos dispersivos e de deposição e transporte de sedimentos para a região. Nos vórtices há uma capacidade limitada de transporte de constituintes deste para outras regiões adjacentes, favorecendo o acúmulo de constituintes em seu escoamento circulatório. Mesmo sendo recirculatório, o escoamento é geralmente mais lento que nas regiões do escoamento principal ao centro do canal, podendo-se esperar intensidades de turbulência menores em tais regiões. Entretanto, as intensidades observadas indicam que se possa esperar uma capacidade relativamente alta de misturamento local, favorecendo a homogeneização de concentrações de constituintes associada à vorticidade.

O Canto da Jaburuna, região abrigada em uma concavidade para o lado de Vila Velha, atrás da Ilha das Cobras, aparece durante os períodos de vazante como uma região de fraca circulação, caracterizando-se como uma zona morta. Essa região do Canto da Jaburuna (Figura 2, ANEXO B) é bastante rasa, com apenas 0,80 cm de profundidade ao nível médio e é uma região de deposição de lama. Durante a maré enchente, entretanto, se apresentou uma circulação por essa região, atingindo valores máximos de 10 cm/s na quadratura a 30 cm/s na sizígia.

Na desembocadura do Rio Aribiri, próximo ao Terminal da CPVV (Figura 1, ANEXO B), apresentou-se uma região de estagnação das velocidades. A circulação em volta da Ilha da Fumaça também apresenta velocidades baixas, de até 10 cm/s.

Na localização da Ilha das Pombas, o fluxo principal ramifica-se na seção entre esta ilha e Ilha das Tendas e na seção entre Ilha das Pombas e a margem de Vila Velha. Apresentaram-se velocidades de fluxo com magnitudes próximas nessas duas seções durante a maré de quadratura. Durante a maré de sizígia as velocidades do fluxo através da seção entre a Ilha das Pombas e Ilha das Tendas, se apresentaram superiores às velocidades através da seção entre Ilha das Pombas e a margem de Vila Velha.

# Capítulo 7

# Conclusões

## 7. CONCLUSÕES

- A hidrodinâmica no canal é bem mais intensa na condição de maré de sizígia que na condição de maré de quadratura, mas o padrão geral de escoamento é semelhante para ambas as situações.

- As velocidades de correntes ao longo do canal apresentam dominância de vazante nas marés de maior altura, podendo inverter-se para enchente a dominância com a proximidade do período de quadratura na região mais interna do canal, na proximidade se Santo Antônio.

- As velocidades mais intensas das correntes na região do canal de acesso ao Porto de Vitória ocorrem sempre ao longo do percurso dragado, atingindo as maiores velocidades ao norte da Ilha das Pombas e no estreitamento do Penedo.

- Os campos de velocidade simulados pelo modelo indicaram a existência de vórtices permanentes na Enseada de Vila Velha e a identificação de zonas de recirculação pouco advectivas como no Canto da Jaburuna, que podem ter importância significativa para os processo de dispersão de poluentes e de sedimentação na região.

# Capítulo 8

# Recomendações para trabalhos futuros

## 8. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Em futuros trabalhos recomenda-se realizar simulações com o uso de condições de contorno de elevação ou fluxo variáveis ao longo da fronteira aberta.

- Realizar teste de malha para verificar qual espaçamento de malha é mais vantajoso para o estudo da região.

- Incluir o efeito de outras forçantes na aplicação do modelo, como o vento e planícies de maré.

- Realizar monitoramentos em campo no canal de acesso ao Porto de Vitória usando a técnica de derivadores, para buscar avaliar a ocorrência de vórtices preditos pelas simulações numéricas.

- Realizar estudos experimentais e numéricos para avaliar o tempo de residência de constituintes ao longo do canal de acesso ao Porto de Vitória e a influência dos vórtices nos processos de formação de correntes residuais, dispersão de constituintes e deposição de sedimentos.

- Avaliar processos dispersivos nas regiões de vórtices preditos usando-se técnicas como experimentos em campo com lançamento de traçadores.

# Capítulo 9

# Referências

## 9. REFERÊNCIAS


1 AGENDA 21. CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE DESENVOLVIMENTO. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/se/agen21/ag21global/consulta.html>. Acesso em 20 jan. 2004.

2 BARROS, G. C. **Identificação dos processos físicos na hidrodinâmica das águas do entorno da ilha de Vitória – *ES*.** 2002. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

3 BLANTON, J. O.; LIN, G; ELSTON, S. A.. Tidal current asymmetry in shallow estuaries and tidal creeks. **Continental Shelf Research** , v. 22, p.1731–1743., 2002.

4 BROWN, J.; COLLING A.; PARK D.; PHILLIPS J., ROTHERY D.; WRIGHT J. **Waves, Tides and Shallow-water Processes**. The Open University, 1989.

5 CASTRO, M. S. M. **Análise da influência das águas do Canal da Passagem sobre o padrão de escoamento na Baía do Espírito Santo.** 2001. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

6 CHACALTANA, J.T.A.; RIGO, D.; CURTO, A.M.; PACHECO, C.G. Influência do Manguezal no padrão de escoamento do Sistema Estuarino da Ilha de Vitória. 2003. In: V SEMINÁRIO ESTADUAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE. Vitória. **Anais eletrônicos do V SESMA.**

7 CHOW, V.T.**Open-Channel Hydraulics**. McGraw-Hill Book Co. Singapore, 1959.

8 CONCEICÃO, C. de A., **Estudo do movimento de manchas de óleo a partir de pontos do canal de acesso ao porto de Vitória e estimativa de aporte ao manguezal do Rio Aribiri na Baía de Vitória – ES**. 2003. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

9 DHN, 2002, **Carta Náutica 1401** *(28/09/02)*, Marinha do Brasil.

10 DYER, K. R. **Estuaries -** a physical introduction. Second edition. John Wiley & Sons. 342p. 1997.

11 EISMA, D., 1988, **Intertidal Deposits – River Mouths, Tidal Flats, and Coastal *Lagoons***, CRC Press.

12 FALCONER, R.A. **Mathematical Modelling of Jet-Foerced Circulation in Reservoirs and Harbours**.1976.Tese. Dept. of Civil Engineering of Imperial College, London.

13 FALCONER, R. A.; WU, Y.; STRUVE, J. Mathematical modeling of tidal currents in mangrove forests. **Environmental Modelling & Software**. V. 16, p. 19-29, 2001.

14 FEMAR. **Catálogo de estações maregráficas brasileiras**. Fundação de Estudos do Mar. Rio de Janeiro. 2000.

15 FISCHER, H.B. **Mixing in inland and coastal waters.** Academic Press, New York, 1979.

16 GEARH, 2002a, **Batimetria da Baía de Vitória e do canal de acesso ao Porto de Vitória**, Relatório, Vitória, Brasil.

17 GEARH, 2002b, **Monitoramento de Correntes no Entorno da Ilha de Vitória, Relatório**,Vitória, Brasil.

18 IUCN, PNUMA, WWF - **Cuidando do Planeta Terra. Uma estratégia para a Vida**. São Paulo: Ed. SMA, 1992.

19 KJERVE, B. **Hydrodynamics of Estuaries**. Volume 1. Estuarine physics. CRC Press Inc. Florida. 1988.

20 MIRANDA, L. B; KJERFVE, B.; CASTRO, B. M.;. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. 1. ed. São Paulo: Edusp, 2002.

21 LEWIS, Roy. **Dispersion in Estuaries and Coastal Waters**. 1. Ed. West Sussex: Willy, 1997.

22 MACIEL, M. A. **Modelagem do Padrão de Escoamento no Canal da Passagem, Vitória-ES.** 2004. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

23 MAZDA, Y., KANAZAWA, N. & WOLANSKI, E. Tidal asymmetry in mangrove creeks. **Hydrobiology**. V. 295, p. 51-58, 1995.

24 MCDOWELL, D.M. & OCONNOR, B.A. **Hydraulic Behaviour of Estuaries**. The MacMillan Press Ltda, 1977.

25 MELO, E.; MARTINS, R.P.; FRANCO, D. Standing wave tide at Florianópolis Bay (Brazil) and its influence on bay pollution. **Coastal Environment Management and Conservation**. v. 2. p. 143-151, 1997.

26 PAIVA, D. S. **Estudo sedimentológico do material de fundo do Canal da Passagem e trecho da Baía de Vitória – ES**. 1999. Monografia. Curso de Especialização "Lato Sensu" em Ecologia e Recursos Naturais. DERN. Universidade Federal do Espírito Santo.

27 RIGO, D., 2001, ***Levantamento Topo-Batimétrico dos Manguezais e Canais da Baía de Vitória – Relatório Final***, FACITEC – PMV, Vitória, Brasil.

28 RIGO. **Modelagem e monitoramento do escoamento em regiões estuarinas com manguezais.** 2004**.** Tese. Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

29 ROCHA, A.B. **Avaliação Correlativa entre Hidrodinâmica e Qualidade de Água para a Baía do Espírito Santo**. 2000. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo.

30 ROSMAN, P.C.C. **Model Development for the BTS.** Project-report 02. Hydrosch2mhill, COPPE/UFRJ, 1999.

31 ROSMAN, P.C.C.; **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos**. ABRH, v. 1, 1989.

32 SANKARANARAYANAN, S.; MCCAY, D. F. Application of a two-dimensional depth averaged hydrodynamic tidal model. **Ocean Engineering.** v. 30, p. 1807–1832, 2003.

33 SANTIAGO, D. I.; CHACALTANA, J. T. A. **Correntes geradas pela componente de maré $M_2$ no canal de acesso ao Porto de Vitória**. 2003. In: II SEMINÁRIO ESPÍRITO-SANTENSE DE RECURSOS HÌDRICOS. Vitória. **Anais do II SERH.**

34 TRENHAILE, A.S. **Coastal dynamics and landforms**, Oxford University Press, 1997.

35 WOLANSKI, E., JONES, M. & BUNT, J. S. 1980 Hydrodynamics of a tidal creek-mangrove swamp system. .Australian. **Journal of Marine Freshwater Research. V.** 31, p. 431-450.

# Anexos

## ANEXO A

Tabela I - Constantes harmônicas para o Porto de Vitória (FEMAR, 2000).

| **Componente Astronômica** | **Amplitude** (cm) | **Omega** (graus/hora) | **Fase** (graus) |
|---|---|---|---|
| 1M2 | 46,2 | 28,9841042 | 88,6 |
| 1S2 | 20,4 | 30 | 99,2 |
| 0MKS2 | 10,7 | 29,0662415 | 163,3 |
| 1O1 | 8,8 | 13,9430356 | 97,6 |
| 1N2 | 6,8 | 28,4397295 | 97,3 |
| 1K2 | 6,1 | 30,0821373 | 96,7 |
| 1SA | 5,5 | 0,0410686 | 1,8 |
| 1K1 | 5,2 | 15,0410686 | 158,1 |
| 1Q1 | 2,6 | 13,3986609 | 66,8 |
| 1MU2 | 2,1 | 27,9682084 | 106,6 |
| 1P1 | 1,8 | 14,9589314 | 149,5 |
| 12N2 | 1,6 | 27,8953549 | 112,2 |
| 1MM | 1,5 | 0,5443747 | 273,6 |
| 1L2 | 1,4 | 29,5284789 | 88,3 |
| 1NU2 | 1,3 | 28,5125831 | 103,4 |
| 0MSF | 1,1 | 1,0158958 | 213,8 |
| 1T2 | 0,8 | 29,9589333 | 143,3 |
| 1SSA | 0,7 | 0,0821373 | 73,8 |
| 1M3 | 0,7 | 43,4761563 | 97,3 |
| 0SK3 | 0,7 | 45,0410686 | 227,8 |
| 1S1 | 0,6 | 15 | 100,8 |
| 0MNS2 | 0,6 | 27,4238337 | 98,3 |
| 1LAMBD2 | 0,6 | 29,4556253 | 3,6 |
| 0MS4 | 0,6 | 58,9841042 | 272,8 |
| 0OQ2 | 0,6 | 27,3416964 | 359,4 |
| 1SIGMA1 | 0,5 | 12,9271398 | 46,1 |
| 12Q1 | 0,5 | 12,8542862 | 78,4 |
| 0KJ2 | 0,5 | 30,6265119 | 279 |
| 0MO3 | 0,5 | 42,9271398 | 242,7 |
| 02MS6 | 0,5 | 87,9682084 | 47,4 |
| 0MSN2 | 0,5 | 30,5443747 | 232,7 |
| 1PI1 | 0,1 | 14,9178647 | 266,8 |

**ANEXO B**

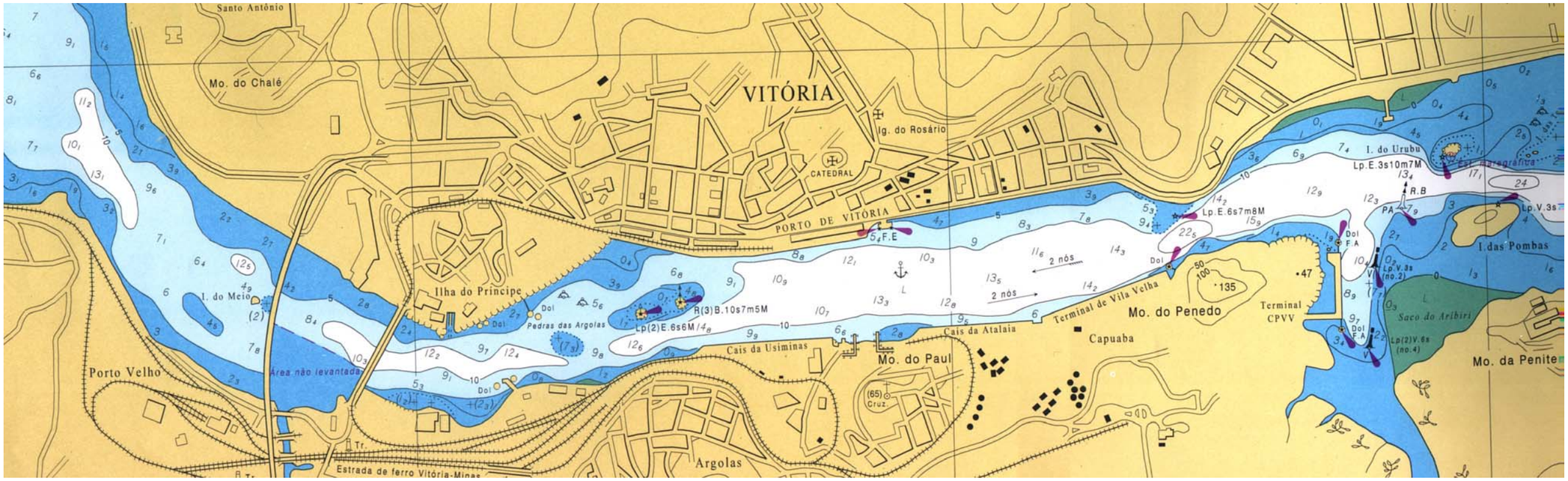


Figura 1- Recorte da Carta Náutica 1401(DHN, 8° edição) abrangendo a região do canal de acesso ao Porto de Vitória, desde Santo Antônio até a Ilha das Pombas.

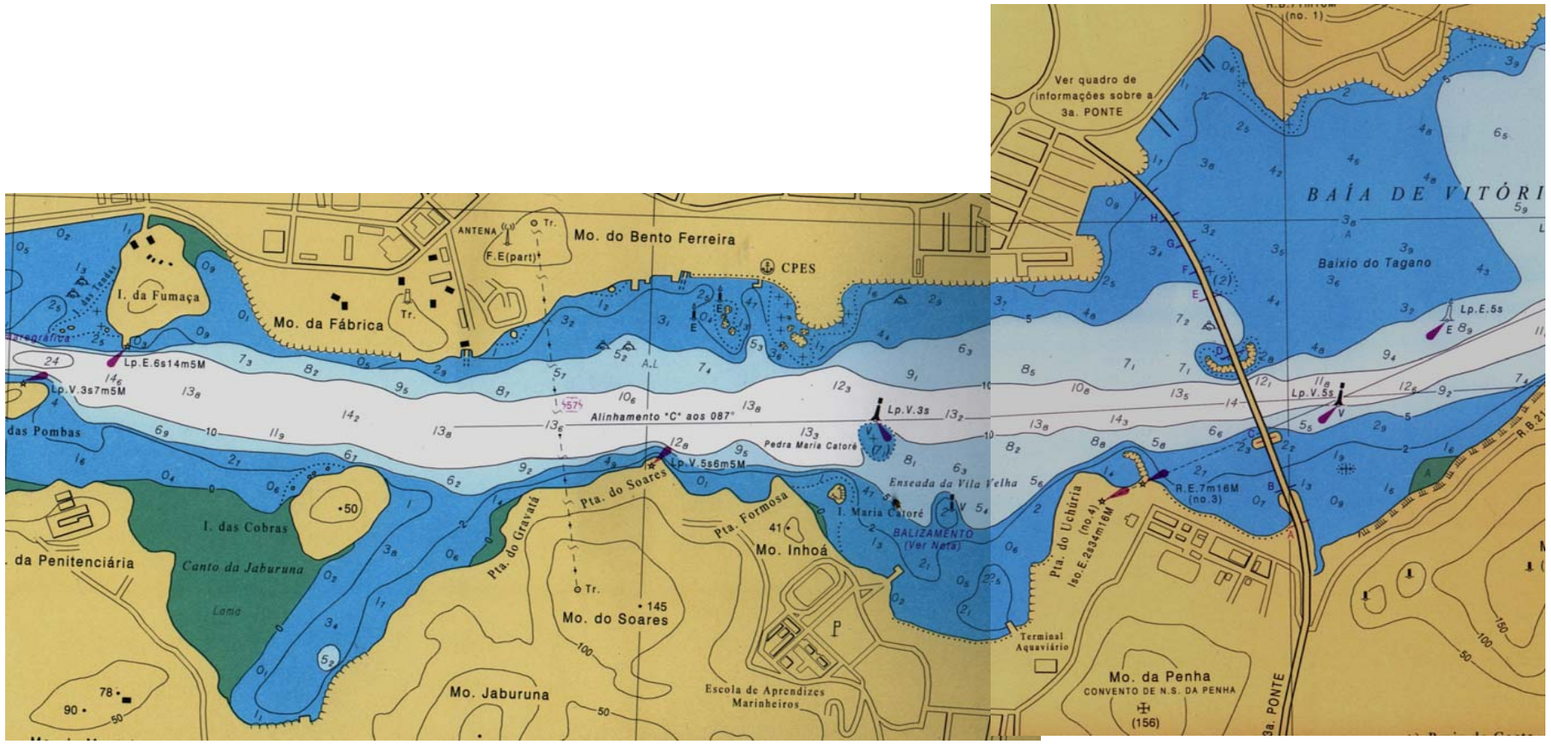


Figura 2 – Recorte da Carta Náutica 1401 (DHN, 8ª edição) abrangendo a região do canal de acesso ao Porto de Vitória, da Ilha das Pombas até 3ª Ponte.