



KYSSYANNE SAMIHRA SANTOS OLIVEIRA

**Comportamento da Maré e das Correntes de Maré em um
Sistema Estuarino utilizando o modelo Regional Ocean
Modeling System (ROMS)**

VITÓRIA
2010

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

KYSSYANNE SAMIHRA SANTOS OLIVEIRA

**Comportamento da Maré e das Correntes de Maré em um
Sistema Estuarino utilizando o modelo Regional Ocean
Modeling System (ROMS)**

Vitória
2010

KYSSYANNE SAMIHRA SANTOS OLIVEIRA

Comportamento da Maré e das Correntes de Maré em um Sistema Estuarino utilizando o modelo Regional Ocean Modeling System (ROMS)

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Oceanógrafo.

Prof. orientador: Renato David Ghisolfi

Vitória
2010

KYSSYANNE SAMIHRA SANTOS OLIVEIRA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA DO DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E ECOLOGIA DO CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM OCEANOGRAFIA.

ENTREGUE DIA 13 DE DEZEMBRO DE 2010

COMISSÃO EXAMINADORA

**PROF. DR. RENATO DAVID GHISOLFI
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
ORIENTADOR**

**PROF. DR. DANIEL RIGO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**PROF.^a VALÉRIA DA SILVA QUARESMA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

Nunca sei o que encontrarei,
Quando for subir,
Quando for descer.
Se houver problemas, irão sumir,
Os mais difíceis, os mais comuns.
Nada desse mundo vai nos vencer, eu sei, eu sei,
Temos uma estrela particular,
Pra nos guiar
Tudo que nós queremos é diversão,
Fazer bons amigos só de curtidão.
Tudo o que queremos é celebrar,
Quando estamos juntos, tudo é perfeito
Em toda aventura que eu entrar,
Quero ter alguém para confiar.
Meu amigo estou aqui,
Nada melhor que ser feliz.
Viajar é onde estiver, e onde estiver, esse é meu lar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, aos Santos e a todos os Anjos por todas as vitórias e conquistas realizadas ao longo destes cinco anos de curso.

Agradeço também aos meus pais, irmãos e familiares por todo apoio emocional e suporte financeiro, me ajudando a vencer todos os desafios.

Agradeço ao meu namorado, amigo e cúmplice Acre por sempre ter estado ao meu lado, e entendido todos os momentos de ausência.

Aos amigos e amigas: Vanessah, Grazi, Nízea, Lucas, Fernando, Mônica, Kelly, Lienne, Camyle, Tatá, e muitos outros, “Graças a Deus !”, que sempre me proporcionaram momentos de diversão e segurança emocional ao longo de todos estes anos de amizade.

A minha família oceano: Ge, Tarci, Silvia, Lara Bertoldi, Comercinho, Bel, Biu, Jaque, Jacson, Geandré, e Micaretinha por terem sido os melhores amigos que eu poderia ter feito nestes cinco anos de curso, e por terem dado toda a força necessária para a finalização deste Trabalho de Conclusão de Curso. Espero sempre ter vocês ao meu lado.

Agradeço também aos meus colegas de curso, que embora não tenhamos estado muito próximos, pelas dificuldades promovidas pelo curso, acreditaram em mim e proporcionaram nestes cinco anos, alguns dos melhores e mais divertidos momentos da minha história.

Agradeço ao meu orientador Renato David Ghisolfi, que apesar da minha inexperiência no assunto, acreditou em mim e me ajudou a concluir este TCC.

Aos meus professores e muitas vezes co-orientadores Alex, Valéria, e Gilberto, muitíssimo obrigada por todos os ensinamentos e conselhos passados, que me ajudaram a construir e finalizar este TCC.

Aos meus colegas de laboratório, e em especial aos meus colegas doutorandos Rafael Piovesan e Ângelo Lemos, que com sua boa vontade e conhecimento me ajudaram a conseguir fazer este TCC.

Enfim obrigada ao Neyo, que com sua voz, me fez sorrir em todos os momentos de dificuldade e felicidade.

**“Mesmo os heróis precisam de heróis algumas vezes.
E mesmo os fortes precisam de alguém que lhes digam “Está tudo bem.”” Neyo**

RESUMO

Uma gestão de boa qualidade em ambientes estuarinos requer o conhecimento da ecologia da fauna e flora estuarina, e do transporte de sedimento, nutrientes e poluentes. Este conhecimento só é adquirido quando se tem o entendimento prévio dos padrões de circulação hidrodinâmica do estuário. Esta circulação hidrodinâmica é controlada principalmente pela descarga fluvial, pelas correntes de maré, pelo cisalhamento do vento e pela geometria do estuário. Este estudo tem como objetivo analisar o comportamento da maré e das correntes de maré dentro de um cenário idealizado do Sistema Estuarino dos Rios Piraquê – Açu e Piraquê – Mirim, através do modelo numérico e computacional *Regional Ocean Modeling System*. No cenário proposto são consideradas a geometria real da linha de costa, uma profundidade constante (seis metros) em todo o domínio, e a maré como única forçante. Os resultados mostraram que a geometria do estuário possui influência no comportamento da maré e das correntes de maré, visto que a orientação da linha de costa determinou o sentido preferencial da componente transversal da velocidade, e que setores com geometrias diferentes resultaram em um comportamento diferencial da elevação e da velocidade ao longo do canal.

Palavras chave: estuário, modelo numérico e computacional ROMS, maré e geometria da linha de costa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relação teórica entre a velocidade da corrente de maré (linha tracejada) e a amplitude de maré (linha sólida) em um estuário.	10
Figura 2: Escoamento da maré em um estuário sem (a) a presença de Manguezal, e em um estuário com (b) a presença do mesmo.....	12
Figura 3: Área de Estudo: Sistema Estuarino dos Rios Piraquê - Açu e Piraquê – Mirim. Fonte: Laboratório de Limnologia e Planejamento Ambiental – DOC/UFES.....	16
Figura 4: Linha de costa e contorno do manguezal digitalizados.....	20
Figura 5: Grade computacional confeccionada no software <i>Seagrid</i>	23
Figura 6: Porção central da grade confeccionada no Software <i>Seagrid</i>	24
Figura 7: Ciclos de sizígia e quadratura ao longo dos 35 dias de simulação.O registro 0 é referente a elevação das 00:00 horas do dia 01 de Janeiro de 2000. Já o registro de número 1200 é referente as 00:00 do dia 25 de Janeiro de 2000.....	27
Figura 8: Defasagem entre a velocidade e a elevação no ponto 2, mostrando que dentro do sistema estuário a onda de maré resultante é uma composição complexa de ondas progressivas e estacionárias.....	29
Figura 9: Atraso da maré no PA em relação ao PM. Os pontos estão localizados a uma distância de aproximadamente 3 km de um ponto localizado na região de confluência.....	30
Figura 10: Localização dos pontos utilizados na análise dos resultados.....	31

Figura 11: Componente leste – oeste da velocidade m/s. Podem-se observar os maiores valores da componente no PA, em relação ao PM durante um período de enchente do dia 21 de Janeiro de 2000..... 32

Figura 12: Componente norte - sul da velocidade em m/s durante um período de enchente. A figura mostra o sentido da componente norte - sul da velocidade sendo definido pela orientação da linha de costa..... 35

Figura 13: Momento da vazante durante o dia 21 de Janeiro de 2000. Através da comparação entre o período de vazante (Figura 13) e o período de enchente (Figura 11), pode-se verificar uma dominância de enchente dentro do sistema estuarino.....37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados da foto aérea. Fonte: Laboratório de Limnologia e Planejamento Ambiental 19

Tabela 2: Constituintes de maré inseridas ao arquivo de forçantes.....21

Tabela 3: Elevação máxima da crista da onda de maré ao longo de cada setor.....33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 ESTUÁRIOS	4
3.1.1 Definição e Padrões de circulação	4
3.1.2 Forçantes da circulação e dos processos de mistura nos estuários	6
3.1.2.1 Maré: Comportamento da maré em sistemas estuarinos	7
3.1.2.2 Maré: Correntes de maré	9
3.1.3 Estuários e o Ecossistema Manguezal	11
3.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA	13
3.2.1 O modelo ROMS	13
3.3 ÁREA DE ESTUDO	15
4. METODOLOGIA	19
4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS	19
4.1.1 Geometria dos canais e batimetria	19
4.1.2 Dados Meteoceanográficos	21
4.2 MODELAGEM NUMÉRICA E COMPUTACIONAL	22
4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6. CONCLUSÃO	38
7. SUGESTÕES	38
8. REFERÊNCIAS	39
APÊNDICE 1	49

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). Dentro deste panorama esta região pode ser considerada um importante local para o desenvolvimento industrial ou portuário, uma fonte significativa de recursos minerais, incluindo petróleo e gás natural, e um abundante reservatório de ecossistemas indispensáveis para o funcionamento do planeta.

A extensa Zona Costeira Brasileira apresenta características ambientais variadas ao longo de seu comprimento, sendo possível identificar uma grande diversidade de paisagens como dunas, ilhas, recifes, costões rochosos, baías, estuários, brejos e falésias (WWF/BRASIL, 2010). Esta região entre o continente e o mar é dominada por processos originados nas bacias de drenagem dos rios afluentes, e por processos oceanográficos e atmosféricos locais e remotos.

Entre as paisagens supracitadas, os estuários 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. Eles são considerados 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, os estuários são habitats 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 (MOBERG e RÖNNBÄCK, 2003).

Uma boa compreensão a respeito da ecologia dos indivíduos, e do transporte de sedimento, nutrientes e poluentes de um estuário só é conseguida quando se tem o entendimento prévio dos padrões de circulação hidrodinâmica do mesmo (JI *et al.*, 2007; LEVASSEUR *et al.*, 2007). Esta circulação hidrodinâmica é controlada principalmente pela descarga fluvial, pelas correntes de maré, pelo cisalhamento do vento e pela geometria do estuário (KJERFVE, 1988).

O conhecimento dos padrões hidrodinâmicos de um estuário pode ser adquirido principalmente pelas observações *in situ*, ou via utilização de modelos numéricos e computacionais. Esta última forma vem sendo utilizada em grande escala para este tipo de estudo, principalmente desde o final do século XX (FORTUNA, 2000). Segundo Rosman (2001), os modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica dos processos que ocorrem em ambientes estuarinos (ROSMAN, 2001). Dessa forma, a aplicação de modelos numéricos para a estimativa de padrões de circulação hidrodinâmica em corpos hídricos costeiros é de importância fundamental devido a sua contribuição para a gestão ambiental costeira (ROSSO e ROSMAN, 1995), incluindo-se aqui a utilização de seus resultados em modelos de dispersão de óleo e no subsídio à tomada de decisões caso ocorra um derramamento de petróleo nestes ambientes. Além disso, a instalação de qualquer estrutura relacionada a Indústria de Petróleo e Gás requer o conhecimento prévio da hidrodinâmica local. Este conhecimento é necessário, por exemplo, para a estimativa de esforços ambientais, ação de ondas e correntes, sobre estruturas como plataformas petrolíferas e portos.

O presente trabalho consiste em um estudo inicial para o entendimento da circulação hidrodinâmica do Sistema Estuarino Piraquê –Açu/ Piraquê – Mirim, utilizando o modelo numérico e computacional *Regional Ocean Modeling System* (ROMS). A motivação deste estudo reside na importância do

comportamento da maré e das correntes de maré na circulação hidrodinâmica do sistema estuarino (PUGH, 2004). O desenvolvimento dessa monografia tem como suporte tanto o Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o PRH-29, o qual é realizado pelo convênio entre a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e esta agência, como o projeto “Processos Geoquímicos, Físicos e Sedimentares de um Estuário com Múltiplos Usos do seu Entorno”, desenvolvido por um grupo de professores do Departamento de Oceanografia e Ecologia (DOC/UFES) no Sistema Estuarino dos Rios Piraquê – Açu e Piraquê – Mirim. Este projeto é financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Contribuir para o entendimento da hidrodinâmica do Sistema Estuarino dos Rios Piraquê – Açu e Piraquê – Mirim utilizando o Regional Ocean Model System (ROMS).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o comportamento da maré dentro do sistema estuarino;
- Analisar o comportamento das correntes de maré dentro do sistema estuarino.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESTUÁRIOS

3.1.1 Definição e Padrões de circulação

Considerando os aspectos físicos, a palavra estuário tem sua origem no século XVI, derivada a partir do latim *aestuarium*, que significa marisma ou canal, de origem por sua vez vem da palavra *aestus*, cujo significado é o movimento da maré (COLLINS, 1979). Desde então, a palavra estuário é utilizada para delimitar um corpo de água costeiro que conecta o oceano a um vale fluvial, e que se caracteriza pelo movimento da água controlado principalmente pelos esforços termohalinos.

Dentre as definições físicas que surgiram para a palavra estuário, a mais usada na literatura (PETHICK, 1984; NICOLITE, 2007) é a seguinte: um estuário é um corpo d'água costeiro semifechado que tem uma conexão livre com o oceano aberto, e dentro do qual as águas oceânicas são mensuravelmente diluídas com a água doce derivada da drenagem continental (PRITCHARD, 1955). Esta definição exclui as lagoas costeiras ou os mares salobros, permitindo uma compreensão quase que completa das características únicas do meio estuarino, já que coloca como limite interno a região de abrangência da influência da água do mar ou zona de mistura, não avaliando totalmente o efeito da maré. Outras definições podem ser encontradas em: Dionne (1963), Fairbridge (1980), Kjerfve (1987), e Dyer (1997). Estes autores embora não sejam os mais usados na literatura, consideram completamente o efeito da maré em suas definições, o qual tem uma influência importante na dinâmica estuarina.

Segundo Kjerfve (1988), a descarga fluvial, as correntes de maré, o cisalhamento do vento e a geometria do estuário são os principais fatores que definem os processos de mistura, circulação e estratificação em um estuário. A partir da integralização destes processos, o zoneamento de um sistema estuarino (KJERFVE, 1987) é:

- Zona de maré do rio (ZR): é a parte fluvial com salinidade praticamente igual a zero, mas ainda sujeita à influência a ação da maré;
- Zona de mistura (ZM): região onde ocorre a mistura da água doce da drenagem continental com a água salgada do mar;
- Zona costeira (ZC): região costeira adjacente, que se estende até a frente da pluma estuarina que delimita a Camada Limite Costeira (CLC).

Além de participarem da zonação de um estuário, a descarga fluvial e as correntes de maré também são determinantes na categorização de tipos de estuários que ocorrem ao longo da zona costeira.

Desde que a água doce da descarga fluvial é menos densa que a água salina do mar, ela tende a se estabelecer no topo de um corpo de água (STIGEBRANDT, 1988). Uma fraca ou ausente turbulência na interface entre as águas doce e salina favorece o desenvolvimento de uma camada de água quase totalmente doce no topo e uma camada de água salina abaixo desta. No outro extremo, uma forte turbulência mistura a água doce com a água salina uniformemente, criando uma homogeneização da água, da superfície ao fundo (STIGEBRANDT, 1988). Um esquema de classificação bem definido e útil, baseado na intensidade da estratificação salina, foi formulado por Pritchard (1955). Nesta classificação foram criadas quatro classes, em ordem da intensidade da estratificação vertical observada. As classes são: estuários homogêneos, parcialmente misturados, altamente estratificados, e estuários de cunha salina.

3.1.2 Forçantes da circulação e dos processos de mistura nos estuários

Como citado anteriormente a descarga fluvial, a geometria e a topografia do estuário, o cisalhamento do estresse do vento, a onda de maré e as correntes de maré constituem as principais forçantes hidrodinâmicas de um estuário (KJERFVE, 1988).

A descarga de água que chega a um estuário é originada da bacia de drenagem a qual o rio pertence, e sua taxa depende das condições climáticas, da morfologia da bacia e das características do solo, da cobertura vegetal, da evapotranspiração na região de captação, e da ocupação antropogênica (MIRANDA *et al.*, 2002).

A geometria e a topografia de um estuário são determinadas pela topografia do litoral e dos rios, e por forçantes tanto de longa variação temporal, como as variações do nível médio do mar e processos de origem tectônica, quanto por forçantes de pequena e média variação temporal, como os processos erosivos e deposicionais decorrentes da atuação das ondas, das correntes costeiras e das próprias correntes de maré que alteram a forma e profundidade do estuário (MIRANDA *et al.*, 2002).

Embora a descarga fluvial, geometria e a topografia sejam fatores importantes na determinação da circulação e dos processos de mistura de um estuário, os ventos e a maré são as maiores fontes de energia para a realização destes processos em um estuário (STIGEBRANDT, 1988). O vento atua principalmente na interface ar-água, criando além de uma camada bem misturada e turbulenta, correntes superficiais, enquanto que a maré atua fundamentalmente na região interna da coluna de água.

Além de atuar na geração de turbulência e de correntes superficiais na interface ar-água, o estresse do vento também possui um importante papel na geração de marés meteorológicas durante a passagem de frentes frias, que podem causar uma elevação no nível da água na região costeira as quais

podem propagar-se estuário adentro, influenciando na dinâmica estuarina (PUGH, 2004).

3.1.2.1 Maré: Comportamento da maré em sistemas estuarinos

Ao se aproximar da zona costeira a maré sofre alterações em suas características devido as bruscas mudanças na profundidade do fundo marinho e as interações com a linha de costa (PARKER, 1991).

As contínuas alterações na estrutura da onda de maré conforme ela se propaga em direção ao estuário e para dentro do mesmo, faz com que a maré tenha influência dominante na dinâmica estuarina (PARKER, 1991). Essas alterações são geradas pela ocorrência de processos de águas rasas não - lineares ocasionados pela interação com a geometria do estuário e pela fricção do fundo e dos contornos terrestres. Estes processos resultam em modificações na amplitude da onda de maré e na transferência de energia a partir das constituintes harmônicas fundamentais que formam a maré superficial astronômica para frequências harmônicas mais altas e mais baixas, resultando na produção de harmônicos mais altos (PARKER, 1991; GODIN, 1991; FRIEDRICHS e MADSEN, 1992). Esta produção de harmônicos mais altos é chamada de “assimetria da maré barotrópica”, pois ela distorce a superfície livre e causa correntes dominantes de maré enchente ou vazante, dependendo das fases relativas entre as constituintes fundamentais da maré e as sobremarés (AUBREY, 1984). Dessa forma, quando M2 é a constituinte semidiurna dominante no ambiente, M4 é a principal sobremaré quarto - diurna formada dentro do estuário. Conseqüentemente pode-se usar o parâmetro adimensional $M4/M2$ (amplitude ou velocidade) para indicar a magnitude da assimetria de maré gerada dentro do estuário. Segundo Aubrey (1984), este parâmetro reflete os efeitos combinados de transferência de energia espectral, a partir da M2 para a M4 e de dissipação friccional quando a maré propaga-se pelo estuário. Além disso, a fase relativa de M2 e M4 determina o sentido da assimetria, ou seja, se a dominância é de enchente ou de vazante (AUBREY,

1984; SPEER e AUBREY, 1985; FRIEDRICHS, 1993). A fase relativa é definida como o dobro da fase de M2 menos a fase de M4 ($2M2 - M4$). Fases relativas da superfície do mar entre 0° e 180° indicam uma descida da maré mais longa que a subida, e, portanto uma tendência a dominância de enchente das correntes de maré estuarinas. Condições de subida da maré mais longa e, portanto dominância de vazante é indicada por uma fase relativa entre 180° e 360° .

Além disso, dois parâmetros adimensionais podem ser utilizados para representar as principais características responsáveis pelos diferentes tipos de assimetria (BOON e BYRNE, 1981; SPEER e AUBREY, 1985; DRONKERS, 1986; FRIEDRICHS e AUBREY, 1988). O primeiro parâmetro, a/h , é a razão da amplitude da constituinte de maré M2 *offshore* em relação a profundidade média do canal estuarino. Este parâmetro mede a superficialidade relativa do canal estuarino. Em um estuário onde a razão a/h (amplitude da maré/profundidade da água) é grande, o efeito da fricção é menor e a maré propaga-se como uma onda de água rasa, com celeridade $c = (g[h+a])^{1/2}$. Como h varia ao longo do ciclo da maré, a profundidade da água é significativamente maior na crista da maré que na cava, e a crista da onda tende a mover-se mais rapidamente que a cava ao longo de um estuário raso. A crista da maré, com maior celeridade, aproxima-se da cava, resultando em uma enchente mais curta, uma vazante mais longa, e a ocorrência de correntes maiores durante a enchente (devido à conservação de massa).

O segundo parâmetro corresponde ao armazenamento entre marés (medido por $V_s/V_c = \text{volume do armazenamento entre marés/volume do canal no nível médio do mar}$), que causa vazantes relativamente mais curtas. Este parâmetro reflete a ineficiente troca de água em estuários, em torno da preamar (BOON e BYRNE, 1981). Estuários com grande armazenamento de água entre marés geralmente apresentam dominância de vazante (BOON e BYRNE, 1981; SPEER e AUBREY, 1985; DRONKERS, 1986; FRIEDRICHS e AUBREY, 1988), a qual tem sido atribuída a diferenças no escoamento em torno da preamar em relação ao escoamento em torno da baixa-mar. Em estuários onde

V_s/V_c é grande, ou seja, apresenta grande planícies de maré, a propagação em torno da preamar é retardada devido a limitada profundidade da água. Consequentemente, o aumento no nível da água na planície de maré é atrasado em relação ao do canal. Isto significa que a enchente na planície de maré continua mesmo depois que o nível da preamar tenha sido alcançado dentro do canal, e mesmo depois que a vazante tenha começado no canal (FRIEDRICHS e AUBREY, 1988). Esta situação gera um gradiente entre a planície de maré e o canal estuarino que permite que as correntes de vazante sejam mais rápidas que as de enchente, quando se considera todo o estuário, e, portanto uma dominância de vazante.

Além da contribuição na produção de harmônicos mais altos, a morfologia do estuário e a fricção também resultam em variações importantes na amplitude da maré e na velocidade das correntes de maré (DYER, 1997). A magnitude relativa destes dois elementos resulta na formação de três condições diferentes quanto às características da amplitude da maré e da velocidade das correntes de maré ao longo do estuário (NICHOLS e BIGGS, 1985):

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

3.2.1.2 Maré: Correntes de maré

As correntes de maré são determinadas pelo gradiente horizontal do nível de água e não pelo valor absoluto deste nível em determinado local. Portanto, em

um estuário 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.

Diferentemente das correntes de maré em águas oceânicas, em estuários e canais a velocidade das correntes 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 baixamar e na preamar, e 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 de maré progressiva com uma onda de maré estacionária, e deste modo as velocidades máximas de corrente de maré são encontradas aproximadamente no meio da vazante e da enchente (Figura 1), e a mudança da direção da corrente ocorre na baixamar e na preamar (PETHICK, 1984). Segundo este mesmo autor a magnitude das correntes de maré dependem parcialmente das características da onda de maré (por exemplo, assimetria e amplitude da onda de maré), e parcialmente da morfologia do estuário.

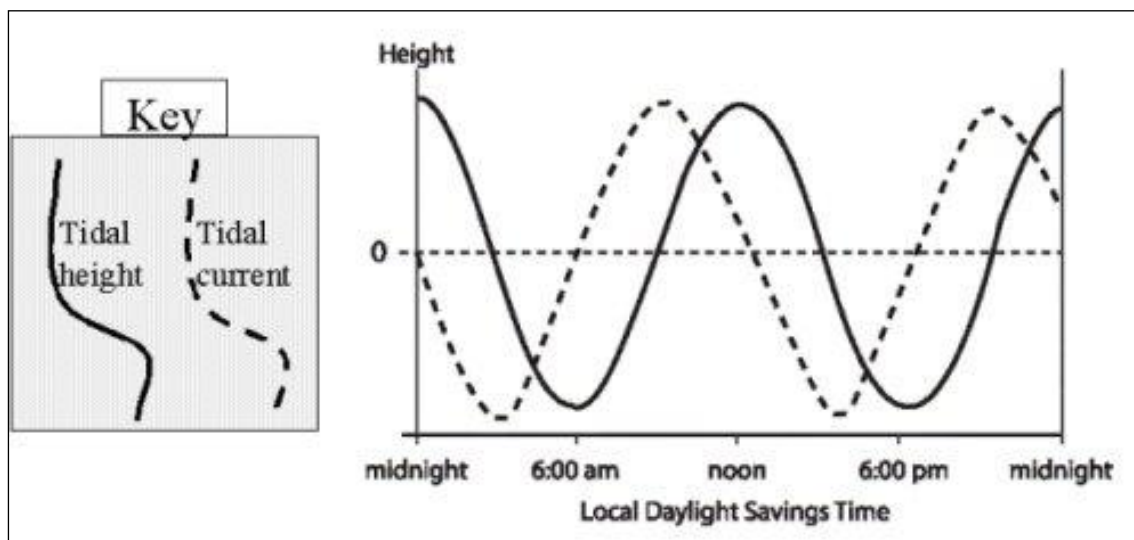


Figura 1: Relação teórica entre a velocidade da corrente de maré (linha tracejada) e a amplitude de maré (linha sólida) em um estuário. Fonte: Tide Principles (2010).

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. Portanto, é possível encontrar diversos valores de corrente, inclusive com sentidos inversos, para um mesmo valor (instantâneo) do nível d'água num estuário (MELO, 1997).

3.1.3 Estuários e o Ecossistema Manguezal

Acoplado aos processos hidrodinâmicos têm-se os componentes químicos e ecológicos do sistema estuarino. Estuários são habitats extremamente produtivos sob o ponto de vista ecológico (FRENCH, 1997), visto que recebem uma grande quantidade de nutrientes originados de diferentes fontes (marinha, terrestre, e da própria vegetação costeira que margeia o estuário). Estes nutrientes tendem a ser reciclados pela ação das marés ao invés de serem perdidos para os sedimentos como normalmente ocorre em água estratificada (ESTUÁRIOS, 2010). Devido principalmente a grande flutuação de salinidade (via movimento da maré), poucas plantas são capazes de viver nos ambientes estuarinos, como as gramíneas e os mangues. Estes organismos além de suportar a variação de salinidade, também tem que ser capazes de conviver geralmente com a presença de ondas e fortes correntes de maré, variação da exposição a luz solar e baixos níveis de oxigênio nos solos lamosos (MAZDA *et al.*, 2007).

Segundo Novelly (1995), o manguezal é um ecossistema costeiro de transição entre os ambientes terrestre e aquático, característico de regiões tropicais e sub-tropicais e sujeito a regime de marés. É constituído por espécies vegetais lenhosas típicas além de micro e macroalgas, adaptadas a flutuações de salinidade e a um sedimento predominantemente lodoso, com baixos teores de oxigênio. Ocorre em regiões costeiras principalmente abrigadas e apresenta condições propícias para a alimentação, proteção e reprodução de muitas espécies da fauna, sendo considerado importante gerador de bens e serviços (MOBERG e ROONBACK, 2003).

O Manguezal tem uma relação estreita com a hidrodinâmica do ambiente estuarino (MAZDA *et al.*, 2007), já que a maré tem um comportamento diferenciado devido a presença do manguezal (Figura 2), deformando significativamente nas planícies onde este está inserido, devido a alta densidade de raízes e árvores (MAZDA e KAMIYAMA, 2007). Segundo Rigo (2004), o manguezal 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 tornando as velocidades da vazante mais intensas que as da enchente. O volume de água armazenado no manguezal é determinante na dominância de correntes de vazante observada em canais de manguezais.

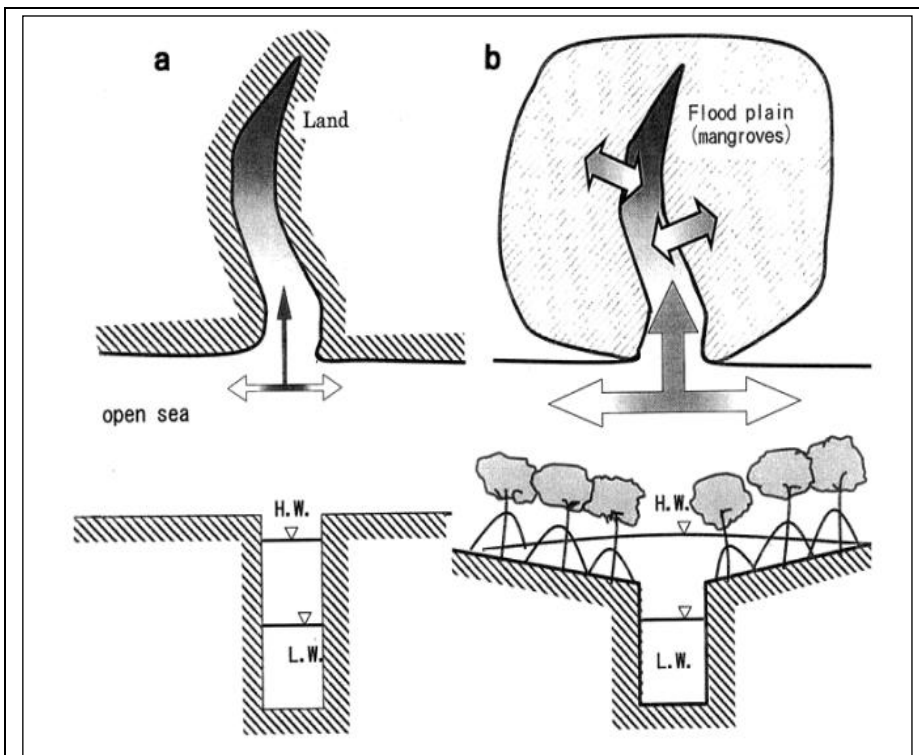


Figura 2: Escoamento da maré em um estuário sem (a) a presença de Manguezal, e em um estuário com (b) a presença do mesmo. Fonte: Mazda *et al.*, (2002).

Correntes forçadas por maré e por ondas são direcionadas e canalizadas pela topografia da planície de inundação e pelo entrelaçamento das raízes e das próprias árvores do manguezal (WOLANSKI *et al.*, 1980; MAZDA *et al.*, 1997) propiciando o movimento do sedimento, o qual modifica a topografia da planície

de inundação, algumas vezes construindo meandros nos riachos e erodindo a linha de costa (MAZDA *et al.*, 1995).

Wolanski *et al.* (1990) estudaram, por meio de modelagem e medições, o escoamento em um grande canal (Hinchinbrook Channel, com 109 km² de espelho d'água) que drena uma extensa área de manguezal (164 km²) na Austrália. As medições de velocidades indicaram correntes de vazante maiores que as de enchente, e esse padrão foi atribuído parcialmente à presença dos manguezais. Chacaltana *et al.* (2003) verificou que a região alagada do manguezal no entorno da Ilha de Vitória -ES, é responsável por um aumento de até 45% do valor das velocidades obtidas quando não se considerou o alagamento.

Assim o manguezal é um ecossistema que tem grande influência na dinâmica física de sistemas estuarinos, e, portanto não pode ser desconsiderado nos estudos hidrodinâmicos realizados nestes sistemas.

3.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

Numerosos modelos hidrodinâmicos bidimensionais e tridimensionais foram criados e estão capacitados para aplicação de estudos de hidrodinâmica em mares costeiros e estuários (WEISBERG e ZHENG, 2007). Estes modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica dos complexos processos que ocorrem nestes ambientes (ROSMAN, 2001). Entre os modelos atualmente usados para o estudo da circulação hidrodinâmica estuarina inclui-se: o Princeton Ocean Model - POM; o Semi-implicit Estuarine, Coastal Ocean Model - ECOM-si; o Eulerian-Lagrangian Circulation - ELCIRC; o Finite Volume Community Ocean Model - FVCOM; o Semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite Element - SELFE; o Advanced Circulation Model for Oceanic, Coastal, and Estuarine Waters - ADCIRC; e o Regional Ocean Model System - ROMS (ZHANG e BAPTISTA, 2008);

3.2.1 O modelo ROMS

O modelo Regional Ocean Modeling System (ROMS; HAIDVOGEL *et al.* 2000), é um modelo tridimensional de equações primitivas, de superfície livre, amplamente utilizado para estudos estuarinos (por exemplo, MACCREADY *et al.*, 2002; LERCZAK e GEYER, 2004; LI *et al.*, 2005; Warner *et al.*, 2005; HAIDVOGEL *et al.*, 2008), que usa a média de Reynolds, e o método de diferenças finitas para resolver as equações de Navier – Stokes. Além disso, o modelo assume as aproximações de hidrostática e de Boussinesq (HAIDVOGEL *et al.* 2000).

O ROMS pertence a uma classe de modelos numéricos que usam um sistema de coordenadas curvilíneas ortogonais e uma grade estruturada do tipo “C” de Arakawa na horizontal, e usa na vertical um sistema de coordenada do tipo *terrain - following* ou “seguidor de terreno” estendida, que permite uma resolução variável principalmente nas regiões da camada de Ekman de fundo e superfície (WARNER *et al.*, 2005). Além disso, contornos costeiros podem também ser especificados como uma grade discretizada finita via máscara terra/mar (HAIDVOGEL *et al.*, 2000).

As condições de contorno para o ROMS são apropriadas para topografia e linha de costa irregular, para a superfície livre do mar e contornos oceânicos abertos (HAIDVOGEL *et al.*, 2000). Inclui ainda as forçantes como o estresse do vento, fluxos de calor, aporte fluvial. O modelo tem várias parametrizações de escala de subgrade, de forma que a mistura horizontal de momento pode ser ao longo de níveis verticais, superfícies geopotenciais, ou superfícies isopicnais. Já a parametrização da mistura vertical pode ocorrer por esquemas de fechamento locais ou não-locais (HAIDVOGEL *et al.*, 2000). Os esquemas de fechamento locais são baseados nas equações de energia cinética turbulenta de nível 2.5 de Mellor e Yamada (1982), e a parametrização de Escala de Comprimento Genérica (*Generic Length Scale – GLS*) (UMLAUF e BURCHARD, 2003). O esquema de fechamento não - local é baseado na formulação de camada limite perfil – K de Large *et al.*, (1994). O método GLS é um modelo de 2 equações, uma para o transporte da energia cinética turbulenta e a segunda para o transporte do parâmetro relacionada a escala de

comprimento. O uso deste método permite o uso de uma ampla escala de esquemas de fechamento de mistura vertical, incluindo os esquemas k-kl (Mellor-Yamada level 2.5), k-e, e k-w. Além disso, o ROMS possui vários modelos acoplados, entre os quais modelos para aplicações biogeoquímicas e ressuspensão, e transporte de sedimento (SHCHEPETKIN e MCWILLIAMS, 2005).

Para economia computacional, as equações primitivas hidrostáticas para momentum são resolvidas usando um passo de tempo dividido, que requer tratamento e acoplamento especial entre os modos barotrópico (rápido) e baroclínico (lento) (HAIDVOGEL *et al.*, 2000). Um número finito de passos de tempo barotrópicos, dentro de cada passo de tempo baroclínico, é realizado para desenvolver as equações de *momentum* integradas verticalmente.

Outra característica do ROMS é a inclusão do processo de *flooding/drying*, muito útil para a aplicação do modelo em regiões que ora estão úmidas (*flooding*), ora estão secas (*drying*), assim como ocorre em estuários com planície de inundação rasa (HAIDVOGEL *et al.*, 2008).

3.3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste projeto compreende o Sistema Estuarino dos Rios Piraquê – Açú e Piraquê – Mirim localizado no município de Aracruz, Espírito Santo. O estuário se apresenta em forma de **Y** (Figura 3), com a bifurcação logo após a barra de entrada. O eixo longitudinal da confluência está alinhado na direção Oeste – Leste, enquanto que os braços norte (Piraquê – Açú) e sul (Piraquê – Mirim) estão alinhados NW e SW, respectivamente.

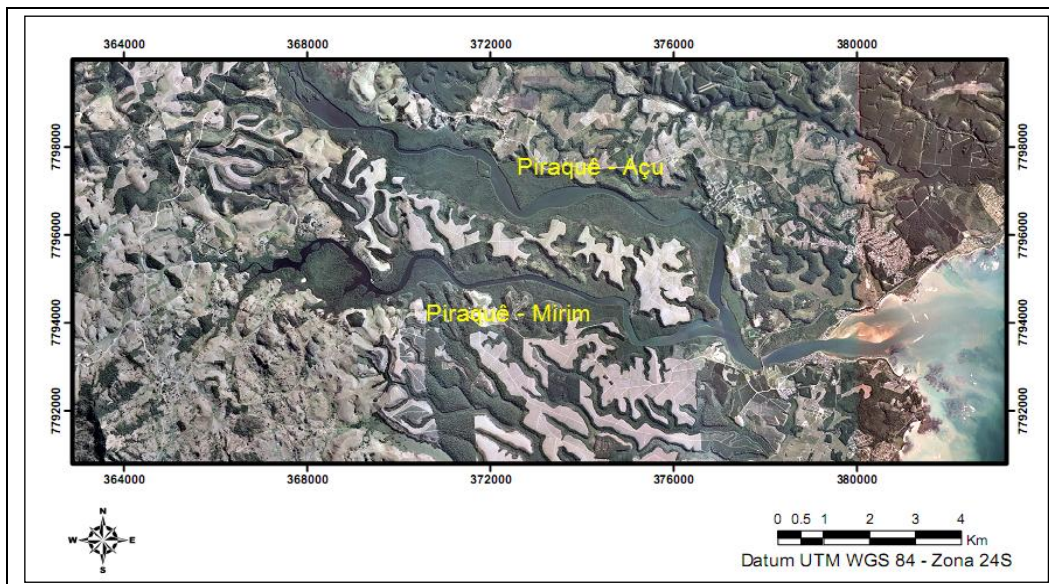


Figura 3: Área de Estudo: Sistema Estuarino dos Rios Piraquê - Açu e Piraquê – Mirim. Fonte: Laboratório de Limnologia e Planejamento Ambiental – DOC/UFES.

O sistema Estuarino compreende a porção costeira da Sub - Bacia Hidrográfica do Piraquê – Açu, a qual tem 65 km de extensão, e como rios principais os Rios Piraquê - Açu e Piraquê – Mirim. A área da sub – bacia é de 448,11 km², sendo que 378,69 km² correspondem a região ocupada pela área de drenagem do Piraquê - Açu e 69,42 km² pela bacia do Piraquê – Mirim (SEAMA, 1998). Esta porção costeira é caracterizada pelo clima tropical litorâneo, com inverno seco, pouco acentuado. As chuvas são mais frequentes entre os meses de outubro e janeiro e observam-se estiagens de verão entre janeiro e fevereiro. O índice pluviométrico anual está entre cerca de 1230 e 1380 mm (IEMA, 2010). Quanto ao regime de marés, este pode ser caracterizado como sendo semidiurno com marés do tipo mista, e amplitude máxima de 1.8m (micromaré) (BARROSO, 2004).

Ao longo da linha de entre marés do Sistema Estuarino dos Rios Piraquê - Açu e Piraquê – Mirim tem-se um sistema de manguezal bem desenvolvido (BARROSO, 2004). O manguezal do Piraquê - Mirim avança para dentro do continente 9 km e o manguezal do Piraquê - Açu avança 13 km, tratando-se da maior penetração de maré do estado (PAZOLIN *et al.*, 2007). Este manguezal é composto basicamente de *Rhizophora mangle* (mangue vermelho),

Laguncularia racemosa (mangue branco) e *Avicennia schaueriana* (mangue preto) (JESUS *et al.*, 2009).

Alguns estudos já foram realizados nos estuários dos rios Piraquê - Açú e Piraquê - Mirim, principalmente no que tange a parâmetros biológicos e físicoquímicos (BARROSO, 2004; CUNHA, 2004; MACIEIRA, 2005; GAIGHER, 2005; OLIVEIRA, 2005 e JESUS *et al.*, 2008;2009). Além destes, um estudo de grande projeção foi o projeto RECOS/Milênio (Uso e Apropriação de Recursos Costeiros – DERN/UFES, 2001), onde foram avaliados quatro grupos temáticos: i) Modelo Gerencial da Pesca; ii) Maricultura Sustentável; iii) Monitoramento, Modelagem, Erosão e Ocupação Costeira; iv) Qualidade Ambiental e Biodiversidade.

Entre os estudos citados anteriormente, destaca-se o de Barroso (2004), que em 19 dias de amostragem (entre o período de 25 de Novembro de 1999 a 26 de Março de 2001), utilizando medidas *in situ* caracterizou o SEPAPM quanto a diversos aspectos, entre eles os aspectos termohalinos. Neste estudo as coletas tiveram caráter mensal, sendo que nos meses de Janeiro e Fevereiro, duas coletas foram realizadas em cada um desses meses. As coletas foram realizadas ou na vazante, ou na enchente, ou ainda em ambas, e abrangeram tanto períodos de maré de sizígia, quanto de quadratura.

Segundo Barroso (2004), em escala horizontal, a porção superior do Piraquê – Açú é dita mesohalina enquanto que a porção inferior e o Piraquê – Mirim como um todo tendem a ser um ambiente polihalino. Da confluência até a foz, predominaram condições euhalinas. A condição mesohalina encontrada na porção superior do Rio Piraquê – Açú resulta da maior influência da descarga de água doce, especialmente nos meses de Novembro e Dezembro. Ao contrário do Piraquê – Açú, o Piraquê – Mirim é pouco influenciado pela descarga de água doce, sendo mais influenciado por águas marinhas (BARROSO, 2004).

Em escala vertical, com base na diferença entre a salinidade de fundo e de superfície, Barroso (2004) classificou o Piraquê – Açú como um estuário do tipo cunha salina (grande influência da descarga fluvial), o Piraquê – Mirim como

um estuário do tipo verticalmente homogêneo (elevada ação da força de mistura da maré), e a porção da confluência até a foz como um estuário do tipo parcialmente estratificado, com a presença de uma fraca haloclina.

Quanto a temperatura, ambos Piraquê – Açu e Piraquê – Mirim caracterizaram – se por águas mais quentes, enquanto que da confluência até a foz a água tende a ser ligeiramente mais fria.

4. METODOLOGIA

A fim de cumprir os objetivos propostos, este estudo foi realizado em 2 etapas: Levantamento de dados e Modelagem Numérica.

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

4.1.1 Geometria dos canais e batimetria

Os dados de geometria dos canais e do limite interno do manguezal foram obtidos a partir da digitalização de uma foto aérea georreferenciada (Tabela 1), fornecida pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, através do Laboratório de Limnologia e Planejamento Ambiental, pertencente ao Departamento de Oceanografia e Ecologia da UFES. Os canais foram digitalizados tendo como base a linha da copa das árvores que delineavam o interior dos canais (Figura 4). Além disso, foi digitalizado o limite interior do Manguezal que circunda os canais, embora o manguezal não tenha sido considerado na modelagem do comportamento da onda de maré e das correntes de maré no sistema estuarino estudado.

Tabela 1: Dados da foto aérea. Fonte: Laboratório de Limnologia e Planejamento Ambiental.

Escala da foto aérea	1: 640.437
Sistema de Coordenadas	Projeção UTM
Datum	WGS 1984
Escala de digitalização	1: 1.800

Foi adotado um valor de batimetria constante, a fim de se isolar os efeitos da geometria do canal no comportamento da onda de maré e das correntes de maré dentro do sistema estudado. O valor adotado foi 6 (seis) metros de profundidade, a fim de reproduzir o caráter raso, característico da maior parte do Sistema Estuarino dos Rios Piraquê – Açú e Piraquê – Mirim, e conhecido devido ao levantamento batimétrico já realizado no sistema estuarino.

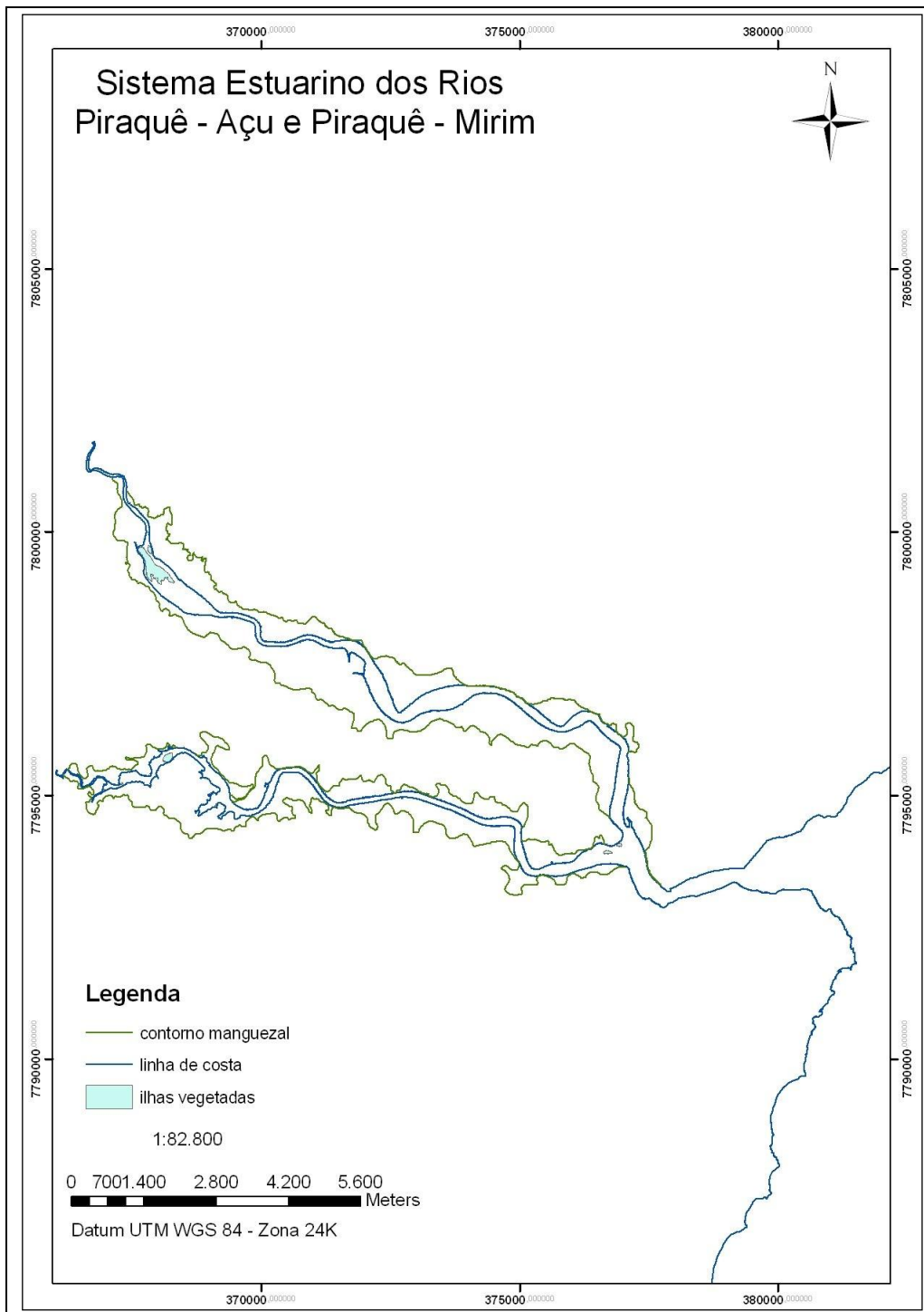


Figura 4: Linha de costa e contorno do manguezal digitalizados.

4.1.2 Dados Meteoceanográficos

- Dados de maré

As constituintes de maré utilizadas (Tabela 2) na modelagem foram obtidas a partir do modelo global de marés oceânicas TPXO.6 (Egbert and Erofeeva, 2002): <http://www.oce.orst.edu/po/research/tide/global.html>. Os dados foram inseridos ao arquivo de forçantes, via a utilização da ferramenta ROMSTOOLS (ROMSTOOLS, 1010). Esta ferramenta é uma coleção de conjuntos de dados globais e uma série de programas Matlab reunidos em uma “*toolbox*” integrada. Os dados de maré foram obtidos para um período de 3 meses, a partir do dia 01 de Janeiro de 2000.

Tabela 2: Constituintes de maré inseridas ao arquivo de forçantes.

<i>CONSTITUINTE</i>	<i>NOME</i>
M2	Principal Lunar semi-diurna
S2	Principal Solar semi-diurna
K2	Lunar-solar semi-diurna
N2	Lunar elíptica maior
K1	Lunar-solar diurna
Q1	Lunar elíptica maior
P1	Principal Solar diurna
O1	Principal lunar diurna
Mf	Lunar quinzenal
Mm	Lunar Mensal

- Dados termohalinos e Campo de correntes

Neste estudo é considerado um cenário idealizado, de 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 os objetivos deste estudo, não foram analisados a influência das ondas e de dados meteorológicos como o vento, pluviosidade, fração de nuvens, fluxos de calor na interface ar – água.

4.2 MODELAGEM NUMÉRICA E COMPUTACIONAL

A Modelagem Numérica do comportamento da maré e das correntes de maré no Sistema Estuarino em estudo foi feita utilizando-se o modelo numérico e computacional *Regional Ocean Modeling System* (ROMS).

Confecção da grade

Na primeira etapa foi feita a construção da grade horizontal, utilizando-se o programa `Seagrid` em `Matlab`. *Seagrid*: <http://woodshole.er.usgs.gov/operations/modeling/seagrid/seagrid.html> (Figura 5). A grade construída tem 480 x 150 células na horizontal, e cinco níveis sigmas na vertical. A determinação da quantidade de níveis sigmas foi definida dentro da configuração do modelo ROMS. A resolução das células varia desde 10 metros dentro do estuário, e aproximadamente 90 metros na região costeira adjacente.

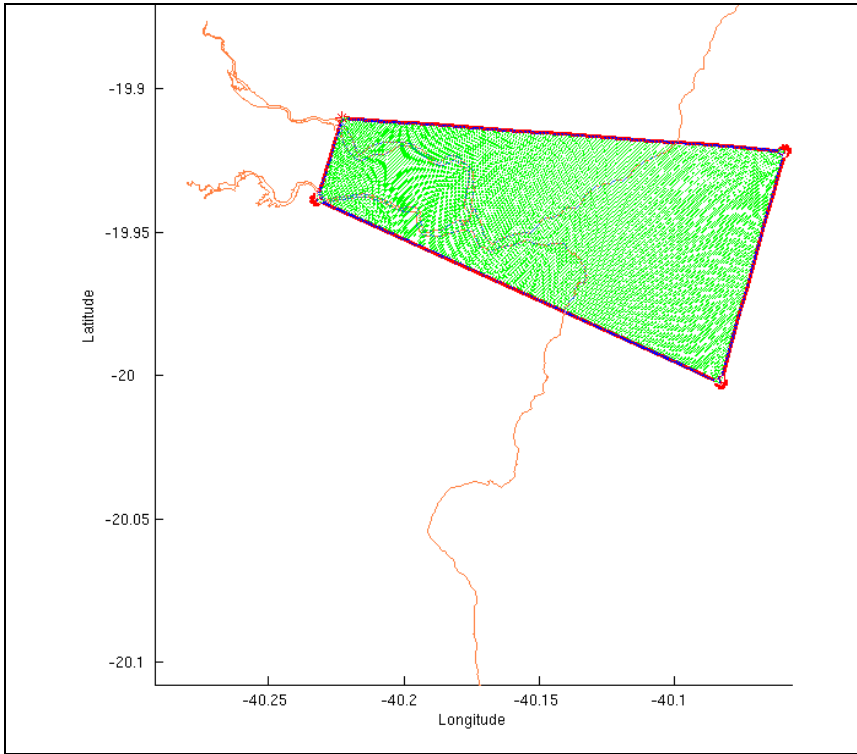


Figura 5: Grade computacional confeccionada no software *Seagrid*.

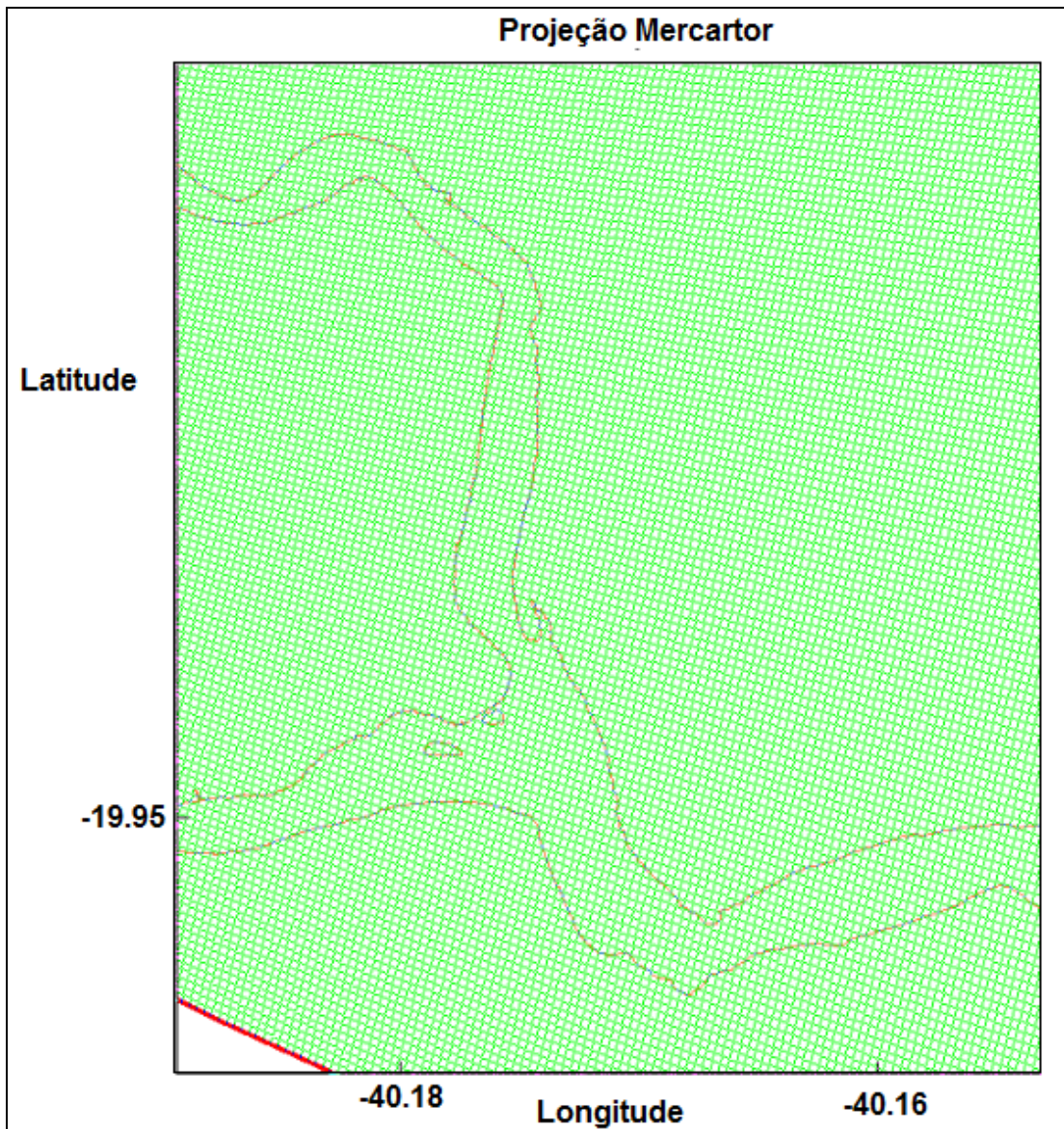


Figura 6: Porção central da grade confeccionada no Software *Seagrid*.

Configuração do modelo

O modelo foi configurado para simular 35 dias a partir das 00:00 horas do dia 01 de Janeiro de 2000. O dia de simulação zero no modelo equivale ao dia 01 de Janeiro de 2000.

A fim de se obedecer a Condição de *Courant-Friedrichs-Lewy*, a qual relaciona o intervalo de discretização no tempo em relação ao intervalo de discretização no espaço, determinou-se um passo de tempo barotrópico de um segundo, e um passo de tempo baroclínico de trinta segundos.

Os dados de saída analisados neste estudo foram armazenados pelo modelo a cada trinta minutos. Na configuração do modelo o registro de número 1 armazenou os dados do horário 00:00 horas do dia 01/01/2000, já o registro de número 2 armazenou os dados do horário 00:30 horas do dia 01/01/2000. O último registro armazenou os dados do horário de 00:00 horas do 35º dia de simulação (5 de fevereiro de 2000).

As condições de contorno aberto utilizadas foram: as condições de Flather (velocidades barotrópicas), Chapman (superfície livre), M3 (velocidades baroclínicas) e T (traços), para os contornos abertos Leste, Norte e Sul. No contorno oeste, foram definidas as condições de Chapman (elevação), M3 (velocidades baroclínicas) e T (traços) (HEDSTRÖM, 2009).

Nos contornos fechados laterais foi utilizada a condição de contorno *free-slip*, onde somente a componente da velocidade, perpendicular aos contornos, é zero (não há penetração no contorno fechado).

As outras opções físicas e numéricas definidas para a simulação são encontradas no Apêndice 1. Os valores que devem ser determinados para estas opções foram os valores *default* propostos pelo modelo. Salienta-se que a temperatura e a salinidade foram mantidas fixas no tempo e no espaço, e os valores utilizados, assim como para as outras opções físicas e numéricas, foram aqueles fornecidos pelo próprio modelo.

O modelo foi implantado no modo tridimensional, e foi rodado em modo OpenMP.

Simulação teste

Foi feita uma simulação teste, na qual não foi imposta nenhuma forçante ao domínio. Esta etapa teve a função de verificar a existência de instabilidades numéricas e hidrodinâmicas dentro do domínio, e, por conseguinte eliminá-las. Nesta etapa o modelo foi configurado para quinze dias de simulação.

Simulação da maré barotrópica no Sistema Estuário dos Rios Piraquê – Açú e Piraquê – Mirim.

A forçante maré foi imposta no contorno aberto oceânico, com o modelo configurado para trinta e cinco dias de simulação. Serão analisados os comportamentos da onda de maré e das correntes de maré em um cenário barotrópico idealizado, onde a geometria da linha de costa é o único elemento real que influencia neste comportamento. A fim de se atingir os objetivos propostos neste estudo, serão analisadas a elevação e as componentes da velocidade barotrópica. Para um melhor entendimento dos resultados, as componentes da velocidade barotrópica que são originalmente referenciadas a grade foram referenciadas para as direções Norte –Sul e Leste – Oeste.

4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

Neste trabalho não foi feita a validação do modelo ROMS para a área de estudo, sendo avaliado somente o comportamento da maré e das correntes de maré, em uma porção do canal estuarino, do Sistema Estuarino dos Rios Piraquê – Açú e Piraquê –Mirim, perante forçante imposta.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O padrão de maré semi-diurno, característico da região costeira adjacente ao Sistema Estuarino estudado (VELOSO e ALVES, 2006) foi reproduzido com sucesso pelo modelo ROMS. Para o período de simulação proposto (01 de Janeiro de 2000 a 05 de Fevereiro de 2000), foram identificados dois ciclos e meio de sizígia, e dois ciclos completos de quadratura. O primeiro ciclo reproduzido pelo modelo foi o de sizígia (Figura 7).

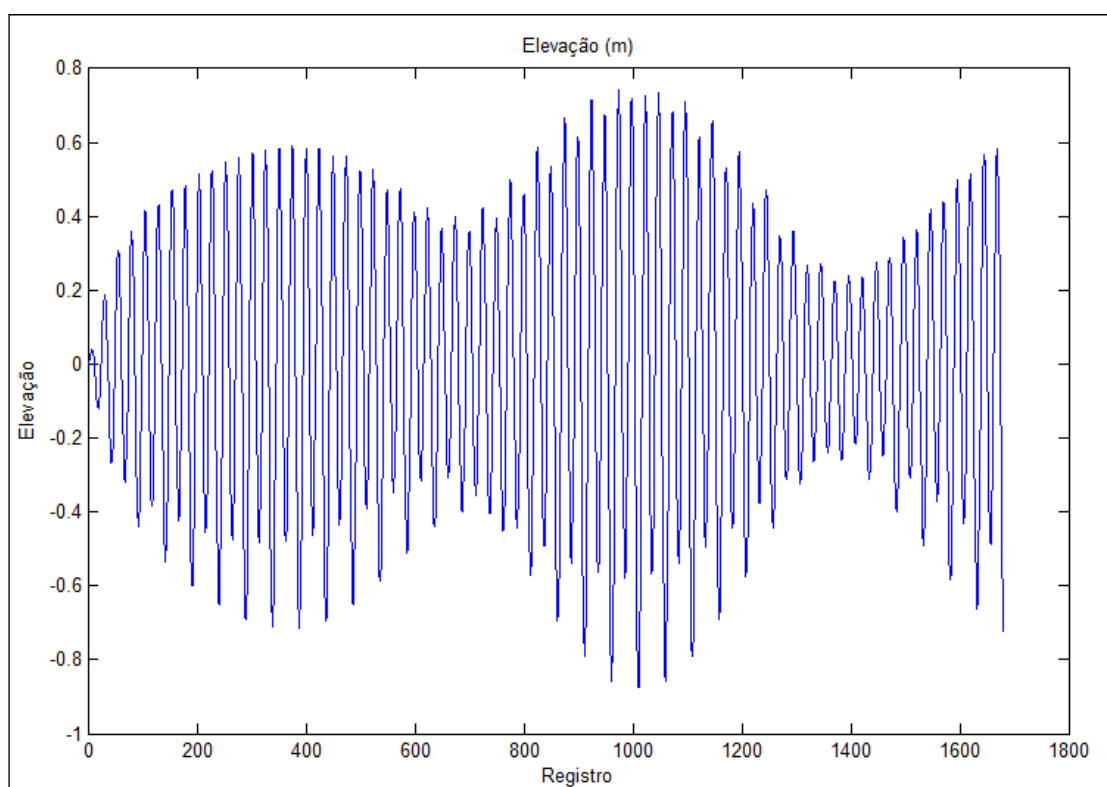


Figura 7: Ciclos de sizígia e quadratura ao longo dos 35 dias de simulação. O registro 0 é referente a elevação das 00:00 horas do dia 01 de Janeiro de 2000. Já o registro de número 1200 é referente as 00:00 do dia 25 de Janeiro de 2000.

Nos ciclos de sizígia, a elevação teve amplitudes máxima e mínima aproximadamente de 1,65 e 1,35 metros, respectivamente, dentro domínio, enquanto que nos ciclos de quadratura, a elevação teve amplitudes máxima e mínima aproximadamente de 0,90 e 0,55 metros, respectivamente. Além disso, a primeira quadratura reproduzida teve amplitudes maiores que a segunda. Segundo Pugh (2004), isto pode ser devido a variação da distância entre a Lua

e a Terra ao longo de um ciclo lunar, e a variação das declinações da lua e do sol, a partir do plano equatorial terrestre.

A análise comparativa entre os comportamentos da velocidade e da elevação (Figura 8) permitiu notar que dentro do sistema estuarino a maré comportou-se como uma mistura de uma maré progressiva com uma maré estacionária, visto que foi observada uma defasagem entre a velocidade e a elevação. A defasagem observada dentro do estuário, ora era semelhante a de marés estacionárias, ora não. Este padrão complexo de mistura entre marés progressivas e estacionárias dentro do estuário é devido a geometria não uniforme do Sistema Estuarino dos Rios Piraquê – Açu (PA) e Piraquê- Mirim (PM) e a fricção dos contornos costeiros. Dessa forma, como a cabeceira do estuário não é uma extremidade fechada, e também há dissipação da energia da onda refletida nos contornos, a onda de maré resultante é uma composição complexa de ondas progressivas e estacionárias (MIRANDA *et al.*, 2002).

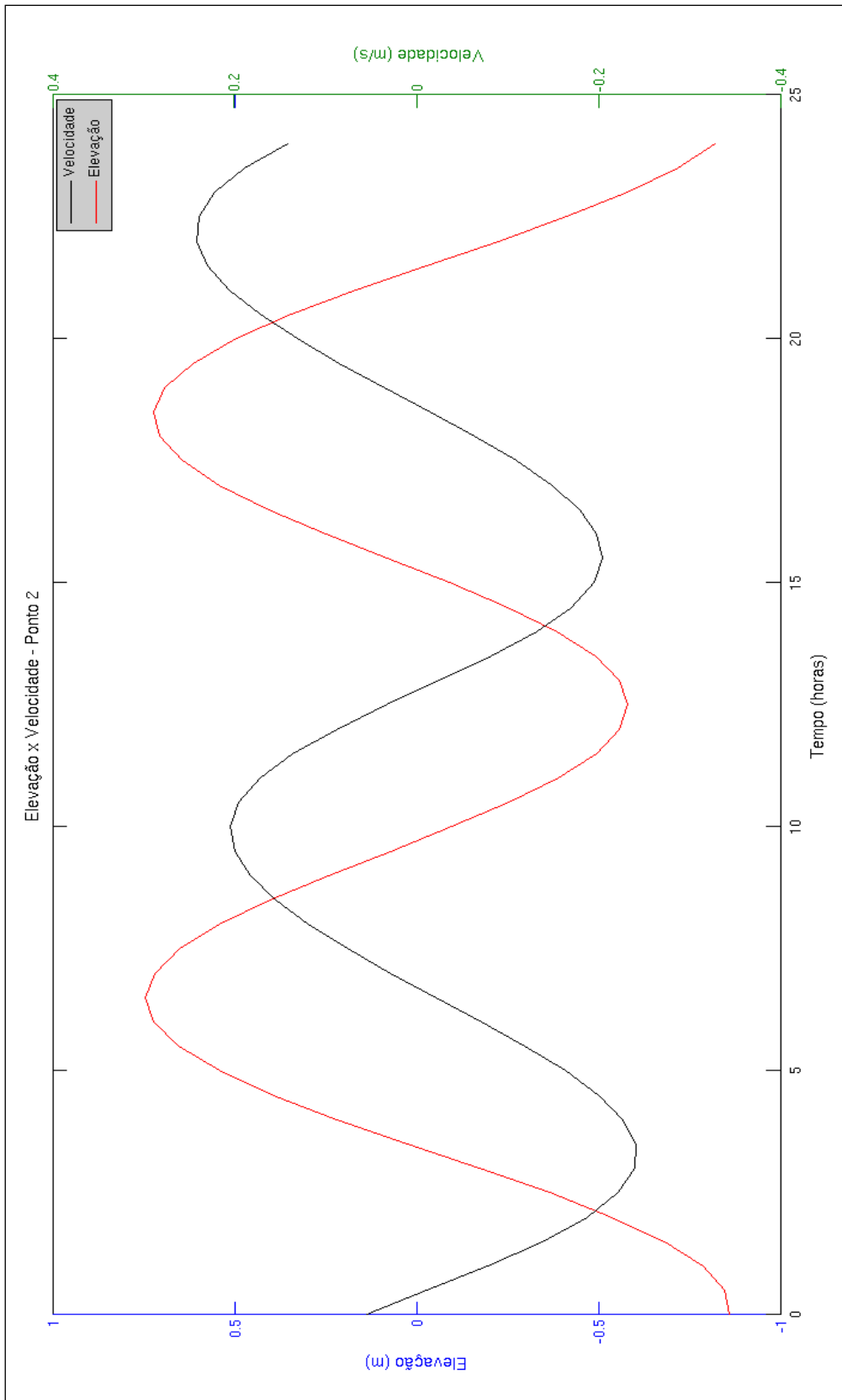


Figura 8: Defasagem entre a velocidade e a elevação no ponto 2, mostrando que dentro do sistema estuário a onda de maré resultante é uma composição complexa de ondas progressivas e estacionárias.

A partir de uma análise espacial do comportamento da onda de maré quando ela entra no sistema estuarino, pôde-se perceber que no PM a entrada da onda de maré é mais rápida que no PA. Este atraso é exemplificado na Figura 9, através da plotagem de dois pontos, um no PA (ponto PA) e um no PM (ponto PM), situados a uma mesma distância (~3 km) de um ponto localizado na região de confluência (Figura 10). Esta entrada preferencial pode ser devido ao fato da largura na entrada do PM ser maior que a largura na entrada do PA, já que no último há um afunilamento do canal na entrada. Este afunilamento pode estar dificultando a passagem da onda de maré, funcionando com um “inlet” entre a região de confluência e o PA, atrasando desta forma a porção da onda de maré que adentra o PA (SEIM *et al.*,2006). Foi observado que no PM os valores da componente leste – oeste da velocidade são menores que no PA em praticamente toda a sua extensão, exceto na primeira curva a partir da entrada do PM, onde os valores da componente leste – oeste da velocidade foram semelhantes as maiores velocidades encontradas no PA (Figura 11).

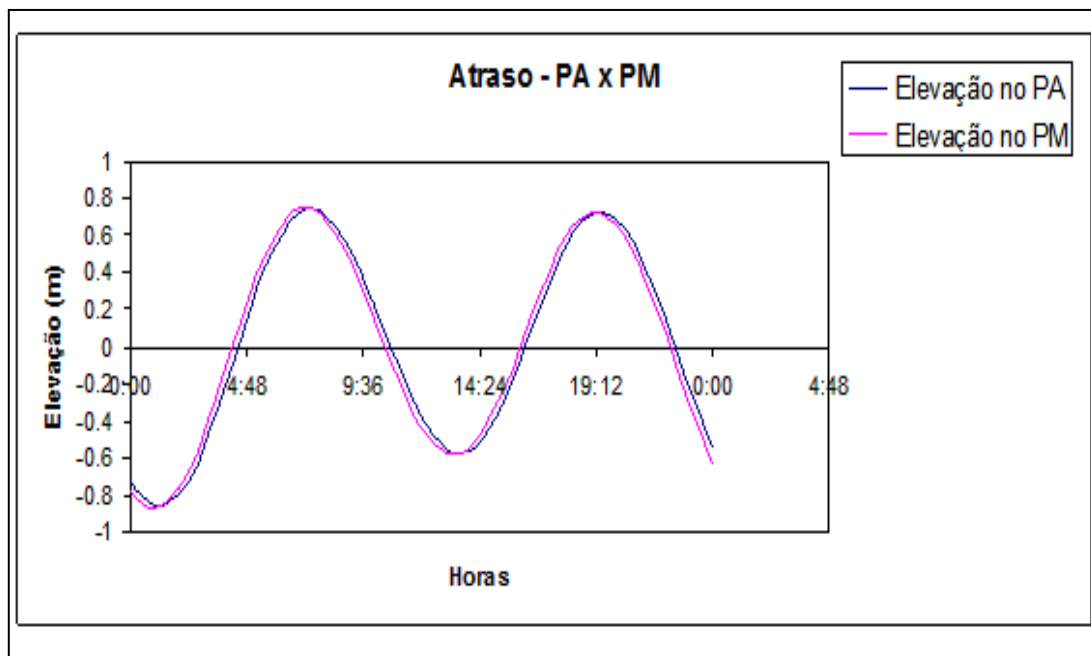


Figura 9: Atraso da maré no PA em relação ao PM. Os pontos estão localizados a uma distância de aproximadamente 3 km de um ponto localizado na região de confluência.

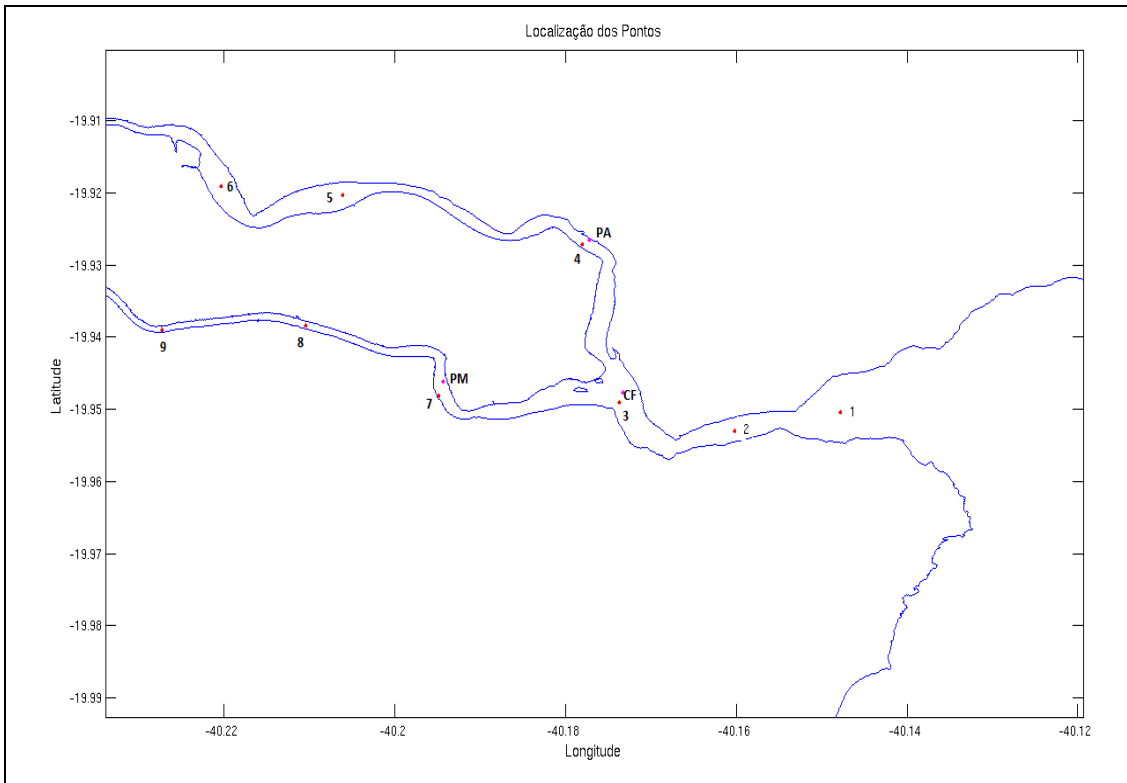


Figura 10: Localização dos pontos utilizados na análise dos resultados.

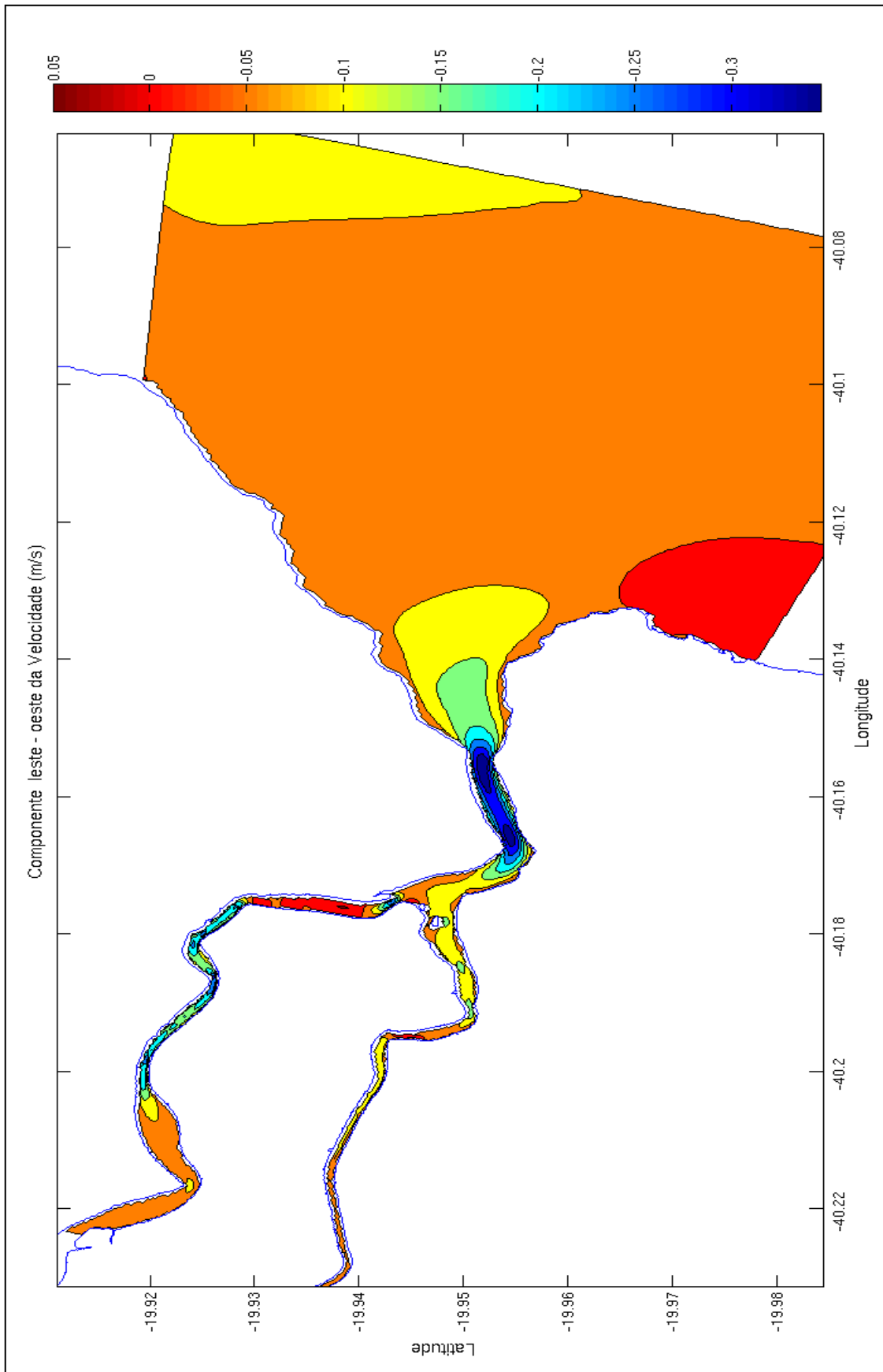


Figura 11: Componente leste – oeste da velocidade m/s. Podem-se observar os maiores valores da componente no PA, em relação ao PM durante um período de enchente do dia 21 de Janeiro de 2000.

A influência dos afunilamentos no comportamento da onda de maré e das correntes de maré pode ser observada ao longo de todo o Sistema Estuarino e durante os trinta e cinco dias de simulação. Os maiores valores de velocidade são encontrados principalmente nos locais de afunilamento do canal no PA e no afunilamento existente na entrada do estuário. Nestes locais, como há uma diminuição da largura do estuário, há um aumento da velocidade.

Além de verificar os maiores valores da componente leste – oeste da velocidade no PA, quando comparados aos valores no PM, uma análise espacial do campo de correntes de maré permitiu constatar a ausência de vórtices dentro do sistema estuarino. Desta forma qualquer feição deste tipo identificada *in situ*, não é resultante exclusivamente da geometria do canal, e sim da interação entre a geometria, a batimetria, e a presença de estruturas artificiais.

Através da análise do comportamento de uma crista da onda de maré se propagando ao longo do estuário pôde-se identificar de três setores (Tabela 3): a região compreendida entre a confluência e a foz (CF), a região compreendida pelo Estuário do Rio Piraquê – Açu (PA), e a região compreendida pelo Estuário do Rio Piraquê – Mirim (PM). A localização dos pontos em cada setor pode ser vista na figura 10.

Tabela 3: Elevação máxima da crista da onda de maré ao longo de cada setor.

Setor PA		Setor PM		Setor CF	
Ponto	Elevação (m)	Ponto	Elevação (m)	Ponto	Elevação (m)
4	0.7429	7	0.7473	1	0.7409
5	0.7439	8	0.7455	2	0.7436
6	0.7447	9	0.7431	3	0.7466

Dentro dos setores CF e PA observa-se uma amplificação da amplitude da onda de maré ao longo de cada setor. Já no setor PM foi observada uma redução da amplitude de maré. Segundo Dyer (1997), a morfologia do estuário e a fricção resultam em variações importantes na amplitude da maré e na velocidade das correntes de maré. Em estuários onde ocorre uma amplificação da amplitude, o efeito da convergência é maior que o da fricção (setores PA e

CF). Já em estuários onde ocorre uma redução da amplitude, o efeito da convergência é menor que o da fricção (setor PM) (NICHOLS e BIGGS, 1985). Desta forma, os baixos valores de velocidade encontrados no PM, quando comparados ao PA, podem ser devidos ao maior efeito da fricção no PM, e menor efeito da fricção no PA. Estuários com o comportamento dos setores PA e CF são chamados na literatura de estuários hiperssíncronos, e estuários com o comportamento do setor PM são chamados de hipossíncronos (NICHOLS e BIGGS, 1985).

Um padrão interessante observado dentro do estuário consiste no comportamento da componente norte - sul da velocidade, a qual teve seu sentido determinado pela orientação da linha de costa (Figura 12). Segundo Lerczak e Geyer (2004), a orientação e a curvatura do canal são elementos importantes na direção e no sentido da componente transversal (norte - sul) da velocidade. Nos locais onde o canal tem inclinação para noroeste, se observa que a componente está orientada no sentido positivo do eixo (Norte) durante a enchente, e no sentido negativo (Sul) do eixo Y, durante a vazante. Já nos contornos orientados para sudoeste, se observa que a componente está orientada no sentido negativo do eixo Y (Sul) durante a enchente, e no sentido positivo do eixo Y (Norte) durante a vazante. Nos locais onde a orientação do canal é praticamente Leste – Oeste observou-se que a componente norte –sul da velocidade tem magnitude zero. Uma exceção no padrão de influência da orientação da linha de costa é a porção final do PA. Embora esta porção final tenha uma orientação para sudoeste seguida por uma orientação para noroeste, em virtude do aumento da largura do canal, a velocidade e a componente norte - sul desta possuem baixos valores de magnitude (valores máximos de aproximadamente 0.017 m/s) para a componente norte - sul da velocidade. Portanto, assim como em outros locais do estuário a orientação teria influência no sentido da componente norte - sul da velocidade, porém como os valores desta são muito baixos, este efeito não pôde ser observado.

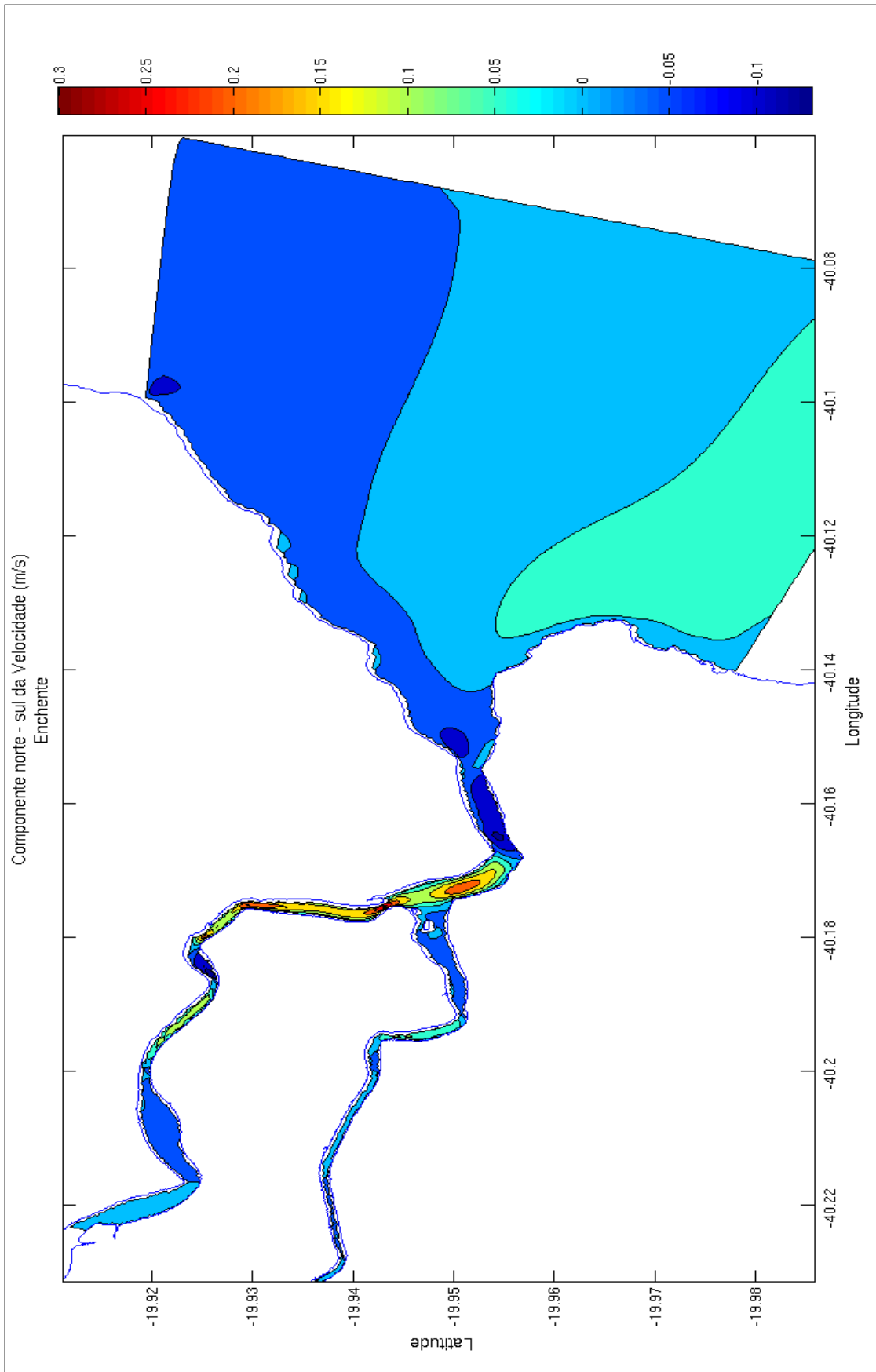


Figura 12: Componente norte - sul da velocidade em m/s durante um período de enchente. A figura mostra o sentido da componente norte - sul da velocidade sendo definido pela orientação da linha de costa.

Assimetria da maré

Um fenômeno importante que ocorre com a maré quando ela entra em estuários é a assimetria de maré devido a processos não lineares de águas rasas (SPEER, 1984). No Sistema Estuarino dos Rios Piraquê- Açu e Piraquê – Mirim foi observado uma dominância de enchente nas (Figura 11) correntes de maré, de forma que, a velocidade máxima durante a enchente foi maior que durante a vazante (Figura 13), em todo o domínio. Esta dominância de enchente é característica de estuários dominados por variações na profundidade do canal ao longo de um ciclo de maré, como o sistema estuarino modelado, ao invés de variações na largura do estuário, em virtude da presença de planícies de maré, por exemplo, (FRIEDRICHS, 2010). Segundo o mesmo autor, para o último caso, o estuário possuiria dominância de vazante. Ressalta-se que o Sistema Estuarino dos Rios Piraquê- Açu e Piraquê – Mirim possui uma planície de maré bordejando o canal estuarino. Desta forma, uma modelagem do sistema estuarino, incluindo a planície de maré existente, poderia resultar em uma dominância de vazante nas correntes de maré. Esta dominância de vazante é de fato observada *insitu*. Portanto, a dominância de enchente observada nos resultados modelados é errônea, e mostra que a modelagem não incluindo elementos importantes do ambiente estuarino, como a planície de maré, pode levar a conclusões equivocadas a respeito da hidrodinâmica do local.

Segundo Mao et al., (2004), a assimetria de maré exerce efeitos tanto na evolução geológica de estuários rasos, quanto na navegabilidade de canais estuarinos. Um estuário de pequenas dimensões, com dominância de enchente, pode ser incapaz de liberar efetivamente sedimentos de dentro do estuário, enquanto que um estuário com dominância de vazante pode manter uma configuração estável.

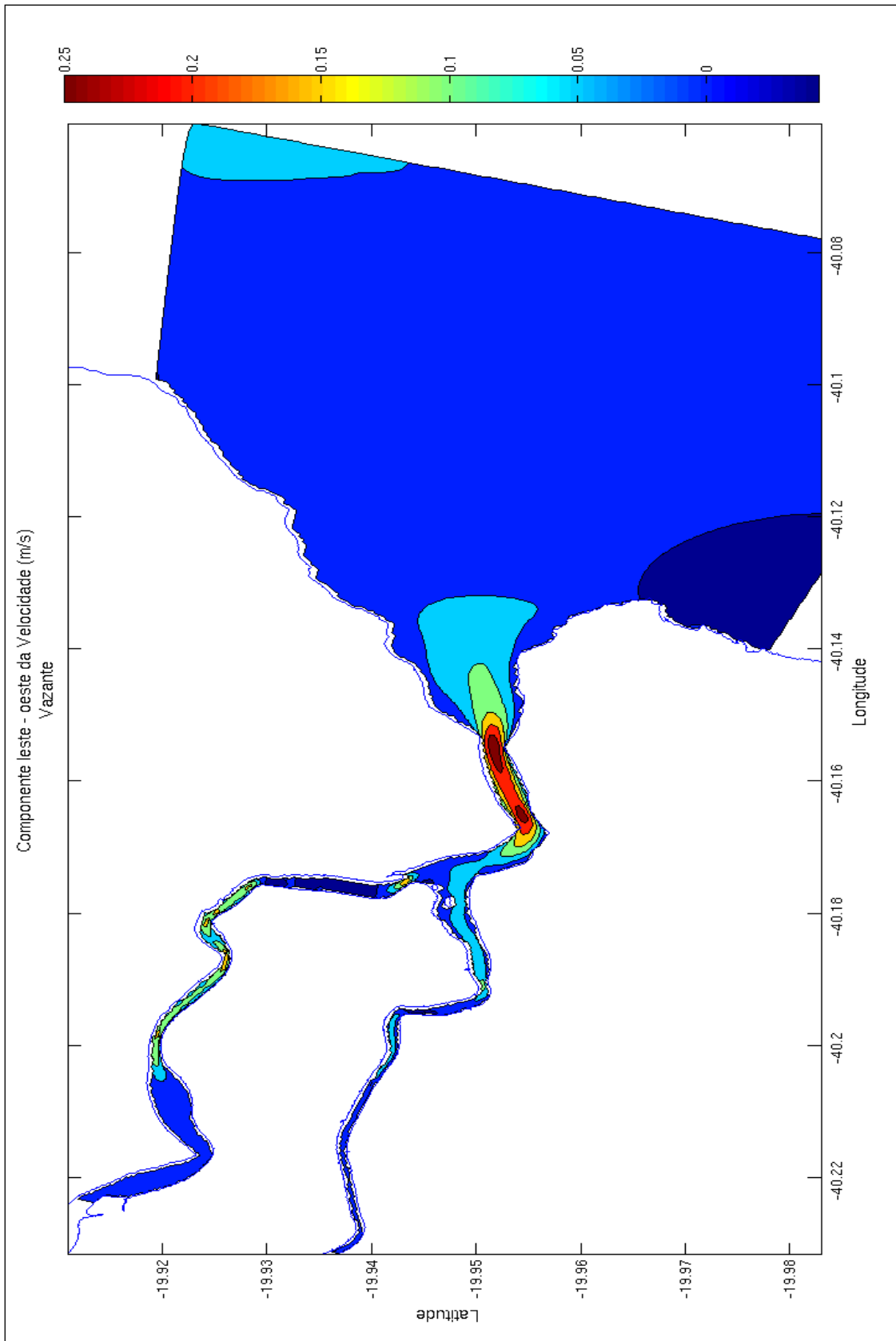


Figura 13: Momento da vazante durante o dia 21 de Janeiro de 2000. Através da comparação entre o período de vazante (Figura 13) e o período de enchente (Figura 11), pode-se verificar uma dominância de enchente dentro do sistema estuarino.

6. CONCLUSÃO

Pôde-se concluir que a maré dentro do sistema estuarino é uma mistura de marés estacionária e marés progressivas, e que o comportamento desta e das correntes de maré é influenciado pela geometria do estuário, visto que a orientação da linha de costa determinou o sentido preferencial da componente norte - sul da velocidade, e que setores com geometrias diferentes resultaram em um comportamento diferencial da elevação e da velocidade ao longo do canal. Além disso, pôde-se verificar que dentro do canal, com as condições impostas (profundidade constante e ausência da planície de maré existente no sistema estuarino), as correntes de maré apresentaram uma dominância de enchente. Por conseguinte, concluiu-se também que a não inclusão de elementos reais do sistema podem levar a resultados errôneos.

7. SUGESTÕES

Os resultados obtidos mostram que a geometria do canal é um elemento importante para o comportamento da maré. E sabendo-se que além desta, outros elementos como a topografia, incluindo – se aqui a planície de maré, e a descarga de água doce são importantes para o entendimento da circulação hidrodinâmica do Sistema Estuarino dos Rios Piraquê -Açu e Piraquê- Mirim, sugere-se que estes outros elementos sejam incluídos em estudos futuros de modelagem do sistema estuarino estudado, a fim de que o comportamento da maré e das correntes de maré modelados seja o mais próximo possível da realidade.

8. REFERÊNCIAS

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

BARROSO, G. F. **Development of an evaluation framework for sustainable bivalve aquaculture:** a strategic plan approach in Espirito Santo, Brazil. 2004. 229f. Tese (Doutorado em Geografia) – University of Victoria, Canadá, 2004.

BARROSO, G. F. Integrated management of river basin and coastal zone: land-use, river flow, and management zones. In: Fourth International Symposium on GIS / Spatial Analysis in Fishery and Aquatic Sciences, 2008, Rio de Janeiro. **Proceedings of the Fourth International Symposium on GIS / Spatial Analysis in Fishery and Aquatic Sciences.** 2008.

BOON, J. D.; BYRNE, R. J. **On basin hypsometry and the morphodynamic response of coastal inlet systems.** *Alarime Geology* 40, 27—48. 1981.

CHACALTANA J. T. A.; MARQUES, A. C.; RIGO, D.; PACHECO C. G. 2003. **Influência do manguezal no padrão de escoamento do sistema estuarino da Ilha de Vitória – ES.** In: V Semana Estadual de Meio Ambiente (SESMA), Vitória, 2003. CD-ROM.

COLLINS ENGLISH DICTIONARY. LONDON e GLASGOW: Harpercollins Publishers Limited. 1979.

CUNHA, K. J. O. **Variações espaciais e temporais da biomassa fitoplantônica nos trechos finais dos rios Piraquê-açu e Piraquê-Mirim, Aracruz-ES.** 2004. 76f. Monografia - Curso de Graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

DIONNE, J. C. Towards a more Adequate Definition of the St. Lawrence Estuary.. **Zeitschr. F. Geomorphology**, v.7, n.1, p. 36-44, 1963.

DRONKERS, J. Tidal Asymmetry and Estuarine Morphology. **Netherlands Journal of Sea Research**, v. 20, p. 117-131, 1986.

DYER, K. R. **Estuaries: A Physical Introduction**. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons. p. 195. 1997.

ESTUÁRIOS. Disponível em: <<http://www.maraberto.ufc.br/estuario.htm>>. Acesso em: 27 maio 2010.

FAIRBRIDGE, R. W. 1980 The estuary: its definition and geochemical role. In: OLAUSSON, E.; CATO, I. **Chemistry and Geochemistry of Estuaries**. John Wiley, New York, pp. 1–35.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

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

FRIEDRICHS, C.T., 2010. Barotropic tides in channelized estuaries. In: VALLE-LEVINSON, A. (ed.), **Contemporary Issues in Estuarine Physics**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 27-61.

FRIEDRICHS, C. T.; MADSEN, O. S. Nonlinear Diffusion of the Tidal Signal in Frictionally Dominated Embayments. **Journal of Geophysical Research**, v: 97, p. 5637-5650. 1992.

HEDSTROEM, K. S., 2009. **DRAFT Technical Manual for a Coupled Sea-Ice/Ocean Circulation Model (Version 3)**. U.S Department of the Interior,

Mineral Management Service, Anchorage, Alaska, Arctic Region Supercomputing Center, University of Alaska Fairbanks.

GAIGHER, L. **Avaliação das concentrações de Fósforo total e Nitrogênio total no Estuário dos Rios Piraquê-açu e Piraquê-mirim (Aracruz-ES)**. Monografia – Curso de Graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

GODIN G. Frictional effects in river tides. In: PARKER B. B. (Ed.). **Tidal hydrodynamics**. New York, John Wiley & Sons, pp. 379-401. 1991.

HAIIDVOGEL, D. B.; ARANGO, H. G.; HEDSTROM, K.; BECKMANN, A.; MALANOTTE-RIZZOLI, P.; SHCHEPETKIN, A. F. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**. v. 32, p. 239–281. 2000.

HAIIDVOGEL, D. B. *et al.* Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. **Journal of Computational Physics**. v. 227, p. 3595–3624. 2008.

IEMA. **Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos**. Disponível em: <www.meioambiente.es.gov.br/download/banner_riacho.pdf>. Acesso em 28 maio 2010.

JAY, D. A.; MUSIAK, J. D. Internal Tidal Asymmetry in Channel Flows: Origins and Consequences. In: PATTIARATCHI, C. P. **Mixing Processes in Estuaries and Coastal Seas**. American Geophysical Union (AGU), Washington DC., pp. pp. 219-258. 1996.

JESUS, H. C.; SANTANA, E. J.; BELO, M. J.; SILVA, L. B.; CEOTTO, C. S.; CASTRO NEVES, D. M.; CASTRO, L. B. **Avaliação da poluição ambiental dos rios Piraquê - Açu e Piraquê - Mirim (Santa Cruz – ES) através da**

análise de águas, biomonitorios e sedimentos. Relatório Técnico - Projeto Aracruz Celulose, 2009.

JESUS, H.C.; DIAS CARNEIRO, M. T. W.; NETO, R. R.; CASSINI, S. T.; SANTANA, E. J.; CEOTTO, C. S.; SILVA, L. B. **Estudo comparativo da qualidade de águas, biomonitorios e sedimentos de três ecossistemas aquáticos do estado do ES (Baía de Vitória, Rio Piraquê-açu/Aracruz e Rio Perocão/Guarapari).** Relatório Técnico-Projeto FAPES/SECT-ES, p. 37, 2008.

JI, Z. G.; HU, G. D.; SHEN, J. A.; WAN, Y. S. Three-dimensional modeling of hydrodynamic processes in the St. Lucie Estuary. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v. 73, p.188-200, 2007.

KJERFVE, B. 1987. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: DAY Jr.; HALL, C.H.A.S.; KEMP, W.M.; YÁNEZ-ARANCIBA, A. (eds.). **Estuarine Ecology**. New York, Wiley, pp. 47-78.

KJERFVE, B. **Hydrodynamics of estuaries**. vol. 1, p. 163, v. 2, CRC Press. Boca Raton. 1988.

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

LERCZAK, J. A.; GEYER, W. R. Modeling the lateral circulation in straight, stratified estuaries. **Journal of Phys. Oceanogr.** v. 34, p.1410–28, 2004.

LEVASSEUR, A.; SHI, L.; WELLS, N. C.; PURDIE, D. A.; KELLY-GERREYN, B. A. A three-dimensional hydrodynamic model of estuarine circulation with an application to Southampton Water, UK. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 73, p. 753-767, 2007.

LI, M.; ZHONG, L.; BOICOURT, W.. Simulations of Chesapeake Bay estuary: Sensitivity to turbulence mixing parameterizations and comparison with observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, 2005.

MACCREADY, P.; HETLAND, R. D.; GEYER, W. R.; Long-term isohaline salt balance in an estuary. **Continental Shelf Research**, v. 22, p. 1591–1601. 2002.

MACIEIRA, R. M. **Aspectos da ictiofauna do sistema estuarino dos rios Piraquê-açu e Piraquê-Mirim, E.S.** Monografia – Curso de Graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

MAO, Q.; SHI, P.; YIN K.; GAN J., QI Y. (2004). Tides and tidal currents in Pearl River Estuary. *Continental Shelf Research*, 24, 1797-1808.

MARONE, E.; NOERNBERG, M. A. **Modelagem numérica costeira no Estado do Paraná: do usuário ao Desenvolvedor dos dados ao produto.** Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná. Relatório Técnico. 28f., 2003.

MAZDA, Y.; KAMIYAMA, K. Tidal deformation and inundation characteristics within mangrove swamps. **Mangrove Science**, v. 4 (in press), 2007.

MAZDA, Y.; KANAZAWA, N. & WOLANSKI, E. Tidal Asymmetry in Mangrove Creeks, **Hydrobiologia**, v. 295, p. 51-58, 1995.

MAZDA, Y.; WOLANSKI, E.; KING, B.; SASE, A.; OHTSUKA, D. & MAGI, M. Drag Force Due to Vegetation in Mangrove Swamps, **Mangrove and Salt Marshes**, v.1, p.193-199, 1997.

MAZDA, Y.; MAGI, M.; NANAHO, H.; KOGO, M.; MIYAGI, T.; KANAZAWA, N.; KOBASHI, D. Coastal erosion due to long-term human impact on mangrove forests. **Wetlands Ecology and Management**, v. 10, 2002.

MAZDA, Y; WOLANSKI, E; RIDD, P. V. **The Role of Physical Processes in Mangrove Environments**: Manual for the preservation and utilization of mangrove ecosystems, p. 3-64, 2007.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, **Rev. Geophys.**, v. 20, n.4, p. 851– 875, 1982.

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.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. São Paulo: Edusp., p. 417, 2002.

MIRANDA, L. B. **Cinemática e dinâmica de estuários**. Apostila do curso de Pós Graduação em Oceanografia Física do Instituto Oceanográfico de São Paulo, p. 300, 1996.

MOBERG, F & RONNBACK, P. Ecosystem services of the tropical seascape: interaction, substitutions and restoration. **Ocean & Coastal Mangement**, v. 46, p. 27 – 46, 2003.

NICHOLS, M.M.; BIGGS R.B., Estuaries. In: DAVIS, R.A., Editor, **Coastal sedimentary environments**, Springer-Verlag, New York (1985), pp. 77–186.

NICOLITE, M. **Caracterização do nível de água do estuário do Rio Paraíba do Sul, RJ**. 2007. 67f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) - Centro de Biociências e Biotecnologia, UENF, Campos dos Goytacazes, 2007.

OLIVEIRA, C. M. S. **Avaliação dos nutrientes dissolvidos no estuário dos Rios Piraquê - Acu e Piraquê - Mirim (Aracruz – ES)**. Monografia – Curso

de Graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.

PARKER, B. B. The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions (Review). In: B.B. Parker (ed.). **Tidal hydrodynamics**. John Wiley & Sons, New York, p. 237-268, 1991.

PAZOLIN, E. V.; TATAGIBA, S. S.; GARCÍA-PRADO, J. A.; FREITAS, R. R. Ecoturismo e preservação do manguezal: O Rio Piraquê - Açú. **Caderno Virtual de Turismo**, Brasil, v. 7, n. 2, p. 57- 63, 2007.

PETHICK, J. **An Introduction to Coastal Geomorphology**, London, Edward Arnold, p. 260, 1984.

PRITCHARD, D. W. Estuarine circulation patterns. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, v. 81, n. 717, p. 1 – 11, 1955.

PRITCHARD, D. W. (1989). Estuarine Classification - A Help or a Hindrance. In: NEILSON, B. J.; KUO, A.; BRUBAKER, J. (Eds.), **Estuarine Circulation**. Clifton: Humana Press, p. 1 – 38, 1989.

PUGH, D. T. **Changing sea levels: effects of tides, weather, and climate**. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press, xiii, p. 265, 2004.

RICHARDS, C. **The basics of estuarine circulation, and the contributions of an internal tidal asymmetry**. 2004. Disponível em: <myweb.dal.ca/cl487279/school/estuarine_circulation.pdf> Acesso em: 20 abr. 2010.

RIGO, D. **Análise do escoamento em regiões estuarinas com manguezais – medições e modelagem na Baía de Vitória, ES**. 2004. 156f. Tese de Doutorado (Engenharia Oceânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro. p. 156, 2004.

ROMSTOOLS. Disponível em. Acesso em: Fev. 2010.

ROSMAN, P. C. C., 2001, "Os Modelos para Recursos Hídricos". In: MAGRINI, A.; DOS SANTOS, M. A. (eds). **Gestão Ambiental em Recursos Hídricos**, v. 3, Capítulo 2 (Parte III), Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais, COPPE/UFRJ. 2001.

ROSSO, T. C. A; ROSMAN, P. C. C. Modelo Hidrodinâmico para as Baías de Ilha Grande e Sepetiba. In: ALFREDINI, P.; RAMOS, C. L.; TAMADA, K.; ORTIZ, J. (Org). **Desenvolvimento Sustentável dos Recursos Hídricos**, v1, p. 361-365, São Paulo, SP, 1995.

SALLES, F. J. P.; BENTES, F. C. M; SANTOS, J. A. **Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras**. 1. ed. Rio de Janeiro: FEMAR, 280. 2000.

SEAMA - SECRETARIA DE ESTADO PARA ASSUNTO DO MEIO AMBIENTE. **Projeto de Gerenciamento Costeiro do Estado do Espírito Santo, Região Litoral Norte: Macrozoneamento Costeiro**. Vitória: Memorial Descritivo, 23f. 1998.

SEIM, H.E., J. O. BLANTON AND S. ELSTON. 2006. Tidal circulation and energy dissipation in a shallow, sinuous estuary. **Ocean Dynamics** 56(3-4): 360-375.

SPEER, P. E. 1984. **Tidal distortion in shallow estuaries**. Ph.D. thesis, WHOIMIT Joint Program in Oceanography, Woods Hole, MA. 210 pp.

SPEER, P. E.; AUBREY, D. G. **A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems** - Part 1: Observations, Estuarine Coastal and Shelf Science, v. 21, p. 207-224, 1985.

STIGEBRANDT, A. Dynamic control by topography in estuaries. In: KJERFVE, B. **Hydrodynamics of estuaries**. vol. 1, p. 163 CRC Press. Boca Raton. p 17-26, 1988.

TIDE PRINCIPLES. Disponível em:
http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/03-04/marine/res_resourcebkd.htm. Acesso em: 08 jun. 2010.

TOMZACK, M. **Introduction to Physical Oceanography**. 1996. Disponível em: [<www.es.flinders.edu.au/~mattom/ShelfCoast/notes/chapter11.html>](http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/ShelfCoast/notes/chapter11.html)
Acesso em: 07 jun. 2010.

UMLAUF, L.; BURCHARD, H.. (2003), A generic length-scale equation for geophysical turbulence models, *J. Mar. Res.*, 61, 235– 265.

VELLOZO, T.G.; ALVES, A.R. - Características gerais do fenômeno da maré no Brasil. *Anais Hidrográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação* , Tomo LXI, 2006.

WARNER, J. C.; SHERWOOD, C. R.; ARANGO, H.G.; SIGNELL, R. P.. 2005: Performance of four Turbulence Closure Methods Implemented using a Generic Length Scale Method. *Ocean Modelling*, **8**, 81-113.

WEISBERG, R.H.; ZHENG, L.Y.. 2007. Estuarine Hydrodynamic Modeling of Rookery Bay. College of Marine Science. University of South Florida. Florida. USA. 2007.

WOLANSKI, E.; JONES, M.; BUNT, J. S.. 1980. “Hydrodynamics of a Tidal Creek – Mangrove Swamp System”, *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 31: 431-450.

WOLANSKI, E.; MAZDA, Y.; KING, B.; GAY, S.. 1990. "Dynamics, Flushing and Trapping in Hinchinbrook Channel, a Giant Mangrove Swamp, Australia", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 31: 555-579.

WWF/BRASIL – Zona Costeira. Disponível em: http://www.wwf.org.br/informacoes/questoes_ambientais/biomas/bioma_costeiro/. Acesso em: 26 maio de 2010.

ZHANG, Y. L.; BAPTISTA, A. M.. .2008. "SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation." *Ocean Modelling*: 21(3-4), 71-96.

APÊNDICE 1

Algumas das opções físicas e numéricas definidas para este estudo.

- As equações serão resolvidas no modo 3D;
- Termos de Coriolis e advecção ativados;
- Mistura de momento nas superfícies geopotenciais e nas superfícies de nível sigma constante;
- Mistura horizontal Laplaciana de momento;
- Mistura horizontal Laplaciana e Bilaplaciana de traços;
- Mistura de traços nas superfícies geopotenciais e nas superfícies de nível sigma constante;
- Forçante de maré nos contornos abertos;
- Condições de contorno aberto, já citadas no texto.
- Mistura vertical de traços e momento;
- Variáveis termohalinas;
 - Temperatura = 14 °C
 - Salinidade = 35 psu