

ESTUDO DA HIDRODINÂMICA E SALINIDADE NA BAÍA DE VITÓRIA ATRAVÉS DE MODELAGEM COMPUTACIONAL

Henery Ferreira Garção¹ & Julio Tomás Aquije Chacaltana².

RESUMO --- O estudo da circulação da água e da distribuição da salinidade no ecossistema estuarino é de grande importância, porque condicionam a distribuição e o transporte de materiais no sistema, como sais dissolvidos e sedimentos. O objetivo principal deste estudo foi de avaliar o padrão de escoamento da Baía de Vitória (ES) e a distribuição de salinidade considerando como forçantes a maré astronômica e vazão do rio Santa Maria da Vitória. Os resultados mostraram que as marés de sizígia proporcionaram maiores velocidades, sendo que a região sul possui as maiores magnitudes. Os resultados de distribuição de salinidade mostraram que esta variável se comportou de acordo com a variação da maré, estando em fase com a onda de maré, sendo a região sul da Baía de Vitória fortemente influenciada pela água salgada oriunda do oceano adjacente, e a parte norte sujeita ao deságüe do rio Santa Maria e a parte central do estuário há uma confluência das duas forçantes.

ABSTRACT --- The study about water circulation and salinity distribution in the estuarine ecosystem is of high importance, because it regulates the distribution and the material transport in the system, like dissolved salt and sediment. The main objective of this study was to evaluate the flow pattern of the Vitória Bay (ES) and the salinity distribution considering as forcings the astronomic tide and discharge of Santa Maria da Vitória river. The results have shown that the spring tide provides great velocities, being that the south region has the major magnitudes. The results about the salinity distribution show that this variable behaved according to the tide variation, showing that to be in phase with the tide wave, being the south region of Vitória Bay strongly influenced by the salt water from the ocean, and north portion submits the discharge of Santa Maria river and the central portion of the estuary occur a confluence to the both forcings.

Palavras-chave: Estuário, Hidrodinâmica, Salinidade.

1) Mestrando em Engenharia Ambiental da UFES, Av. Fernando Ferrari, 514, 29075-910 Vitória. E-mail: hgarcao@yahoo.com.br

2) Professor Adjunto da UFES, CT, Av. Fernando Ferrari, 514, 29075-910 Vitória. E-mail: juliotac@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

Ecossistemas estuarinos são ambientes complexos do contexto marinho. Devido esta complexidade, existem diferentes definições para estes ambientes em concordância com suas morfologias e forçantes. Ao longo dos anos tem se buscado uma melhor definição, incluindo características geológicas e processos regionais que contribuem para sua formação (Perillo, 1996; Elliott & Mclunsky, 2002). Por exemplo, Perillo (1996) definiu que estuário “é um corpo d’água costeiro semifechado, estendendo-se até o limite efetivo da influência da maré, sendo a água do mar, ou de qualquer outro corpo costeiro salino de água entrando por uma ou mais conexões com o oceano aberto, é diluída significativamente com a água fluvial proveniente da drenagem continental”.

A circulação da água no ecossistema estuarino é de grande importância, uma vez que esta condiciona a distribuição e o transporte de materiais no sistema, como a salinidade, sedimentos e nutrientes. É importante ressaltar que a hidrodinâmica e o transporte de materiais nos ambientes estuarinos estão relacionados a eventos meteorológicos (chuvas, ventos), oceanográficos (ondas, marés) e geológicos (composição do sedimento) (Ribas, 2004). Portanto, a caracterização hidrodinâmica é fundamental para o entendimento de vários processos físicos, químicos e para o manejo da qualidade da água.

Na caracterização da circulação desses corpos d’água, tem se aplicado estudos experimentais e de modelagem numérica. Modelos numéricos validados são ferramentas indispensáveis à gestão e ao gerenciamento de sistemas ambientais, capazes de resultar na otimização de custos de monitoramento e medições através da integração de informações espacialmente dispersas.

Os estuários são sistemas frágeis, regidos pela interação de diversos processos físico-químicos e biológicos e, apesar de normalmente possuírem grande importância sócio-econômica e ecológica, devido a sua complexidade, esses ecossistemas nem sempre são estudados de forma eficiente (Ribas, 2004).

Nesse contexto, propõem-se estudar a hidrodinâmica e a distribuição de salinidade da região da Baía de Vitória através do uso do modelo computacional DIVAST (*Depth Integrated Velocity and Solute Transport*). Nas simulações a maré astronômica e uma vazão média do Rio Santa Maria serão consideradas como únicas forçantes do movimento da água.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a Baía de Vitória, região localizada na Grande Vitória (Espírito Santo – Brasil), limitada ao sul pelo canal de Acesso do Porto de Vitória e ao norte pelo Canal da Passagem e pelo rio Santa Maria da Vitória (Fig. 1). Está localizado entre as coordenadas 40° 18’ e 40° 20’ W e 20° 19’ e 20° 15’ S.



Figura 1 - Representação do complexo estuarino na região da Grande Vitória. Em destaque (retângulo vermelho) a área de estudo.

A Baía de Vitória têm como maiores contribuidores de água doce os rios Marinho, Bubú e Santa Maria da Vitória. Este último é o mais importante por apresentar maior vazão, podendo ter médias mensais variando de 4 m³/s a 30 m³/s (HIDROWEB, 2007).

Entre as forçantes que interferem na hidrodinâmica da Baía de Vitória, a maré está entre as mais importantes neste corpo estuarino. O tipo de maré na região é de micromarés e semidiurna, apresentando oscilações médias de 0,13 m a 1,46 m em marés de sigízia e de 0,54 m a 1,06 m para marés de quadratura no porto de Vitória (FEMAR, 2000). Tem como a principal componente a principal lunar (M_2), a qual tem um período de 12,42 h (Brown *et al.* 1999) e uma altura de 46,2 cm no porto de Vitória (FEMAR, 2000).

3 METODOLOGIA

3.1 Modelo DIVAST

O modelo numérico utilizado neste estudo é o DIVAST (*Depth Integrated Velocity and Solute Transport*), o qual se baseia nas equações do tipo águas rasas, que são resultado da integração na vertical das equações tridimensionais de Reynolds considerando um fluido incompressível e as hipóteses de pressão hidrostática e de onda longa. O DIVAST é um modelo 2DH, isto é, um modelo bidirecional na horizontal, sendo este tipo de modelo usado para corpos d'água bem misturados a pouco estratificados. Este modelo tem sido utilizado para simular a distribuição das correntes, elevações da superfície e alguns parâmetros de qualidade de água na zona costeira.

As equações que governam o modelo hidrodinâmico quando são integradas pela profundidade, assumem as formas mostradas a seguir (Eqs. 1-3) (Falconer, 1976).

Conservação de massa:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = q_m \quad (1)$$

Conservação da quantidade de movimento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \beta p U}{\partial x} + \frac{\partial \beta p V}{\partial y} = & f q - g h \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{p_\alpha}{\rho} C_w W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ & - \frac{g p \sqrt{p^2 + q^2}}{H^2 C^2} + \varepsilon \left(2 \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial \beta p U}{\partial x} + \frac{\partial \beta p V}{\partial y} = & -f p - g h \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{p_\alpha}{\rho} C_w W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ & - \frac{g q \sqrt{p^2 + q^2}}{H^2 C^2} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

onde p e q = descargas por unidade de largura respectivamente ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$) nas direções x e y ; q_m = descarga-fonte por unidade de área horizontal ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$); U e V = componentes da velocidade média na profundidade nas direções x e y , respectivamente; β = fator de correção do momentum; f = parâmetro de Coriolis devido à rotação da Terra; g = aceleração gravitacional; H = profundidade total da água; η = elevação da superfície da água; ρ_α = massa específica do ar; ρ = massa específica do fluido; C = coeficiente de rugosidade de Chezy; C_w = coeficiente de resistência do ar/fluido; ε = viscosidade turbulenta média na profundidade; e W_x e W_y = componentes da velocidade do vento na superfície nas direções x e y , respectivamente, medida a 10 metros de altura (m/s);

A equação do transporte de soluto, ou equação de advecção-difusão para um constituinte pode ser definida como:

$$\frac{\partial HS}{\partial t} + \frac{\partial HUS}{\partial x} + \frac{\partial HVS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} H \frac{\partial S}{\partial x} + D_{xy} H \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} H \frac{\partial S}{\partial x} + D_{yy} H \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \Phi \quad (4)$$

onde S = concentração média do constituinte na profundidade; D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} e D_{yy} = coeficientes dispersão-difusão em x e y ; e Φ = termo fonte ou sumidouro.

O método numérico utilizado para resolver as equações governantes descritas anteriormente é o método das diferenças finitas. O tipo de esquema utilizado no modelo de diferenças finitas é baseado no método Implícito de Direção Alternante (Alternating Direction Implicit – ADI). Esta técnica envolve a subdivisão de cada passo de tempo em dois meio passos de tempo.

3.2 Malha computacional

A determinação de uma malha computacional e sua orientação deve preconizar as características da região a ser modelado e do estudo a ser realizado, bem como as condições de

contorno a serem inseridas (Rocha, 2000). O DIVAST utiliza uma malha composta de células quadradas, tendo como vantagem a simples construções destas.

Para o desenvolvimento deste estudo foi utilizada uma malha computacional composta de 630 por 600 células. Esta consiste em uma malha com células de 25 metros com orientação de 148° em relação ao norte, que abrange todo o sistema estuarino da ilha de Vitória e a Baía do Espírito Santo, como mostrado na figura 2.

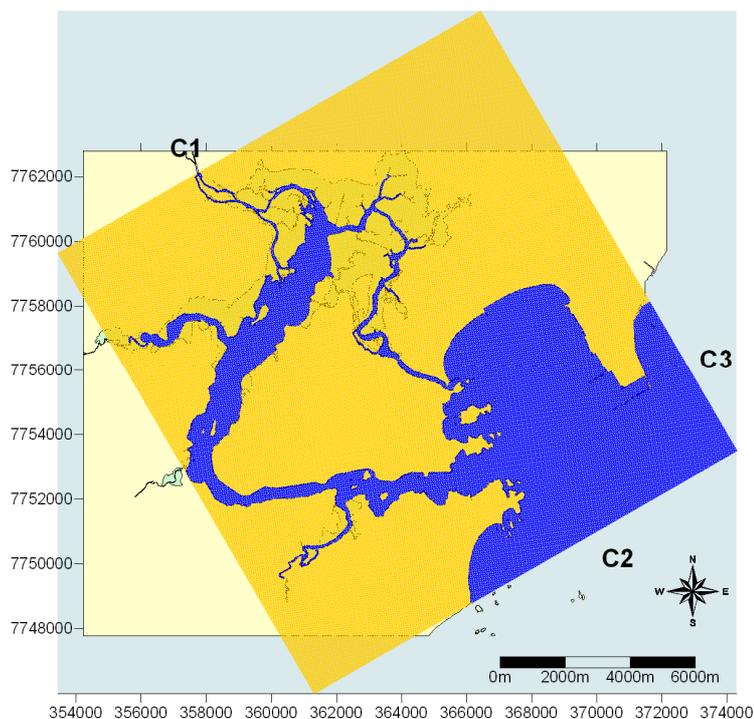


Figura 2 - Representação da área do canal da Baía de Vitória, Canal de Acesso ao Porto de Vitória, Canal da Passagem e Baía do Espírito Santo a ser modelada e as localizações dos contornos abertos utilizada no estudo.

A utilização de uma malha com esta abrangência se deve ao fato da melhor representatividade das condições de contorno para área de estudo. Para estudos futuros, é indicada uma malha de maior refinamento e que objetive somente a Baía de Vitória.

3.3 Condições de contorno e iniciais

Neste estudo foram empregadas três condições de contorno abertas: uma para o rio Santa Maria da Vitória (C1) e duas para a Baía do Espírito Santo (C2 e C3) (Fig. 2). Para o contorno C1 foi atribuída condição de velocidade e para C2 e C3 condições de elevação de maré. Entretanto, para C3 só há ocorrência de fluxo de massa, não a entrada da maré astronômica.

Ao contorno C1, referente ao rio Santa Maria da Vitória, foi atribuída uma vazão de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma salinidade nula. Já em relação aos dados atribuídos ao contorno C2, foram passados valores de maré para o mês de dezembro de 2007 do modelo desenvolvido por Viegas (2006), o qual estudou o comportamento da maré no litoral do Espírito Santo, e uma salinidade de 35.69 ppt (Oliveira, 2006).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A menor variação do nível d'água na Baía de Vitória ocorreu na maré de quadratura de lua minguante, a qual produziu uma variação de 41 cm para estações da Baía de Vitória (Fig. 3). Este valor é 57% inferior a menor variação produzida na maré de quadratura de lua crescente (71 cm de variação).

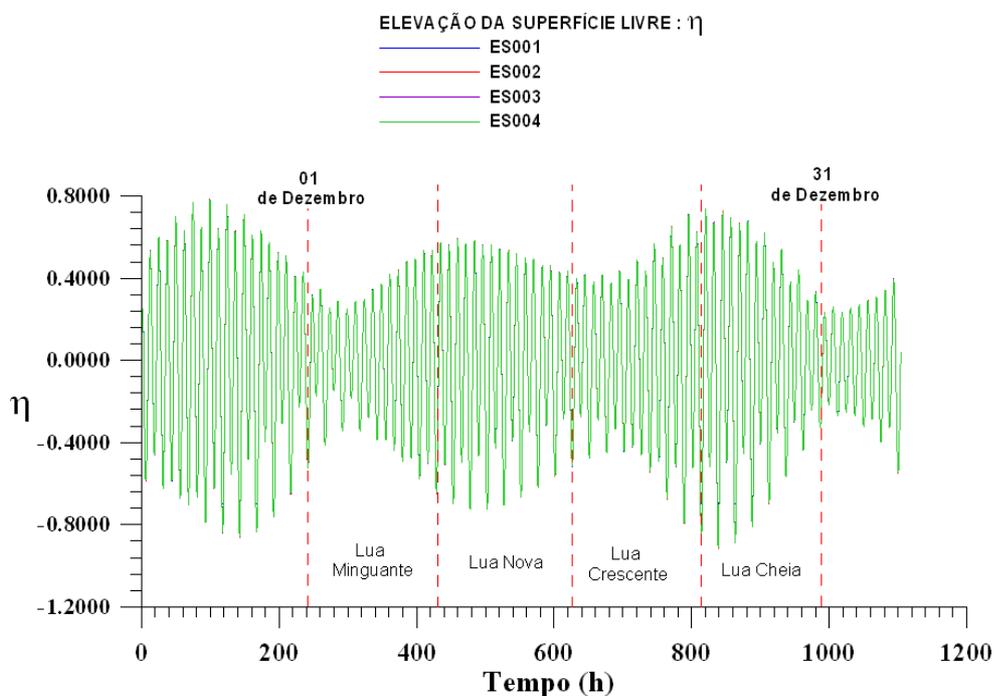


Figura 3 - Gráfico de elevação da superfície em estações localizadas ao sul da Baía de Vitória. É observada a sobreposição das linhas nas estações.

Com relação às marés de sizígia, as elevações produzidas na fase de lua cheia foram maiores que em lua nova (Fig. 3). Entretanto, no final do período de fase de lua cheia a variação do nível da água foram menores que na lua nova, devido ao período de transição de lua (cheia para minguante), sendo que nesta nova fase as elevações são menos expressivas.

Com relação aos resultados de velocidade (Fig. 4) é observado que a parte sul da Baía de Vitória se comporta diferente do restante do corpo d'água. As maiores velocidades estão associadas ao período de enchente, tanto para quadratura quanto para sizígia, enquanto que na parte central e norte estão associadas ao período de vazante. Estes mesmos resultados foram encontrados por Rigo (2004), em que atribuiu este comportamento a não consideração do manguezal na simulação.

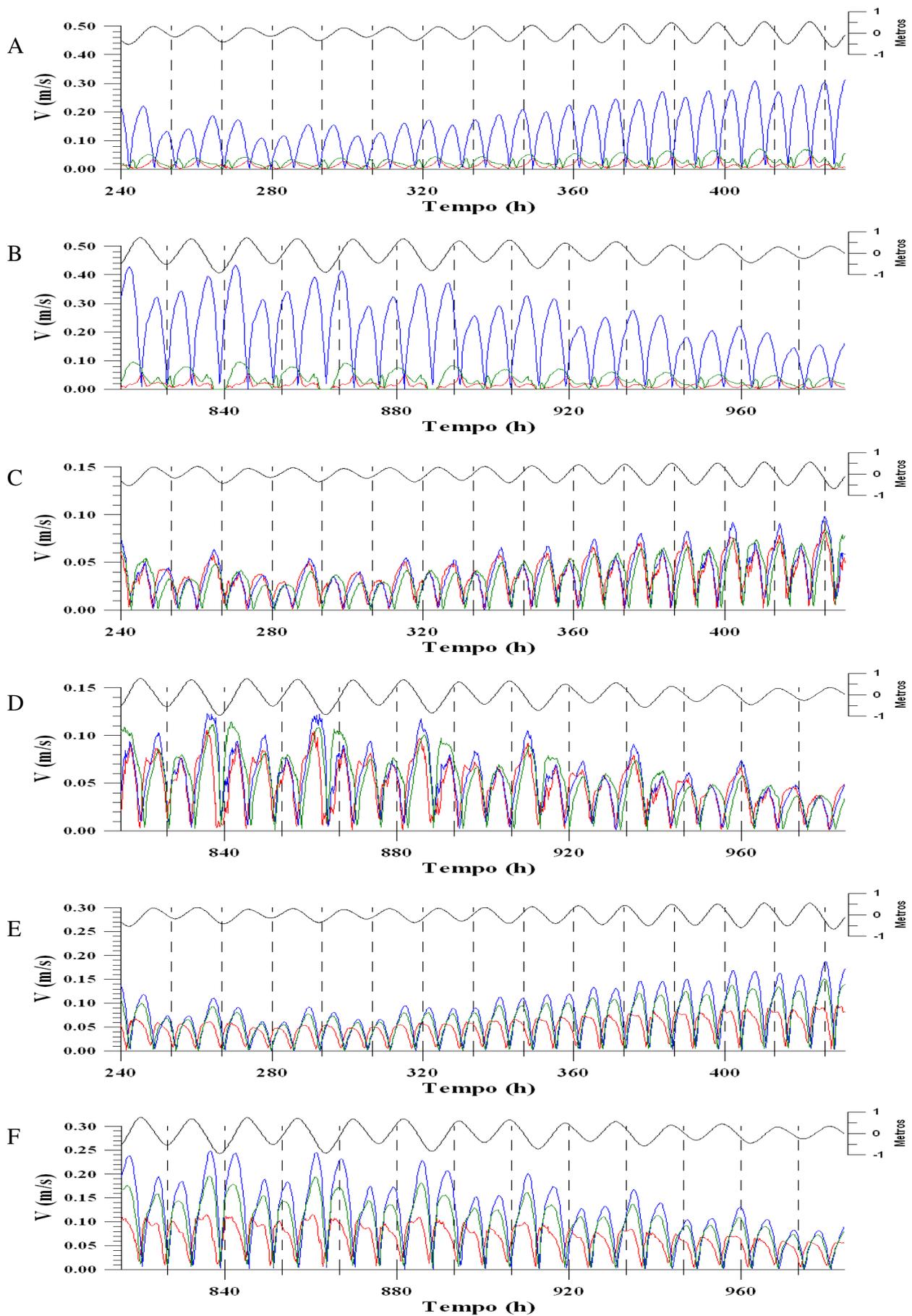


Figura 4 - Magnitudes de velocidade em estações ao sul (A-B), norte (C-D) e no centro (E-F). Linhas em vermelho são estações localizadas na margem direita do canal, em azul no centro e em verde na margem esquerda. Quadratura: A, C e E. Sizígia: B, D e F.

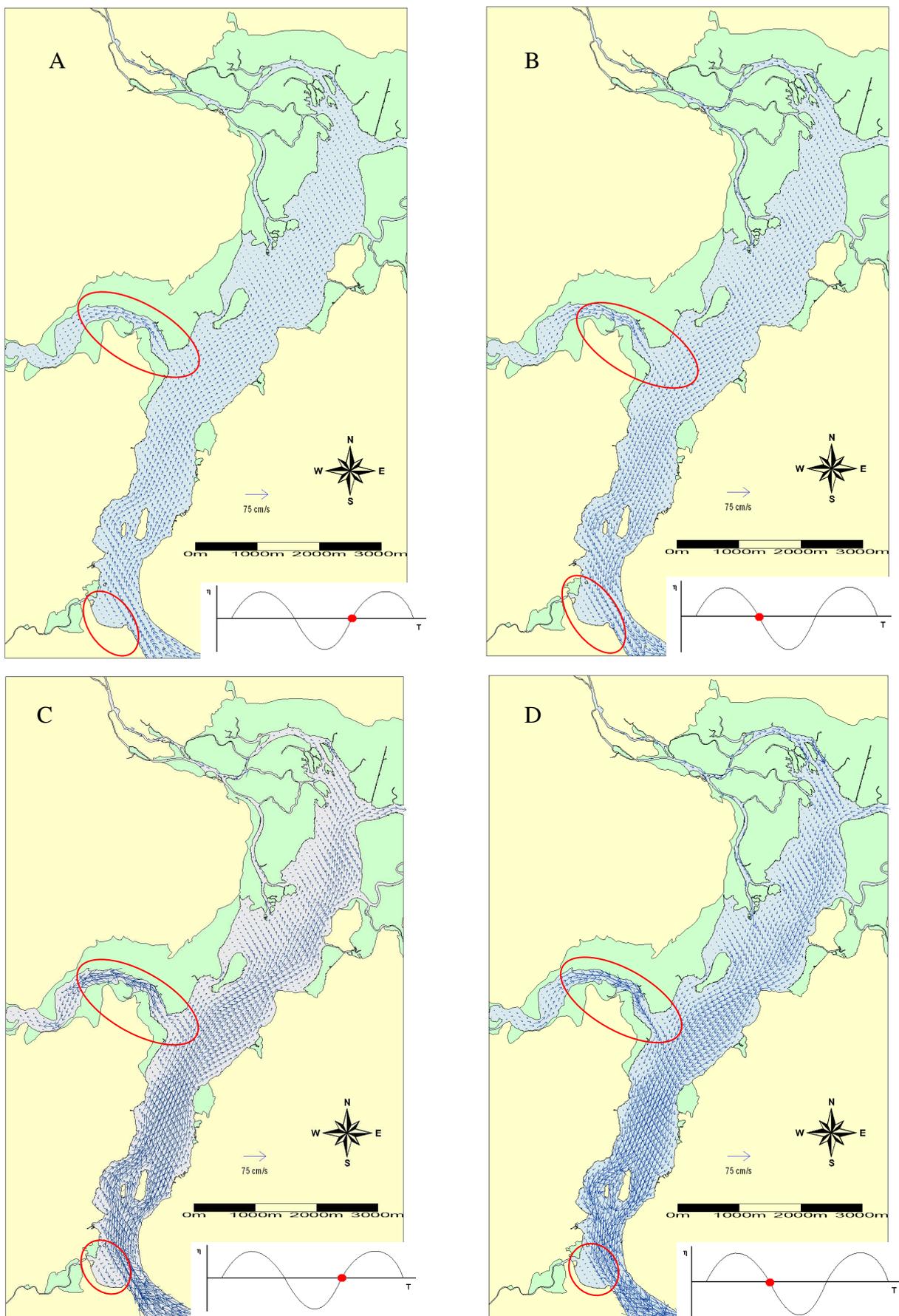


Figura 5 - Campos de velocidade em maré de quadratura (A-Enchente, B-Vazante) e sizígia (C-Enchente, D-Vazante). Em destaque, locais de baixa hidrodinâmica (sul da Baía de Vitória) e formação de jatos (rio Bubú).

É também observado que as maiores magnitudes de velocidade ocorrem na parte sul da Baía de Vitória (Fig. 4-A e 4-B). Em marés de quadratura, a maior magnitude encontrada para parte sul foi de aproximadamente 30 cm/s, enquanto na parte norte foi de 10 cm/s e na central 18 cm/s. Em marés de sizígia a discrepância foi maior, sendo que na parte sul a maior magnitude encontrada foi de 42 cm/s, ao passo que na parte norte foi de 14 cm/s e na central 24 cm/s. Este padrão de magnitude é explicado pelas diferenças de profundidade existentes entre as regiões, sendo que a parte sul possui maiores profundidades, bem como o estreitamento da seção do canal.

Os campos de velocidade (Fig. 5) mostram duas regiões peculiares: uma com formação de jatos e outra de baixa hidrodinâmica. O escoamento em forma de jato ocorre na desembocadura do rio Bubu, tanto no período de preamar e baixar, quanto para maré de quadratura e sizígia, somente variando a magnitude. Esta forma de escoamento está relacionada a diminuição da seção dentro deste pequeno canal associada a uma maior profundidade. Já no que tange à região de baixa hidrodinâmica, esta está localizada na saída do rio Itanguá. O que se mais se destaca neste local é a formação de vórtice em determinados períodos da maré. A formação destes vórtices se estabelece pouco tempo depois da inversão do sentido da corrente no canal principal, permanecendo até a próxima inversão. De acordo com Santiago (2004), a formação de vórtices em canais pode estar associada a reentrâncias das margens com baixa profundidade, que ocasionam o cisalhamento das camadas do fluido induzindo movimentos rotacionais. A magnitude de velocidade nestes vórtices está relacionada com o tipo de maré, sendo que pode atingir até 30 cm/s.

Em referência aos resultados obtidos para a distribuição de salinidade na área de estudo nota-se que este parâmetro esteve em fase com a oscilação de maré (Fig. 6). Nos períodos de menor oscilação da maré a salinidade nas estações apresentou menor variação, e o contrário, quando a maré apresentou maiores oscilações, a salinidade se comportou de mesma forma.

Nas estações da parte sul da baía as oscilações de salinidade provocada pela maré de quadratura variaram entre 17 e 23 ppt, enquanto que na maré de sizígia os valores oscilaram entre 14 e 24 ppt. Já nas estações localizadas na parte sul a salinidade pouco variou, tanto na quadratura quanto na sizígia, oscilando entre 1.5 e 4 ppt. Enquanto nas estações na parte central do estuário, apresentaram as maiores variações de salinidade, sendo que na quadratura a salinidade variou de 8.5 a 15.5 ppt e na sizígia variou de 7 a 16 ppt.

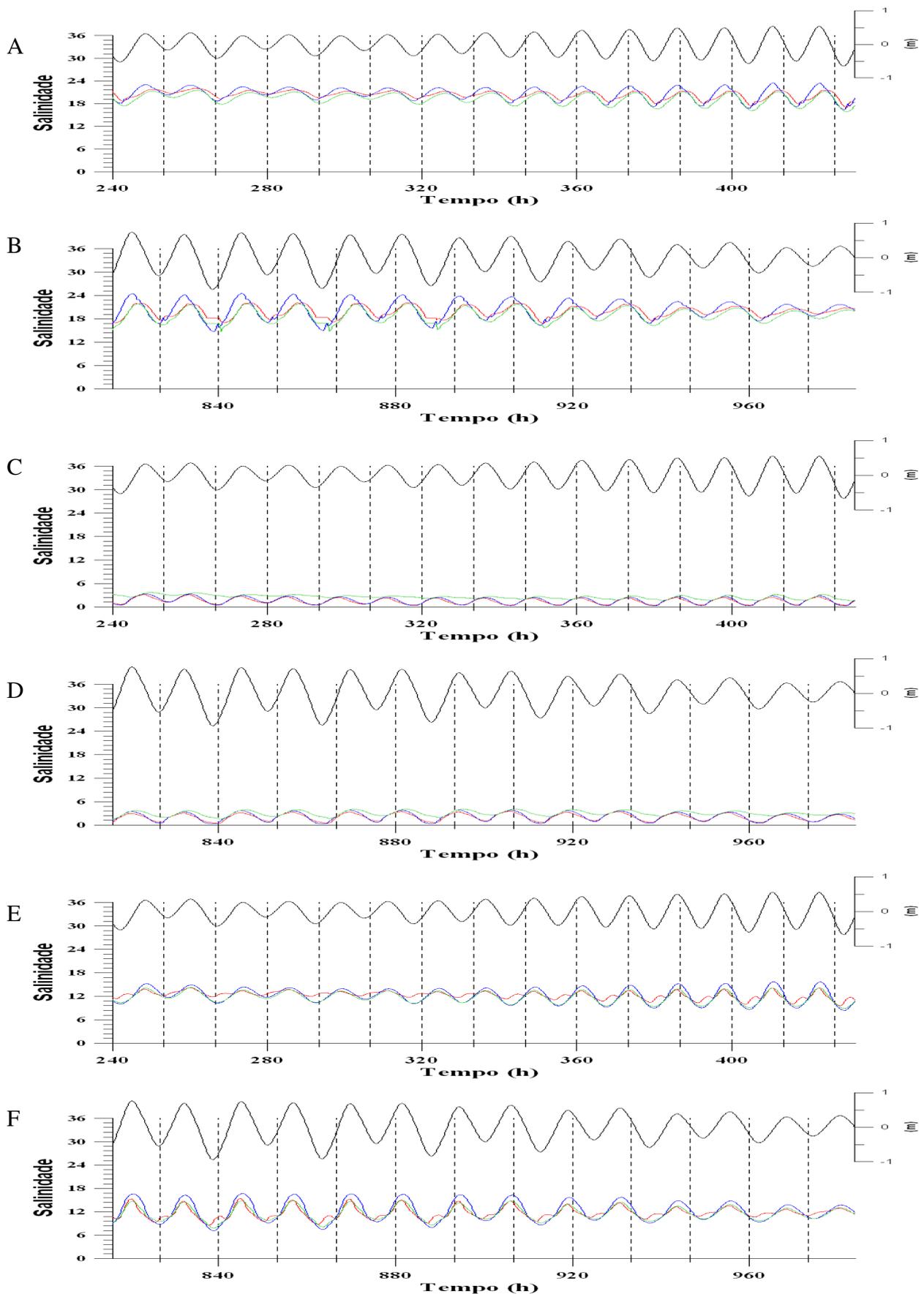


Figura 6 - Salinidade em estações ao sul (A-B), norte (C-D) e no centro (E-F). Linhas em vermelho são estações localizadas na margem direita do canal, em azul no centro e em verde na margem esquerda. Linha preta é a elevação da superfície. Quadratura: A, C e E. Sizígia: B, D e F.

A região sul da baía é mais fortemente influenciada pela água salgada oriunda do oceano adjacente que pela água doce do rio Santa Maria da Vitória. Em contrapartida, a parte norte está sujeita ao deságüe do rio Santa Maria que pela água salgada do oceano, sendo este último de baixa influência. Na parte central do estuário há uma confluência das duas forças, resultando em maiores oscilações de salinidade. A figura 7 ilustra a preponderância de cada força ao longo da Baía de Vitória, sendo que na parte sul as isohalinas tem uma forma côncava, voltadas para dentro da baía. Ao se deslocar para o norte, as isohalinas vão modificando a sua forma, até invertem a concavidade.

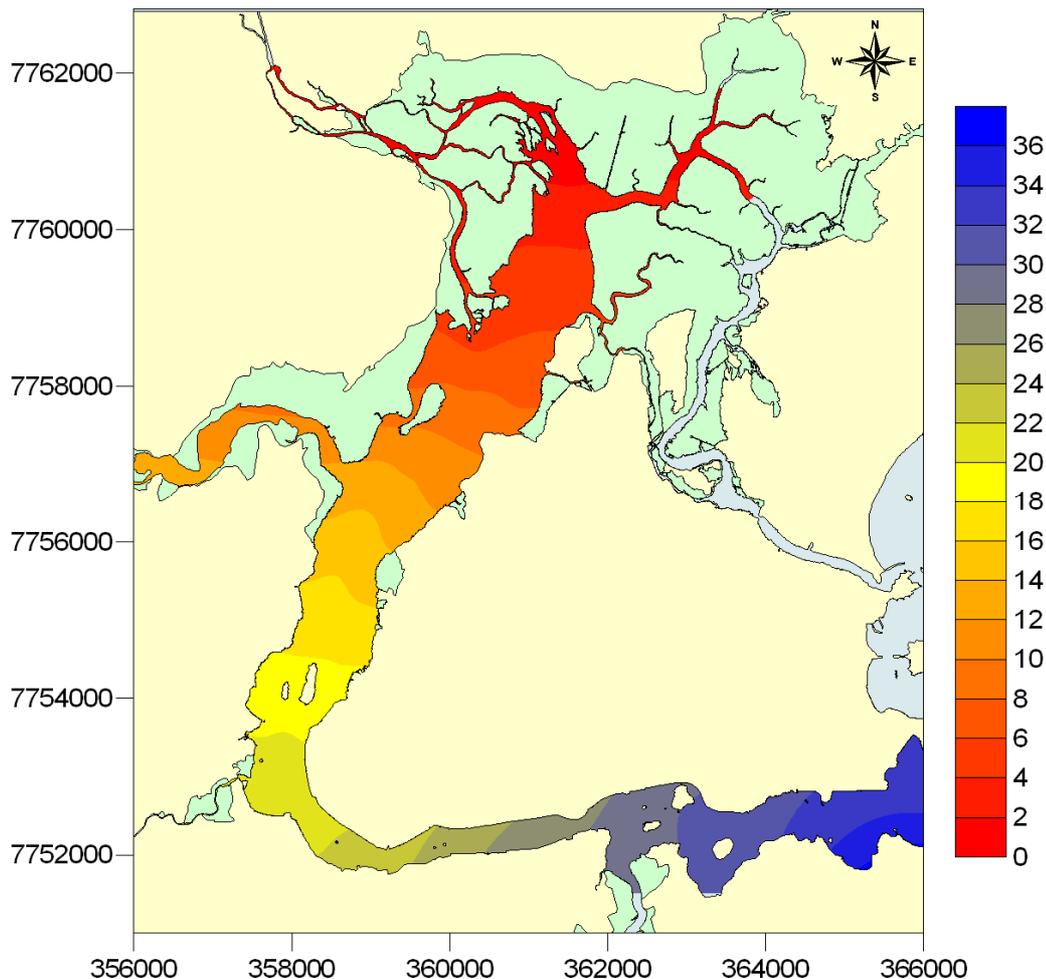


Figura 7 - Representação dos valores médios de salinidade da Baía de Vitória e do Canal de Acesso ao Porto.

As médias de salinidade obtidas neste estudo para Baía de Vitória e para o Canal de Acesso ao Porto foram satisfatórias quando comparados com os valores obtidos por Neto *et al.* (2006) para os mesmos pontos (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores de salinidade encontrados por Neto *et al.* (2006) e pela simulação em 18 estações distribuídas no sistema estuarino de Vitória.

Região	Estações	Longitude	Latitude	Salinidade encontrada por Neto <i>et al.</i> (2006)	Média da salinidade da simulação
Baía de Vitória	7	361663	7760160	3,8	3,2
	8	360766	7757579	13,2	8,4
	9	358975	7756740	19	13,2
	10	358984	7754907	19,9	16,6
	11	358114	7753293	20,8	20,2
Canal de Acesso ao Porto	12	358779	7751934	22,4	22,6
	13	360374	7752298	24,9	25,4
	14	362174	7752166	28,1	29,1
	15	362704	7752775	27,1	29,6
	16	363533	7751782	32,9	30,9
	17	364988	7752763	32,6	32,7
	18	366155	7752182	32,7	33,6

5 CONCLUSÕES

O comportamento da elevação da superfície devido a maré astronômica se mostrou de forma semelhante ao longo do estuário, desde a porção sul a porção norte, sendo que ao penetrar no corpo d'água, alcança toda extensão da região.

As velocidades das correntes ao longo das estações apresentam dominância de vazante nas marés tanto em marés de quadratura quanto de sizígia, exceto para região mais ao sul da Baía de Vitória que apresentou dominância de enchente. É válido salientar a existência de locais com formação de vórtice e escoamento em forma de jato.

A distribuição de salinidade nas estações amostrais se comportou de acordo com a variação da maré, estando em fase com a onda de maré. As médias de salinidade obtidas na simulação foram satisfatórias para Baía de Vitória quando comparada com o estudo desenvolvido por Neto *et al.* (2006).

BIBLIOGRAFIA

BROWN, J.; COLLING A.; PARK D.; PHILLIPS J., ROTHERY D.; WRIGHT J. (1999). *Waves, Tides and Shallow-Water Processes*. Walton Hall: Open University.

ELLIOTT, M.; McLUSKY, D. S. (2002). "The need for definitions in understanding estuaries". *Estuarine, Coastal and Shelf Science* v.55, pp. 815-827.

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

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

HIDROWEB. Sistema de Informações Hidrológicas (2007). Versão 1.0.8. Brasília: Agência Nacional de Águas. Download em <http://hidroweb.ana.gov.br>.

NETO, R. R.; BARROSO, G.F.; OLIVEIRA, T. K. P. de. (2006). “*Utilização e Biomarcadores Lipídicos na Avaliação da Poluição Ambiental na Baía de Vitória e Canal da Passagem*”. Relatório final – FACITEC, Vitória-ES.

PERILLO, G. M. E. (1996). “*Definitions and geomorphologic classification of estuaries*”, in *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Org. por Perillo, G. M. E, Elsevier, pp. 17-46.

OLIVEIRA, R. J. (2006). *Avaliação da qualidade de água da Baía do Espírito Santo no período de 2000 a 2005*. Monografia (Graduação em Oceanografia) - Universidade Federal do Espírito Santo.

RIBAS, T. M. (2004). *Implementação de Modelo Numérico para estudo hidrodinâmico das Baías de Antonina e de Paranaguá – PR*. Dissertação. (Mestrado em Engenharia em Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação.

RIGO, D. (2004). *Análise do escoamento em regiões estuarinas com manguezais – Medições e modelagem na Baía de Vitória, ES*. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia.

ROCHA, A.B. (2000). *Estudo da hidrodinâmica e do transporte de solutos na Baía do Espírito Santo através de modelagem computacional*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo Vitória, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

SANTIAGO, D. I. (2004). *Simulação Numérica do Padrão de Escoamento no Canal de Acesso ao Porto de Vitória, ES*. Monografia (Graduação em Oceanografia) - Universidade Federal do Espírito Santo.

VIEGAS, N. J. F. (2006). *Modelagem Numérica das Marés no Litoral do Espírito Santo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.