

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL

**Dinâmica de um canal estuarino fracamente
estratificado**

Dissertação de Mestrado

Fernanda Nascimento de Paula e Silva

Vitória – ES
2014

Fernanda Nascimento de Paula e Silva

**Dinâmica de um canal estuarino fracamente
estratificado**

Vitória – ES
2014

Fernanda Nascimento de Paula e Silva

Dinâmica de um canal estuarino fracamente estratificado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito para a obtenção do título de Mestre em Oceanologia Ambiental.

Orientadora:
Profa. Dra. Valéria da Silva Quaresma

Universidade Federal do Espírito Santo

Vitória – ES
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Silva, Fernanda Nascimento de Paula e, 1988-
S586d Dinâmica de um canal estuarino fracamente estratificado /
Fernanda Nascimento de Paula e Silva. – 2014.
82 f. : il.

Orientador: Valéria da Silva Quaresma.

Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências
Humanas e Naturais.

1. Estuários. 2. Marés. 3. Piraquê-Açú, Rio (ES). 4. Piraquê-
Mirim, Rio (ES). 5. Sistema estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-
Mirim. I. Quaresma, Valéria da Silva. II. Universidade Federal
do Espírito Santo. Centro de Ciências Humanas e Naturais. III.
Título.

CDU: 55

Universidade Federal Do Espírito Santo

Fernanda Nascimento de Paula e Silva

Dinâmica de um canal estuarino fracamente estratificado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Oceanografia Ambiental.

COMISSÃO EXAMINADORA

Profa. Dra. Valéria da Silva Quaresma
ORIENTADORA – UFES/DOC

Prof. Dr. Alex Cardoso Bastos
EXAMINADOR INTERNO – UFES/DOC

Profa. Dra. Susana Beatriz Vinzon
EXAMINADOR EXTERNO – COPPE/UFRJ

*"Ninguém pode voltar atrás e fazer um novo começo, mas
qualquer um pode recomeçar e fazer um novo final."*

Chico Xavier

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus e aos meus eternos companheiros espirituais, sem os quais não estaria aqui hoje. Agradeço à minha família por todo o apoio, tanto financeiro quanto emocional, sendo eles instrumento fundamental para esta minha conquista.

Agradeço a minha orientadora, Valéria, que me proporcionou um recomeço e, principalmente, me mostrou a estrada de tijolos amarelos com o caminho para o meu futuro. Serei eternamente grata a ela.

Agradeço, também, ao professor Renato Ghisolfi, por ter me aceitado no programa e por ter me ensinado mais do que eu jamais poderia realmente explicar. Agradeço a todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental por todo o conhecimento, carinho e respeito que foram dedicados a mim nesses 2 anos.

Agradeço os colegas tanto do LabOGeo quanto do Laboratório Poseidon, que me receberam de braços abertos, compartilharam conquistas, derrotas, dificuldades, congressos, viagens e histórias ao longo desses 2 anos. São pessoas que sempre guardarei com carinho na memória e no coração.

Agradeço ao Dr. Arnaldo Valle-Levinson, por ter me acolhido por 3 meses e me guiado por esse tempo, com todo o cuidado e atenção. Ele foi um guia fundamental para o término dessa dissertação. Assim como agradeço a todos do laboratório dele e ao colega Samuel Valentim, meu escape brasileiro em terras estrangeiras.

Em especial, gostaria de agradecer à família *André Imbroisi*, que me acolheu e me adotou aqui em Vitória. Meus maiores risos, alegrias, tristezas, perigos e conquistas foram acompanhados por eles. Agradeço também a Marie, pela companhia, força e amizade. Aos meus colegas de pós-graduação, Ana, Camila e Bruno, pelas risadas e pelos pastéis!

Agradeço à Petrobrás (PRH29), à FAPES e à UFES pelos auxílios financeiros, tanto a bolsa para a realização do mestrado quanto a outros auxílios, que me proporcionaram toda a estrutura necessária para a realização desse projeto. Além disso, gostaria de agradecer ao CNPq que, através do projeto "*Processos geoquímicos, físicos e sedimentares de um estuário com múltiplos usos do seu entorno*", forneceu os dados utilizados nesse trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer a toda e qualquer pessoa que me ajudou, direta ou indiretamente, ao longo dessa etapa da minha vida. À todos vocês, meu muito obrigada!

Sumário

1. Introdução	15
1.1. Estuários	16
1.1.1. <i>Estratificação estuarina</i>	17
1.1.2. <i>Circulação estuarina</i>	17
1.1.3. <i>Processos de Mistura</i>	20
1.1.4. <i>Maré</i>	21
1.1.5. <i>Transporte de sedimentos</i>	22
1.2. Sistema Estuarino Piraquê-açu Piraquê-mirim (SEPAPM)	23
1.2.1. <i>Características Físico-Químicas</i>	25
1.2.2. <i>Hidrodinâmica</i>	27
1.2.3. <i>Maré</i>	27
1.2.4. <i>Deságue água doce</i>	29
1.2.5. <i>Meteorologia</i>	29
1.3. Importância do estudo	29
2. Objetivos	31
3. Metodologia	32
3.1. Coleta de dados	32
3.2. Processamento dos dados	34
3.3. Análise e descrição dos dados	37
4. Resultados	39
4.1. Parâmetros físico-químicos	40
4.1.1. <i>Salinidade</i>	40
4.1.1.1. Período Seco	40
4.1.1.2. Período Chuvoso	41
4.1.2. <i>Temperatura</i>	43
4.1.2.1. Período Seco	43
4.1.2.2. Período Chuvoso	44
4.1.3. <i>Densidade</i>	45
4.1.3.1. Período Seco	45
4.1.3.2. Período Chuvoso	47
4.2. Maré	48

4.2.1. <i>Período Seco</i>	49
4.2.1.1. Quadratura	49
4.2.1.2. Sizígia	51
4.2.2. <i>Período Chuvoso</i>	52
4.2.2.1. Quadratura	53
4.2.2.2. Sizígia	54
4.3. Fluxo Residual	56
4.3.1. <i>Período Seco</i>	56
4.3.1.1. Quadratura	56
4.3.1.2. Sizígia	58
4.3.2. <i>Período Chuvoso</i>	59
4.3.2.1. Quadratura	59
4.3.2.2. Sizígia	60
5. Discussão	63
5.1. Parâmetros físico-químicos	63
5.2. Maré	66
5.3. Fluxo Residual	67
6. Conclusão	74
Referências Bibliográficas	76

Lista de figuras

- Figura 1** – Localização do Sistema Estuarino Piraquê-açu e Piraquê-mirim (SEPAPM) situado em Aracruz-ES (NEVES, 2010).24
- Figura 2** – Perfil de coleta transversal a desembocadura do SEPAPM (MELADO, 2011).33
- Figura 3** – Perfil esquemático do transecto amostral, com os pontos marcados pelas estrelas indicando o ponto amostral de coleta de água (MELADO, 2011). 34
- Figura 4**– Região transversal a desembocadura do SEPAPM, dividido em três regiões principais: o canal (com profundidade máxima de 13 m), a zona intermediária (profundidades entre 10 e 8 m) e a margem norte (profundidades inferiores a 8 m).37
- Figura 5** – Curva de maré prevista para os dias amostrados.39
- Figura 6** – Perfis de salinidade absoluta em g/kg. (a) T1 para o dia 23 de fevereiro; (b) T1 para o dia 1 de março; (c) T2 para o dia 23 de fevereiro; (d) T2 para o dia 1 de março; (e) T3 para o dia 23 de fevereiro; (f) T3 para o dia 1 de março. A linha preta representa a curva prevista de maré para cada dia. .40
- Figura 7** – Perfis de salinidade absoluta em g/kg. (a) T1 para o dia 20 de julho; (b) T1 para o dia 26 de julho; (c) T2 para o dia 20 de julho; (d) T2 para o dia 26 de março; (e) T3 para o dia 20 de julho; (f) T3 para o dia 26 de julho. A linha preta representa a curva prevista de maré para os respectivos dias amostrados.42
- Figura 8** – Perfis de temperatura. (a) T1 para o dia 23 de fevereiro; (b) T1 para o dia 1 de março; (c) T2 para o dia 23 de fevereiro; (d) T2 para o dia 1 de março; (e) T3 para o dia 23 de fevereiro; (f) T3 para o dia 1 de março. A linha preta representa a curva de maré prevista para os dias amostrados.43
- Figura 9** – Perfis de temperatura. (a) T1 para o dia 20 de julho; (b) T1 para o dia 26 de julho; (c) T2 para o dia 20 de julho; (d) T2 para o dia 26 de julho; (e) T3 para o dia 20 de julho; (f) T3 para o dia 26 de julho. A linha preta representa a curva prevista de maré para os dias amostrados.44
- Figura 10**– Perfis de anomalia da densidade em kg/m³. (a) T1 para o dia 23 de fevereiro; (b) T1 para o dia 1 de março; (c) T2 para o dia 23 de fevereiro;

(d) T2 para o dia 1 de março; (e) T3 para o dia 23 de fevereiro; (f) T3 para o dia 1 de março. A linha preta representa a curva de maré prevista para os períodos amostrados.....	46
Figura 11 – Perfis de anomalia da densidade em kg/m ³ . (a) T1 para o dia 20 de julho; (b) T1 para o dia 26 de julho; (c) T2 para o dia 20 de julho; (d) T2 para o dia 26 de julho; (e) T3 para o dia 20 de julho; (f) T3 para o dia 26 de julho. A linha preta representa a curva prevista de maré para os dias amostrados.....	47
Figura 12 – Comparação entre a amplitude e a velocidade no transecto. (a) Quadratura no período seco; (b) Sizígia no período seco; (c) Quadratura no período chuvoso; (d) Sizígia no período chuvoso.....	48
Figura 13 – (a) Amplitude da Corrente e (b) fase da componente harmônica M2 da maré para o dia 23 de fevereiro de 2010.....	50
Figura 14 – (a) Amplitude da Corrente e (b) fase da componente harmônica M2 da maré para o dia 01 de março de 2010.....	52
Figura 15 – (a) Amplitude da Corrente e (b) fase da componente harmônica M2 da maré para o dia 20 de julho de 2010.	54
Figura 16 – (a) Amplitude da Corrente e (b) fase da componente harmônica M2 da maré para o dia 26 de julho de 2010.	55
Figura 17 – Residual Quadratura Seca (RQS): Fluxo residual para o dia 23 de fevereiro. (a) velocidade longitudinal (oeste-leste); e (b) velocidade transversal (norte-sul).....	57
Figura 18 – Residual Sizígia Seca (RSS): Fluxo residual para o dia 1 de março. (a) velocidade longitudinal (oeste-leste); e (b) velocidade transversal (norte-sul).....	58
Figura 19 – Residual Quadratura Chuvosa (RQC): Fluxo residual para o dia 20 de julho. (a) velocidade longitudinal (oeste-leste); e (b) velocidade transversal (norte-sul).	60
Figura 20 – Residual Sizígia Chuvosa (RSC): Fluxo residual para o dia 26 de julho. (a) velocidade longitudinal (oeste-leste); e (b) velocidade transversal (norte-sul).....	61
Figura 21 – Desenho esquemático do fluxo residual derivado dos resultados teóricos gerados por Li e O'Donnell (2005) e Winant (2008). O parâmetro indica o comprimento de onda (VALLE-LEVINSON et al., 2009)	69

Figura 22 – Vetores do fluxo médio nos três pontos de ADCP realizados em Ponce de Leon Inlet, na Flórida (WATERHOUSE e VALLE-LEVINSON, 2010)....70

Resumo

O objetivo principal desse trabalho é analisar e descrever a estrutura espacial dos fluxos mareais e submareais em um canal estuarino sob diferentes condições hidrológicas e de maré. Os estuários são regiões que possuem grande importância econômica, ambiental e social. Portanto, conhecer os padrões de circulação em um estuário é fundamental, sendo eles responsáveis por controlar os padrões biogeoquímicos do ambiente. A hidrodinâmica estuarina têm sido estudada sob diferentes condições e aspectos oceanográficos, mas regiões como o Sistema Estuarino Piraquê-Açu Piraquê-Mirim (SEPAPM) ainda são pouco conhecidas, sendo importante investigar quais são os elementos dominantes que influenciam suas condições ambientais. A região apresenta sazonalidade hidrológica bem marcada, pouca estratificação vertical, predominância de maré semidiurna e uma batimetria dominada por um canal profundo seguido de uma planície com aproximadamente 50% da profundidade do canal e 5 vezes mais larga. Em vista disso, buscou-se entender a circulação estuarina em uma região transversal ao canal estuarino, analisando o comportamento dos fluxos mareais e submareais, assim como a influência da batimetria, do vento e da vazão fluvial na mesma. Para compreender a hidrodinâmica local, foram analisados: (i) o comportamento espaço-temporal de parâmetros físico-químicos; (ii) o fluxo mareal; e (iii) o fluxo submareal, tanto longitudinal (W-E) quanto transversal (N-S) ao estuário. Utilizou-se dados coletados em 2010 durante as duas estações distintas (seca e chuvosa) e em cada período de maré (quadratura e sizígia). Percebeu-se que essa parte do estuário encontra-se fracamente estratificado, tanto vertical quanto horizontalmente, apresentando como dominante no processo de estratificação o *tidal straining* para todos os períodos amostrados. A amplitude e a fase da componente semidiurna da maré apresentaram um padrão de propagação homogênea ao longo de todo o perfil, mas na presença de altas amplitudes de correntes pode haver cisalhamento horizontal, com as maiores amplitudes de correntes no canal. O fluxo residual apresentou um padrão claro de circulação gravitacional, mesmo sob diferentes condicionantes. Mesmo assim, ao longo dos períodos amostrados, o fluxo submareal foi dominado por fricção no período seco e pela morfologia local no período chuvoso. O fluxo residual encontrado para a sizígia seca foi considerado atípico e ocasionado devido as condições meteorológicas medidas. Por fim, a circulação lateral apresentou maior variação nas diferentes campanhas, tendo padrões opostos nos dois períodos, com um giro anti-horário na seca e horário na chuvosa. O transporte de sedimentos também foi inverso nos dois períodos, ocorrendo importação de sedimentos no período chuvoso e exportação na seca, provavelmente relacionadas a circulação lateral.

Palavras-chave: Dinâmica estuarina; Sistema Estuarino Piraquê-Açu Piraquê-Mirim (SEPAPM); Fluxos mareais e submareais.

Abstract

The aim of this study is to describe spatial structures of tidal and subtidal flows in an estuarine channel under different hydrologic and tidal conditions. Estuaries are regions with major economic, environmental and social importance. Therefore, knowing the patterns of circulation in them is essential, especially because they are responsible for controlling biogeochemical environmental standards. Even though estuarine hydrodynamics have been studied under different oceanographic conditions, regions like estuarine system Piraquê-açu Piraquê-mirim (SEPAPM) are still unknown, making important to investigate which are the dominant factors that influence these environment. SEPAPM has well marked hydrological seasonality, weak vertical stratification, semidiurnal tides and a bathymetry with a deep channel followed by a plateau of approximately 50% of the channel depth and 5 times wider. Therefore, a cross-channel estuarine dynamics were analyzed, seeking to determinate the tidal and subtidal flows as well as the bathymetry, wind and river discharge influence. In the estuary were analyzed: (i) the spatial and temporal structures of temperature, salinity and density, (ii) tidal flow, and (iii) both longitudinal (W-E) and transverse (N-S) subtidal flow. We used data collected in 2010 during two distinct seasons (wet and dry) in each tide period (neap and spring). It was determinate that this part of the estuary is weakly stratified, vertically and horizontally, and the tidal straining process is dominant for the stratification process in all sampling periods. The semidiurnal tidal amplitude and phase had a homogeneously pattern at the profile, although in the presence of high amplitude current it may occur horizontal shearing with the greatest amplitudes in the channel. The residual flow showed a clear pattern of gravitational circulation, even under different conditions. Nevertheless, over the sampling periods, the residual flow was dominated by friction in the dry season and the topography in the rainy season. The residual flux founded for spring dry was considered atypical and caused due to weather conditions. Finally, the lateral flow showed greater variation in different seasons, with opposite patterns, a counterclockwise gyre in the dry and a clockwise gyre in the wet. The sediment transport was also inverse in both seasons, occurring import of sediment during the dry season and export during the wet season, probably related to lateral flow.

Keywords: estuarine dynamics; Estuarine System Piraquê-açu Piraquê-mirim (SEPAPM); tidal and subtidal flow.

1. Introdução

Saber os padrões de circulação estuarina é importante para compreendermos os processos físicos, químicos, biológicos e sedimentológicos desses sistemas, principalmente considerando a sua importância econômica, ambiental e social. De modo geral, a hidrodinâmica estuarina, considerando diferentes aspectos oceanográficos, é bem conhecida para mas para algumas regiões, como o Sistema Estuarino Piraquê-Açu Piraquê-Mirim (SEPAPM), suas características foram pouco exploradas, sendo importante investigar quais são os elementos dominantes que influenciam suas condições ambientais.

O SEPAPM é peculiar, apresentando características físico-químicas distintas ao longo de todo o sistema. Ele está localizado numa região que possui variação sazonal bem marcada, com um período chuvoso e outro seco, com maré semidiurna e ventos predominantes de nordeste. A seção inferior, próximo à desembocadura, apresenta uma coluna d'água com pouca estratificação vertical e uma batimetria dominada por um canal profundo seguido por uma porção mais rasa, com aproximadamente 50% da profundidade do canal e 5 vezes mais larga (BARROSO, 2004; MELADO, 2010; SILVA *et al.*, 2013).

Em vista disso, pretende-se entender a circulação estuarina em uma região transversal ao canal estuarino, buscando analisar o comportamento dos fluxos mareais e submareais e a influência da batimetria, do vento e da vazão fluvial na mesma. Para tal, é necessário conhecer bem os padrões estuarinos de circulação, assim como as características geofísicas do sistema pesquisado. Portanto, pretende-se expor, a seguir, as características ambientais da área de estudo e a forma como será tratada a circulação estuarina.

1.1. Estuários

A definição mais conhecida de um estuário é a sugerida por Cameron e Pritchard (1963), que considera um estuário como sendo um corpo d'água costeiro semifechado, com 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. Esta definição permite uma compreensão bem ampla das características únicas do meio estuarino. A definição do ambiente estuarino, entretanto, varia de acordo com a finalidade do trabalho de cada autor, sendo possível encontrar outras definições na literatura da área, com focos diferentes. Ora a definição abrange tanto a dinâmica estuarina, como a de Kjerfve (1987), que considera completamente o efeito da maré; ora abrange a formação geológica/sedimentar dos ambientes, como na definição de Dalrymple *et al.* (1992).

Adotando a definição de Cameron e Pritchard (1963), percebe-se que a hidrodinâmica é parte essencial do ecossistema estuarino. A circulação da água e os processos de mistura condicionam a distribuição e o transporte de parâmetros ambientais no sistema, como nutrientes, poluentes, salinidade e sedimentos. É importante lembrar que esse processo está relacionado a eventos meteorológicos (chuvas, ventos), oceanográficos (ondas, marés) e geoquímicos (tipo de sedimento) (DYER, 1997).

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. Embora a descarga fluvial seja um dos principais controladores da dinâmica estuarina, os ventos e a maré são as maiores fontes de energia para a realização dos processos de mistura e de circulação em um estuário (STIGEBRANDT, 1988), sendo que o primeiro atua principalmente na interface ar-água, criando camadas bem misturadas, turbulentas e correntes superficiais, enquanto o segundo atua fundamentalmente na região interna da coluna de água.

Além disso, os parâmetros físico-químicos, a circulação na região marinha adjacente e a influência do efeito de Coriolis também não podem ser negligenciados (MIRANDA *et al.*, 2002). Essas são forças importantes na hidrodinâmica estuarina e a interação de todos esses fatores é que gera, em cada ambiente

estuarino, um padrão de circulação único. Em vista da imensa quantidade de processos que influenciam a hidrodinâmica estuarina, pretende-se explicar resumidamente algumas dessas influências.

1.1.1. *Estratificação estuarina*

Mesmo apresentando os mais diversos tipos, formatos, contornos, batimetrias e morfologias, os estuários de modo geral são característicos por possuírem um gradiente longitudinal (horizontal) de salinidade. Esse gradiente pode ser tanto positivo (quando diminui do oceano em direção à cabeceira do estuário) ou negativo (o que é mais raro, mas pode ocorrer devido ao excesso de evaporação). Ele é uma variável chave que diferencia os estuários de outros ambientes lagunares e marinhos, sendo uma das forças principais que controlam a circulação estuarina que, por sua vez, controla a estratificação salina (VALLE-LEVINSON, 2010).

A distribuição vertical de salinidade (estratificação) varia consideravelmente de um estuário para outro, sendo ela uma das formas de se classificar os estuários. O ambiente, então, pode ser classificado como *estratificado (cunha salina)*, *parcialmente estratificado* ou *totalmente misturado*. Ressalva-se que um mesmo estuário pode apresentar mais de uma estratificação simultaneamente, como por exemplo, um estuário bem misturado pode se tornar parcialmente estratificado ou de cunha salina, dependendo da variação das componentes meteo-oceanográficas as quais o ambiente está sujeito (MIRANDA *et al.*, 2002).

Estudar a estratificação estuarina é sumariamente importante devido a inibição casada na mistura vertical, o que afeta a dinâmica ambiental e pode levar à hipoxia em águas abaixo da pycnoclina. Assimetrias na mistura também estão associadas com estratificações periódicas da densidade, que podem produzir um fluxo residual cisalhado verticalmente (STACEY *et al.*, 2008; BURCHARD *et al.*, 2011; CHENG *et al.*, 2011). A estratificação também tem um importante papel no balanço do sal, que é um balanço entre a advecção salina pela circulação estuarina e a mistura vertical.

1.1.2. *Circulação estuarina*

Geralmente a dinâmica estuarina apresenta duas feições características: um fluxo fluvial em direção ao oceano na superfície junto com um fluxo em direção à

cabeceira do estuário, próximo ao fundo, e um volume de troca entre o estuário e o oceano geralmente superior ao fluxo fluvial. A primeira característica, ou seja, os fluxos bem marcados (superficialmente em direção ao oceano e no fundo em direção à cabeceira), está associada a uma forte estratificação que impede o transporte de partículas, larvas e nutrientes, aumentando assim a produtividade biológica e também os problemas de qualidade de água (MACCREADY e GEYER, 2009). Já a segunda característica é o *fluxo de troca*, responsável pelo balanço e controle na troca entre a água fluvial e a água oceânica.

O tipo de circulação é outra característica utilizada para caracterizações de estuários. O ambiente pode ser classificado em função da predominância da ação de rios, ondas e marés. A classificação proposta por Hansen e Rattray (1966) é uma das classificações mundialmente mais aceitas e se utiliza da hidrodinâmica estuarina, tendo como base dois parâmetros adimensionais hidrodinâmicos: (a) o parâmetro da circulação e (b) o parâmetro de estratificação. O primeiro é a relação entre a velocidade do fluxo próximo à superfície e o fluxo médio em uma seção vertical. O fluxo próximo à superfície geralmente está relacionado à descarga fluvial e o fluxo médio é tipicamente muito pequeno, tendendo a zero em estuários com alta troca de águas, pois haverá tanto fluxo do oceano para o estuário quanto o contrário. Ao relacionar esses dois fluxos, ou seja, a magnitude do deságue fluvial e do fluxo de troca estuário-oceano, é possível estabelecer uma classificação para o sistema, como por exemplo: em estuários com baixo influxo, (i. e. estuários bem misturados ou de cunha salinas), o fluxo oceano-estuário será similar em magnitude ao fluxo superficial, gerando um parâmetro de circulação maior do que 10 e indicando que há uma alta circulação gravitacional. De modo geral, quanto maior o parâmetro de circulação, mais forte será a circulação gravitacional (VALLE-LEVINSON, 2010).

O segundo parâmetro adimensional, o da estratificação, é a relação entre a diferença de salinidade entre superfície e fundo com a média da salinidade em uma seção transversal do estuário. Assim, quanto menor for a estratificação na coluna d'água, menor será o parâmetro de estratificação.

É necessário, no entanto, destacar que tentar enquadrar um estuário ou bacia costeira em qualquer tipo de classificação é arriscado. A maioria dos estuários apresentam diferentes características de diferentes categorias ao longo do ano, dependendo da variação das fases da maré (enchente e vazante, sizígia e quadratura), das condições fluviais (estações de seca ou chuva) e das forçantes

atmosféricas (resfriamento ou aquecimento do ar e direções e velocidades de ventos). Dependendo da fase de cada forçante, um estuário pode se encontrar estratificado em uma época do ano e bem-misturado em outro, apresentando padrões de circulação diferentes ou o mesmo, independente da estratificação ambiental. Portanto, classificar estuários é algo que se deve fazer com muito cuidado.

A circulação estuarina pode ser gerada a partir de gradientes de densidade longitudinais, advecção não-linear gerada pela maré (*cisalhamento pela maré*), assimetrias da maré na mistura e deságue fluvial (e.g. BURCHARD e HETLAND, 2010; CHENG *et al.*, 2010). Quando o movimento é não linear, o *momentum* é dominado pelo gradiente de pressão, fricção e aceleração advectivas. À medida que as acelerações advectivas se tornam proeminentes, os campos geram duas camadas verticalmente cisalhadas de fluxo residual (LERCZAK e GEYER, 2004). Para se classificar ou analisar a circulação residual estuarina (submareal), é necessário o conhecimento de quatro fluxos básicos: (1) o fluxo gerado pelo gradiente de densidade; (2) o fluxo gerado pela retificação da maré; (3) o fluxo gerado pelo rio; e (4) o fluxo induzido pela mistura assimétrica da maré (CHENG *et al.*, 2011).

Vários estudos sobre o fluxo de troca e o fluxo residual em estuários que se focaram no efeito após a escala temporal da maré sugerem que as correntes residuais são resultados principalmente do gradiente baroclínico longitudinal de pressão (PRITCHARD, 1956; HANSEN e RATTRAY, 1965; CHATWIN, 1976; MACCREADY, 2004), mesmo quando o estuário é pouco estratificado a bem misturado.

Portanto, podemos considerar que na maioria dos estuários, a circulação predominante é a circulação gravitacional, que é tipicamente um resultado do balanço de *momentum* entre o gradiente de pressão barotrópico, o gradiente baroclínico e a fricção (PRITCHARD, 1956). Pode-se considerar como circulação gravitacional a soma dos fluxos gerados pelo gradiente de densidade e pelo rio. O balanço dominante nas equações de *momentum* e continuidade do fluxo de sal foi primeiramente analisado exhaustivamente em um trio de trabalhos por Pritchard (1952, 1954, 1956). Trabalhando com campos de salinidade e velocidade medidos no *James River*, um estuário tributário de *Chesapeake Bay*, o autor descobriu um balanço essencial ainda usado atualmente. Fisicamente, o gradiente de pressão

devido a salinidade, força a água próxima ao fundo para dentro do estuário e a conservação de massa gera um desnível do mar na cabeceira do sistema, forçando águas superficiais a sair, aumentando a velocidade do fluxo superficial. Os *cisalhamentos* turbulentos com o fundo e interno geram o balanço para essas equações e geram um estado estacionário: o fluxo de troca (MACCREADY e GEYER, 2010). Já o cisalhamento vertical age principalmente retardando o fluxo de entrada no estuário nas camadas de baixo, equilibrando a equação ao se balancear com o crescimento do gradiente de pressão devido à diferença de salinidade.

É importante ressaltar, também, que a observação direta da circulação gravitacional na natureza pode não ser possível, devido a maré instantânea que geralmente mascara a circulação residual. É necessária uma medição periódica por um ou mais ciclos de maré para poder retirar o efeito da maré e percebermos a circulação gravitacional residual.

Em estuários fracamente estratificados ou verticalmente homogêneos, a circulação gravitacional pode ser cisalhada tanto verticalmente (PRITCHARD, 1956) quanto horizontalmente (WONG, 1994; FRIEDRICHS e HAMRICK, 1996; VALLE-LEVINSON, 2008), dependendo da geometria da bacia.

1.1.3. *Processos de Mistura*

O processo de mistura nos estuários é ocasionado sobretudo por turbulências geradas no fundo e na haloclina. A turbulência que ocorre na haloclina pode ser chamada de mistura interna e é tipicamente separada em três categorias diferentes: *entrainment*, turbulência difusiva e ondas internas. O tipo de mistura interna gerada depende tanto da velocidade quanto da densidade das camadas na haloclina. Os três processos são extremamente importantes, sendo responsáveis por transportar sal das camadas inferiores para as camadas superiores. Devido às características de cada processo, é comum observarmos o *entrainment* em estuários altamente estratificados (cunha salina) como a fonte dominante da mistura interna, enquanto em estuários parcialmente estratificados o fator principal é a turbulência difusiva (RICHARDS, 2004).

As ondas internas geradas no limite entre duas camadas é um outro fator importante na mistura interna. Essas ondas geralmente são formadas devido à batimetria irregular e à aceleração em fluxos estratificados e acabam por advectar o

fluxo em direção a desembocadura. É o tipo de mistura interna mais comum durante as vazantes devido ao aumento de profundidade que ocorre na desembocadura durante a enchente (RICHARDS, 2004).

Além dessa turbulência interna, temos a turbulência gerada pelo atrito com o fundo. O atrito com o fundo pode gerar turbulência ao cisalhar a velocidade próxima ao fundo (que diminui à medida que se aproxima do fundo). A energia, então, da turbulência de fundo vem da energia cinética dissipada pela água quando essa passa por uma batimetria irregular. Experimentos, como os realizados por Dyer (1997), mostram que o *cisalhamento* do fundo é proporcional ao quadrado da velocidade no fundo, que está relacionado ao quão irregular o fundo é.

Na maioria dos estuários a mistura é um resultado combinado das duas turbulências, como dito anteriormente. A contribuição de cada processo pode variar tanto no espaço quanto no tempo em um mesmo estuário, sendo que a mistura turbulenta é mais efetiva quando a camada de fundo e a camada de mistura interna se sobrepõem, produzindo um gradiente suave na camada de fundo. Em estuários bem misturados, a mistura tende a ser dominada principalmente pela turbulência com o fundo, enquanto que em estuários altamente estratificados a mistura interna é predominante (RICHARDS, 2004; DYER, 1997).

1.1.4. Maré

Juntamente com os processos de mistura e a circulação estuarina, a maré é uma das forçantes principais nesse ambiente e que ajuda a torna-lo único. Quando se discute marés em estuários é necessário perceber que a forma de uma curva de maré dentro do estuário depende significativamente tanto da topografia (pelo efeito que esta tem na fricção) quanto da estratificação e do fluxo fluvial (e. g. em estuários bem misturados a onda de maré geralmente se propaga como uma onda em águas rasas) (VALLE-LEVINSON, 2010).

Se não houvesse fricção no estuário, a onda de maré iria refletir ao atingir a cabeceira do ambiente e retornar para a desembocadura, encontrando aí a “próxima” onda de maré que entraria no estuário. A onda de maré, então, se comportaria como uma onda estacionária, tendo sua maior amplitude nas margens do ambiente (principalmente desembocadura e cabeceira). Ondas estacionárias em estuários podem ocorrer, sejam totalmente dentro do ambiente (quando a distância

do estuário é $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda) ou com seus nós fora do estuário, mas um comportamento de onda estacionária dentro do mesmo. Quando ondas se comportam assim no ambiente, a amplitude da maré e as correntes de maré estão fora de fase em 90° (RICHARDS, 2004).

Já quando temos fricção presente, ocorre uma dissipação da energia da maré antes de ela ser refletida e, portanto, a onda se torna progressiva. Nesse caso, tanto a amplitude quanto as correntes da maré iriam diminuir em direção à cabeceira do estuário e estariam completamente em fase. Em estuários reais, no entanto, há geralmente uma mistura desses dois tipos de ondas, sendo necessário analisar o comportamento da onda de maré em cada estuário para poder classificar o real efeito da mesma no ambiente (RICHARDS, 2004).

Além de alterar o tipo de onda, a batimetria e morfologia do ambiente podem alterar como a maré se propaga tanto durante a fase de enchente quanto de vazante. Se a morfologia proporcionar uma situação em que a crista ou a cava da onda se propague mais rapidamente, isso pode gerar uma assimetria na maré, gerando uma enchente mais curta e uma vazante mais longa comparativamente. Isso pode determinar se o ambiente será dominado por enchente (velocidade mais rápida durante essa fase) ou vazante. Dois parâmetros foram desenvolvidos por Friedrichs e Aubrey (1988) para determinar a dominância de cada ambiente e se baseiam na relação entre a amplitude da onda (geralmente da harmônica M2) em relação à profundidade média e a relação entre o volume de água nos canais e nas estofas de maré.

Essas duas formas de assimetria na maré são conhecidas como assimetria mareal barotrópica por estarem principalmente relacionadas a efeitos de águas rasas em um sistema com uma única camada. No entanto, Jay *et al.* (1996) mostraram que em sistemas de duas camadas é possível ter assimetrias de maré internas, que acabam por modificar o fluxo básico estuarino. Os autores *op cit* propuseram, inclusive, que a assimetria interna de maré era a força dominante do fluxo residual em vários estuários, em vez da circulação gravitacional. A assimetria mareal interna já foi observada em diferentes sistemas estuarinos, incluindo o estuário do rio *Columbia* (JAY, 1996) e o estuário do rio *Hudson* (GEYER, 2000).

1.1.5. Transporte de sedimentos

A hidrodinâmica estuarina e os processos de transporte são importantes não somente por ocasionar modificações espaciais dos componentes estuarinos, mas também por poderem expor uma gama de variações ambientes, cada uma associada a taxas de transformações ambientais distintas (VALLE-LEVINSON, 2010). Nesse contexto, é sempre importante lembrar o processo de transporte de sedimentos, que é essencial para a evolução e manutenção de um estuário.

O suprimento médio de sedimento do continente ou costa de origem e a direção e magnitude do transporte do sedimento é um processo extremamente importante no estuário. O padrão desses dois processos (suprimento e transporte) depende de vários fatores, como (a) o deságue fluvial, que está relacionado tanto ao *input* de sedimentos quanto à estrutura do fluxo; (b) as características do sedimento (que em geral encontra-se em suspensão com diferentes tamanhos, sendo mais comum sedimentos coesivos e finos); (c) ondas, tanto geradas por ventos quanto por marés; (d) e a velocidade da corrente (DRONKERS, 1986).

O transporte de sedimento gerado puramente por ondas é relativamente menos importante nos estuários do que na plataforma continental. No entanto, a influência dessas ondas, principalmente em áreas de planícies de maré, na ressuspensão de sedimentos é um fenômeno significativo, sendo que se combinado com um transporte mareal pode causar um fluxo importante de sedimento, alterando a estrutura estuarina (ANDERSON, 1972; McDOWELL e O'CONNOR, 1977; QUARESMA, *et al.* 2007).

Ao considerar a velocidade das correntes, o mais importante é a alteração dela durante o ciclo de maré. Uma alteração entre a maré de enchente e vazante, que pode ocorrer por diferenças no gradiente de pressão, na morfologia do estuário, da batimetria, de áreas alagáveis ou não, geralmente é responsável por fluxos residuais de sedimentos no ambiente, sendo importante então determinar quando ocorre ou não diferenças na maré ao longo de um estuário (POSTMA, 1967; FESTA e HANSEN, 1978; ODD e OWEN, 1972; ALLEN *et al.*, 1977; ARIATHURAI *et al.*, 1977; DYER, 1997).

1.2. Sistema Estuarino Piraquê-açu Piraquê-mirim (SEPAPM)

O Sistema Estuarino Piraquê-açu Piraquê-mirim (SEPAPM) está localizado no distrito de Santa Cruz, pertencente ao município de Aracruz. Ele possui uma área total de lâmina d'água em torno de 5,1 km² e é margeado pela maior área de manguezal do Estado, de aproximadamente 12,34 km² (BARROSO, 2004). Os principais efluentes desse sistema são os rios Piraquê-açu, com uma área de drenagem de aproximadamente 378 km², e Piraquê-mirim, que tem uma área de drenagem bem menor, de apenas 69km² (SEAMA, 1998).

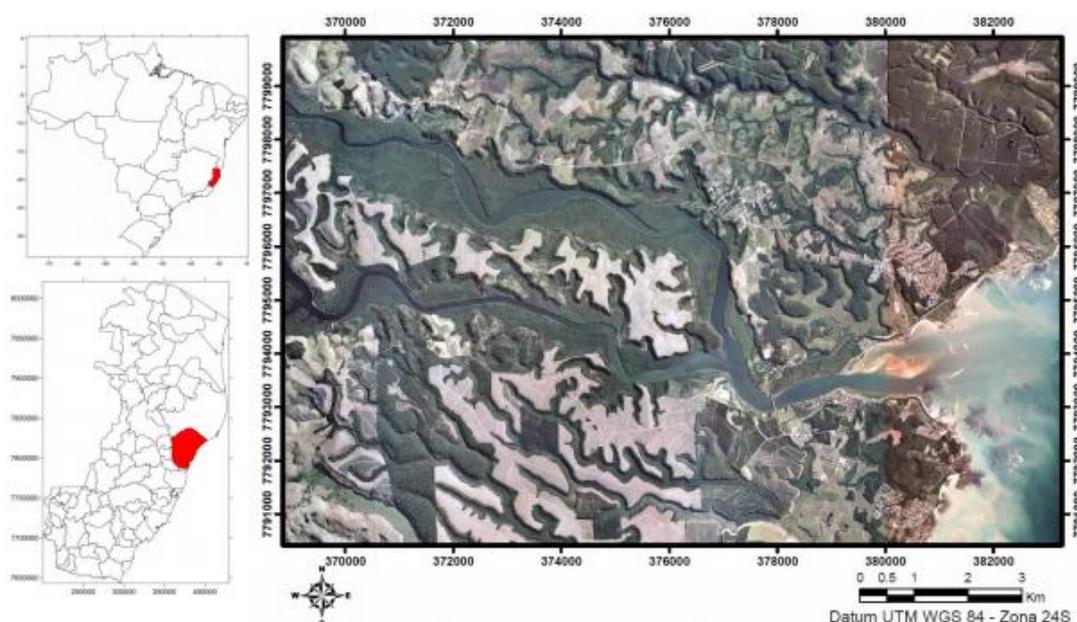


Figura 1 – Localização do Sistema Estuarino Piraquê-açu e Piraquê-mirim (SEPAPM) situado em Aracruz-ES (NEVES, 2010).

O SEPAPM (Figura 1) possui a forma funil (como um “Y”) e padrão de canais sinuosos, com orientação dos rios Piraquê-açu (braço norte) e Piraquê-mirim (braço sul) alinhados em direção ao continente no sentido NO e SO, respectivamente, e a região de confluência dos dois rios até a desembocadura (seção inferior) alinhada em direção ao mar no sentido O–L. As características geométricas das três regiões do SEPAPM (braço norte, braço sul e seção inferior) estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1– Características geométricas das regiões do SEPAPM (LEITE, 2012).

	Largura Máxima (m)	Largura Mínima (m)	Distância (meio canal) (km)	Orientação canal
Braço norte (PA)	450	20	6,1	NO

Braço sul (PM)	406	8,5	6,9	SO
Seção Inferior	550	-	3,2	O-L

O clima da região é tropical litorâneo do tipo úmido-seco, associado a variações sazonais de temperatura e umidade, sendo caracterizado por apresentar inverno seco (julho a setembro) e verão chuvoso (CALIMAN *et al.*, 1997).

A batimetria e geomorfologia são distintas ao longo do sistema estuarino, resultantes da interação entre os diferentes aportes de água doce e da maré, apresentando planícies de maré rasas e também canais sinuosos (SILVA *et al.*, 2013). A profundidade varia em todo o sistema, sendo que a maior profundidade (16,7 m) é encontrada no canal central da seção inferior, diminuindo na desembocadura (máximo de 8 m) e sendo ainda menor nos braços norte e sul, que possuem profundidades médias de 4,3 e 5 m, respectivamente (SILVA *et al.*, 2013).

Devido a sua importância socioeconômica, em 2010 o CNPq financiou o projeto “*Processos geoquímicos, físicos e sedimentares de um estuário com múltiplos usos do seu entorno*”, em que foram feitas coletas em períodos e pontos diferentes, ao longo de todo o SEPAPM, a fim de melhor compreender a dinâmica do estuário. Esse foi um dos principais trabalhos realizados no sistema, sendo o de maior abundância científica. A partir dos dados obtidos nesse projeto, Neves (2010) avaliou a hidrodinâmica e o transporte de sedimento em suspensão nos dois braços do sistema (Piraquê-açu e Piraquê-mirim), Melado (2011) estudou a hidrodinâmica e o transporte de sedimento em suspensão ao longo da desembocadura, Oliveira (2010) analisou a circulação hidrodinâmica utilizando o modelo numérico e computacional *Regional Ocean Modeling System* (ROMS) e Silva *et al.* (2013) que através das características sedimentares do ambiente propôs sua setorização, determinando as regiões de influência marinha, fluvial e estuarina.

O trabalho realizado por Melado (2011), embora muito semelhante ao apresentado nessa dissertação, foi um trabalho descritivo, não tendo sido aprofundado no cálculo ou processamento hidrodinâmico dos dados obtidos. As análises e cálculos como o número de Richardson serviram como referência para esse trabalho, mas buscou-se incrementar o conhecimento já obtido através de uma análise física mais profunda dos fluxos observados.

1.2.1. Características Físico-Químicas

As três regiões do SEPAPM apresentam grandes diferenças em relação aos parâmetros físico-químicos, devido à diferença na hidrodinâmica de cada região. Segundo Barroso (2004), em escala horizontal, a porção superior do braço norte é dita mesohalina, a seção inferior do SEPAPM tem predominância de condições euhalinas e a porção inferior do braço norte e o braço sul como um todo tendem a ser um ambiente polihalino. A condição mesohalina encontrada na porção superior do Rio Piraquê-açu resulta da maior influência da descarga de água doce, enquanto o Piraquê-Mirim e a seção inferior são mais influenciados por águas marinhas (BARROSO, 2004).

Em escala vertical, Barroso (2004) classificou o Piraquê-açu 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 (seção inferior) como um estuário do tipo parcialmente estratificado, com a presença de uma fraca haloclina. Os dados encontrados por Neves (2010) e Melado (2011), nas amostragens nas três regiões do SEPAPM durante quatro campanhas no ano de 2010, corroboram a classificação apresentada por Barroso (2004).

Segundo Neves (2010), o braço norte caracteriza-se com uma picnoclina bem definida entre o primeiro e o segundo metro de profundidade para os períodos de quadratura, sendo que a picnoclina está mais pronunciada no período chuvoso, mas apresenta-se totalmente misturado durante os períodos de sizígia, apresentando uma fraca estratificação apenas durante os períodos de baixa-mar. O valor mínimo de salinidade encontrado nas amostragens, segundo Neves (2010), foi de 12,9 e o máximo de 33,7. O braço sul não apresentou estratificação evidente em nenhuma campanha amostral, tendo os valores mínimos e máximos de salinidade entre 28,4 e 35,9, respectivamente. Já Melado (2011) concluiu que a seção inferior do SEPAPM apresenta-se pouco misturada durante a quadratura, com salinidades de 27 na superfície e 35 no fundo, e durante os períodos de sizígia a condição de mistura foi predominante.

Assim como para a salinidade, a temperatura varia muito em relação à estratificação ao longo do SEPAPM. O braço norte apresenta uma termoclina pouco pronunciada, geralmente entre 2 e 4 m, com a temperatura superficial maior do que do fundo (NEVES, 2010). Já o braço sul e a seção inferior não possuem uma

termoclina definida, com poucas variações de temperatura tanto temporal quanto vertical (NEVES, 2010; MELADO, 2011).

A temperatura média anual no SEPAPM varia de 22 e 24° C, com mínimas de 15°C durante as frentes frias e nas regiões mais elevadas e máximas entre 28 e 30° C em altitudes baixas, sendo que a média mensal de temperatura mínima e máxima é 14,9 e 32,4° C, respectivamente (FEITOZA, 1997, 2000). Tanto o Piraquê-açu quanto o Piraquê-mirim caracterizaram-se por águas mais quentes, enquanto que da confluência até a foz a água tende a ser ligeiramente mais fria.

1.2.2. Hidrodinâmica

O SEPAPM caracteriza-se por um regime de micromaré, sendo que estudos prévios revelam que a maior parte do sistema tem suas características físico-químicas controladas pela maré na região. Neves (2010), estudando a circulação nos braços do SEPAPM, concluiu que há um domínio da difusão turbulenta sobre a circulação gravitacional (advecção) nos dois braços. Além disso, o autor percebeu que os fluxos resultantes de sal e de Material Particulado em Suspensão (MPS) tenderam a ser direcionados para dentro do sistema estuarino nos dois braços devido à grande influência da maré.

Melado (2011), que estudou a hidrodinâmica na seção inferior do SEPAPM, também identificou a tendência da difusão turbulenta dominar sobre a circulação gravitacional nos processos de circulação e estratificação. Além disso, a autora identificou que a concentração de MPS foi condicionada principalmente pela intensidade das correntes de maré.

No entanto, é importante ressaltar que, mesmo em estuários dominados por marés, outros fatores como o deságue de água doce e o vento local podem alterar a circulação estuarina, principalmente considerando que o SEPAPM é uma região com baixa profundidade. Em vista disso, é necessário analisar todos os aspectos hidrodinâmicos a que o sistema estuarino está sujeito para melhor compreender a circulação na região.

1.2.3. Maré

A análise de tábuas de marés (DHN, 2010) permite enquadrar a costa capixaba dentro de um regime de micromaré do tipo semidiurna, sendo a semidiurna lunar (M2) a componente harmônica principal. As amplitudes máximas são de 1,8m e ocorrem nos Equinócios de outono (março) e de primavera (setembro).

Os maiores valores de velocidade de corrente nos braços norte e sul (~0,8 m/s) são encontrados durante a maré baixa, sendo que na maré alta a corrente chega a 0,6 m/s (NEVES, 2010). A velocidade máxima da corrente no PA e no PM é de 0,7 e 0,8 m/s, respectivamente. Já na seção inferior, as maiores velocidades ocorrem durante a maré vazante, sendo que a velocidade máxima da corrente ultrapassou 1 m/s (MELADO, 2011).

Os dois braços apresentaram, segundo Neves (2010), um domínio de maré vazante, principalmente nas marés de sizígia, sendo verificada uma forte assimetria da maré. Na desembocadura as correntes apresentaram dois sentidos predominantes, o noroeste e o sudoeste, relativos aos períodos de enchente e vazante, respectivamente, sendo que o canal de acesso ao SEPAPM apresentou um domínio da maré vazante (BONI, 2010).

Oliveira (2012) estudou a influência da geometria nas correntes de maré no SEPAPM. Mesmo simplificado, o estudo constatou que a maré no estuário é uma mistura de ondas progressivas e estacionárias, sendo que no braço sul a entrada da onda de maré é mais rápida que no braço norte. Além disso, a autora observou que a seção inferior e o braço norte comportam-se como estuários hiperssíncronos (efeito da convergência maior que de fricção, resultando na amplificação da amplitude e das correntes de maré em direção ao interior do estuário), enquanto o braço sul tem um comportamento hipossíncrono (efeito da convergência menor que o da fricção, portanto a amplitude e as correntes de maré diminuem em direção ao interior do estuário) (NICHOLS e BIGGS, 1985).

No entanto, o trabalho de Oliveira (2012) encontrou uma dominância de enchente ao longo de todo o SEPAPM, sendo que os trabalhos com dados *in situ* de Neves (2010), Boni (2010) e Melado (2011) mostraram a dominância da vazante ao longo de todo o sistema. Provavelmente, a dominância de vazante está relacionada às variações na largura do estuário em virtude da presença de planícies de maré (FRIEDRICHS, 2010), sendo que estas variações não foram consideradas no trabalho de Oliveira (2012).

1.2.4. Deságue água doce

A partir da análise de dados pluviométricos de um período de 30 anos (1971-2000), Nóbrega *et al.* (2008) dividiram a precipitação média do estado do Espírito Santo, ao sul do rio Doce, em dois períodos distintos: outubro a março (período chuvoso) e abril a setembro (período seco). Em média, o mês mais chuvoso no município de Aracruz é dezembro (200-250 mm), enquanto os meses mais secos são junho e agosto (25-50 mm). A vazão média anual é de 14,5 m³/s em toda a bacia hidrográfica dos rios PA e PM (BARROSO *et al.*, 2012). No estudo de Leite (2012), a vazão fluvial média anual nas duas sub-bacias do SEPAPM foi de 16,28 m³/s, sendo que a sub-bacia PA apresentou vazão de 13,69 m³/s (84,09%) e a sub-bacia PM de 2,59 m³/s (15,91%).

1.2.5. Meteorologia

Na região do SEPAPM, os ventos predominantes são do quadrante NE e os de maior intensidade provém dos quadrantes SO (ALBINO, 1999, 2001; CAMPOS, 2011). Isso se deve a origem principal dos ventos. Considerando que na costa do Espírito Santo o regime de ventos apresenta variabilidade sazonal com o sistema de alta pressão do Atlântico Sul, há um predomínio de ventos de NE, principalmente no verão, mas por estar associado aos ventos alísios, o vento NE ocorre quase todo ano. No entanto, durante o inverno, associados às frentes frias, é comum a incidência de ventos de SO que podem ser mais intensos, dependendo da frente associada ao vento (CAMPOS, 2011).

1.3. Importância do estudo

É possível perceber, pelo o que foi apresentado, que mesmo que as condições físicas oceanográficas variem bastante de um sistema para o outro, ao examinar alguns dos princípios físicos é possível ter noções gerais de circulação estuarina que podem descrever um número grande de sistemas reais. É necessário, no entanto, ter o conhecimento dos principais fatores físicos que regem cada ambiente para

conhecer o padrão ao qual ele se enquadra. Este é o problema clássico com dinâmica estuarina e é interessante notar que mesmo os estuários sendo um dos primeiros ambientes estudados no início da oceanografia física, até hoje existem várias particularidades desconhecidas desses sistemas. A ciência estuarina provavelmente continuará a mudar e adaptar-se ao longo dos anos, um resultado da sua importância para a vida dos humanos como zona de transição entre a nossa casa e o vasto oceano, de que dependemos tanto (RICHARDS, 2004).

A escolha do SEPAPM ocorreu, principalmente porque, apesar da degradação e exploração, o ambiente possui um bom estado de conservação das águas e do sedimento, atestado por Jesus *et al.* (2009). Esse aspecto natural pôde ser preservado pela falta de histórico com dragagens e obras de engenharia acentuadas. Exatamente por possuir características naturais, é importante conhecer todos os aspectos do sistema. Como a área tem sido visada para obras de engenharia e portuárias, estudos sobre a hidrodinâmica local e o efeito dessas obras e dragagens passam a ser extremamente importante para preservar o máximo o sistema estuarino.

Esta dissertação busca entender parte da ciência estuarina e está dividida da seguinte maneira: (i) introdução, que apresentou os principais aspectos do que se pretende estudar e apresentar nesse trabalho; (ii) os objetivos; (iii) a metodologia empregada, apresentando desde o campo com as coletas feitas até o processamento dos dados em laboratório; (iv) os resultados, com uma explicação qualitativa dos mesmos; (v) discussão, em que pretendemos abordar e demonstrar os processos que ocorrem durante o ciclo mareal, assim como o comportamento da maré, do fluxo residual e das principais forçantes; e (vi) a conclusão.

2. Objetivos

O objetivo principal desse trabalho é analisar a estrutura e a variabilidade dos fluxos mareais e submareais em um canal estuarino sob diferentes condições hidrológicas e de maré.

Para tal, pretende-se atingir os seguintes objetivos específicos:

- (i) Caracterizar os fluxos mareais e submareais no canal;
- (ii) Analisar os principais fatores que influenciam a circulação no canal.

3. Metodologia

Para a análise da circulação estuarina, foram utilizados dados coletados em 2010, obtidos a partir do projeto *Processos geoquímicos, físicos e sedimentares de um estuário com múltiplos usos do seu entorno*, financiado pela CNPq, realizado no Sistema Estuarino Piraquê-açu e Piraquê-mirim. A interpretação e análise dos resultados foram feitas com base em modelos teóricos e analíticos presentes na literatura.

3.1. Coleta de dados

As coletas de dados foram realizadas em dois períodos sazonais diferentes e para duas fases de marés diferentes em cada período, sendo realizado ao todo 4 campanhas: sizígia e quadratura, 03 de março e 23 de fevereiro, respectivamente, (período chuvoso – fevereiro e março) e sizígia e quadratura, 26 e 20 de julho, respectivamente, (período seco – julho) do ano de 2010. Assim, foi possível analisar a hidrodinâmica do SEPAPM sob diferentes condições mareais, pluviométricas e atmosféricas. Os mesmos procedimentos para as coletas de dados de velocidade e dos parâmetros físico-químicos foram feitos em todos os períodos amostrados.

Para análise das correntes, foi realizado um transecto transversal ao canal (Figura 2) com ADP 3D *River Survey* a cada meia hora medindo a velocidade da coluna d'água durante um período aproximado de 13 horas, considerando que o estuário é influenciado principalmente pela componente semidiurna (ciclo de 12,46 horas) da maré. Uma média de 26 perfis foram obtidos em cada campanha. O ADP utilizado, do fabricante *Sontek*, é especificamente projetado para medir deságue fluvial, correntes tridimensionais, profundidades e batimetria tanto em uma estação

móvel quanto fixa, sendo um sensor acústico de multifrequência, capaz de medir perfis contínuos de correntes ao longo da coluna de água até uma profundidade média de 30 m. Por ser um aparelho de múltiplas frequências acústicas (variando de 500kHz a 3000kHz), o próprio ADP altera a frequência do feixe emitido à medida que muda a profundidade da região, sendo que os tamanhos de células dos valores obtidos se ajustam automaticamente para otimizar a performance e resolução do dado.

O ADP foi acoplado ao barco, submerso a 0,6 m de profundidade, iniciando a aquisição dos dados ao enviar um sinal acústico, através de três sensores, com feixes direcionais projetados na água. Utilizando o princípio do efeito Doppler, o aparelho determina a velocidade da corrente em função do tempo de retorno do sinal acústico e da velocidade do mesmo (DIAS et al., 2008).

Já para os parâmetros físico-químicos, entre as amostragens decorrentes, foram feitas medidas em 3 pontos (Figura 3) de salinidade e temperatura utilizando um OBS 3A, gerando uma média de 32 perfis verticais por campanha.



Figura 2 – Perfil de coleta transversal a desembocadura do SEPAPM (MELADO, 2011).

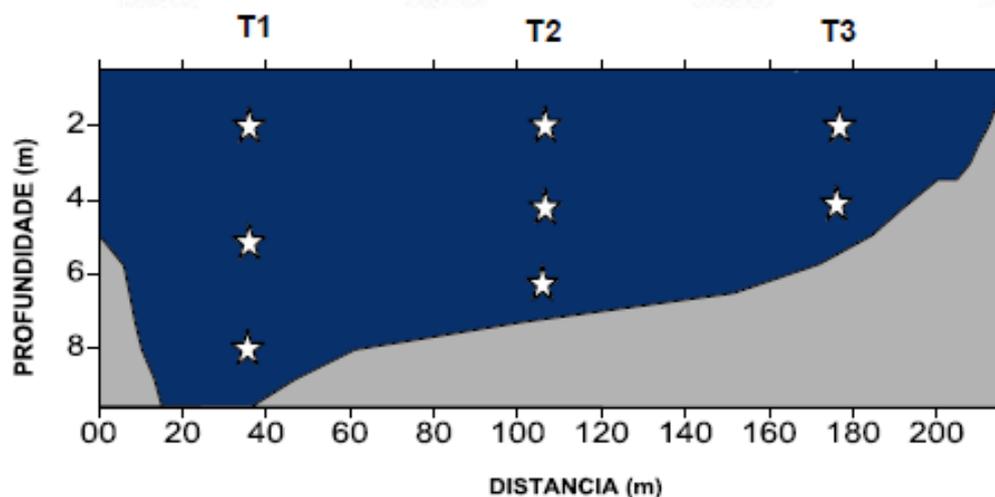


Figura 3 – Perfil esquemático do transecto amostral, com os pontos marcados pelas estrelas indicando o ponto amostral de coleta de água (MELADO, 2011).

3.2. Processamento dos dados

Para os dados de correntes, o ADP utilizou, durante a medição, o software *RiverSurveyor*, que calcula as componentes da velocidade para o perfil, disponibilizando os dados de velocidades transversal e longitudinal para cada célula medida, sendo que o tamanho da célula é dependente da frequência utilizada para aquela profundidade. A ausência de dados de GPS acoplados aos dados de velocidade, assim como a própria configuração do software na apresentação dos dados de *track* dificultaram o processamento dos dados. Principalmente nas regiões com profundidades menores do que 3 m, as distâncias demarcadas nos transectos não estavam bem definidas, não sendo possível, então, definir uma maneira ou um ponto em comum para a interpolação desses dados para uma grade homogênea e única. Essa dificuldade de determinar a real região dos dados com alta frequência, assim como a baixa resolução para incorporar esses dados aos outros pontos, acabou por gerar a utilização apenas dos dados da região com menor resolução, ou seja, aqueles cujo tamanho médio da célula foi de 0,7 m. A profundidade máxima em cada transecto foi utilizada como “*ponto zero*” ou “*ponto de referência*” para a interpolação, sendo que foram calculadas as distâncias horizontais entre cada célula para determinar a distância percorrida pelo transecto e os parâmetros de interpolação.

Tanto os dados de corrente quanto os de salinidade e temperatura foram processados utilizando o software Matlab®. Para os dados de salinidade e temperatura apenas foram considerados os dados com profundidades maiores do que 0,5 m. Os dados restantes foram normalizados e interpolados para uma profundidade adimensional, tentando assim melhor obter a alteração gerada pela onda da maré. Considerando que cada perfil de CTD possui profundidade máxima e tamanhos de células diferentes, porque (i) não tem como na prática manter a mesma velocidade em todos os perfis ao longo das 13 horas amostradas e nem o mesmo local, apenas aproximar e (ii) com a variação temporal há uma variação da profundidade devido à diferença da onda da maré, é necessário padronizar os dados obtidos para que eles possam ser comparados entre si. Por esta razão, para cada amostragem a profundidade foi adimensionalizada e depois interpolada para uma nova grade que considera a variação da maré. Os valores de maré utilizados foram retirados da tábua de maré prevista para os dias. Não é aconselhável utilizar esses dados pela falta de precisão, mas eram os dados disponíveis e a maneira como eles foram trabalhados ficou satisfatória.

A densidade foi calculada através das equações padrões da GSW, mas por conveniência, a densidade será expressa em anomalia da densidade à pressão atmosférica (Sigma-t ou 1000-rho).

$$\sigma_t = [\rho(S, T) - 10^{-3}]$$

Os dados de corrente foram tratados seguindo a metodologia de Valle-Levinson e Atkinson (1999), que consiste em:

- Remoção de todos os dados com menos de 95% de confiabilidade (*spikes*);
- Separação dos fluxos mareal e submareal usando uma regressão sinusoidal qui-quadrática (e.g. LWIZA, 1991).

Os valores obtidos de velocidade foram normalizados e interpolados para uma grade com células de 0,76 m de profundidade e 10 m de largura. Em seguida, utilizando uma regressão sinusoidal qui-quadrática (e.g. LWIZA, 1991), a velocidade foi separada em relação a 3 componentes harmônicas semidiurnas (M2 – período de 12h45 – , M4 – período de 6h21 – e M6 – período de 4h14).

A regressão qui-quadrática baseia-se na ideia de que a velocidade da corrente observada (u') pode ser representada como o resultado do fluxo residual (u_0) mais a soma dos M fluxos harmônicos gerados pelas marés.

$$u' = u_0 + \sum_{j=1}^M A_j \cdot \text{sen}(\omega_j t + \phi_j)$$

Se considerarmos que o fluxo tem apenas uma componente harmônica ($M = 1$), ou seja, apenas a componente semidiurna ou a componente diurna, a equação acima se resumiria a:

$$u' = u_0 + A_1 \cdot \text{sen}(\omega_1 t + \phi_1)$$

Utilizando a regra trigonométrica para a soma de senos ($\text{sen}(A+B) = \text{cos}B\text{sen}A + \text{cos}A\text{sen}B$) e considerando $a_1 = A_1 \text{cos} \phi_1$ e $b_1 = A_1 \text{sen} \phi_1$, temos que a equação acima representada passaria a ser:

$$u' = u_0 + a_1 \cdot \text{sen}(\omega_1 t) + b_1 \cdot \text{cos}(\omega_1 t)$$

Assim, podemos considerar u' como sendo a “representação harmônica” da corrente medida. Por ser uma medida estimada, é necessário calcular, portanto, o erro quadrático gerado pelas considerações feitas (nesse caso, que havia apenas 1 componente harmônica). A equação do erro quadrático pode ser representada por:

$$\varepsilon^2 = \sum_N [u - u']^2 = u^2 - 2uu' + u'^2$$

$$\varepsilon^2 = \sum_N \{u^2 - 2uu_0 - 2ua_1 \text{sen}(\omega_1 t) - 2ub_1 \text{cos}(\omega_1 t)\}$$

Para encontrar a distância mínima entre o valor amostrado e o valor teorizado, é necessário minimizar ε^2 em relação às variáveis que temos (u_0 , a_1 e b_1), ou seja, $\delta\varepsilon^2/\delta u_0$, $\delta\varepsilon^2/\delta a_1$ e $\delta\varepsilon^2/\delta b_1$. O resultado dessa minimização produzirá uma multiplicação de matrizes, permitindo que obtenhamos os seguintes parâmetros: (i) o fluxo residual u_0 , (ii) a fase da constituinte harmônica 1 ($\phi_1 = \arctan(b_1/a_1)$) e (iii) a amplitude da constituinte 1 ($A_1 = (b_1^2 + a_1^2)^{1/2}$). O procedimento para o cálculo de $M > 1$ é o mesmo.

A partir dos procedimentos acima explicados, sete parâmetros foram gerados para cada período: o fluxo residual e a amplitude e a fase da cada componente harmônica semidiurna da maré. A principal razão para a realização desse

procedimento é para poder separar os eventos de alta frequência (iguais ou maiores do que a frequência da maré) daqueles de baixa frequência e, assim, realmente analisar a circulação estuarina. Escolheu-se a separação para a harmônica semidiurna porque o regime de maré na região é semidiurno, sendo necessário então uma separação nessa frequência. Optou-se por separar também as componentes subharmônicas para melhor entender os fenômenos vistos e melhorar a resolução dos resultados encontrados, já que pelo período amostrado essa separação era possível. Quanto maior o número de componentes harmônicas for possível separar utilizando a regressão qui-quadrática, o que depende do tempo amostral, melhor será a resolução dos resultados.

3.3. Análise e descrição dos dados

Para compreender a hidrodinâmica local, foram analisados: (i) o comportamento espaço-temporal dos parâmetros físico-químicos; (ii) a amplitude e a fase das correntes de maré; e (iii) o fluxo submareal, tanto longitudinal (W-E) quanto transversal (N-S) ao estuário. Como forma de melhor discutir os resultados obtidos para a região transversal à desembocadura, separou-se o transecto em três regiões, como mostra a Figura 4.

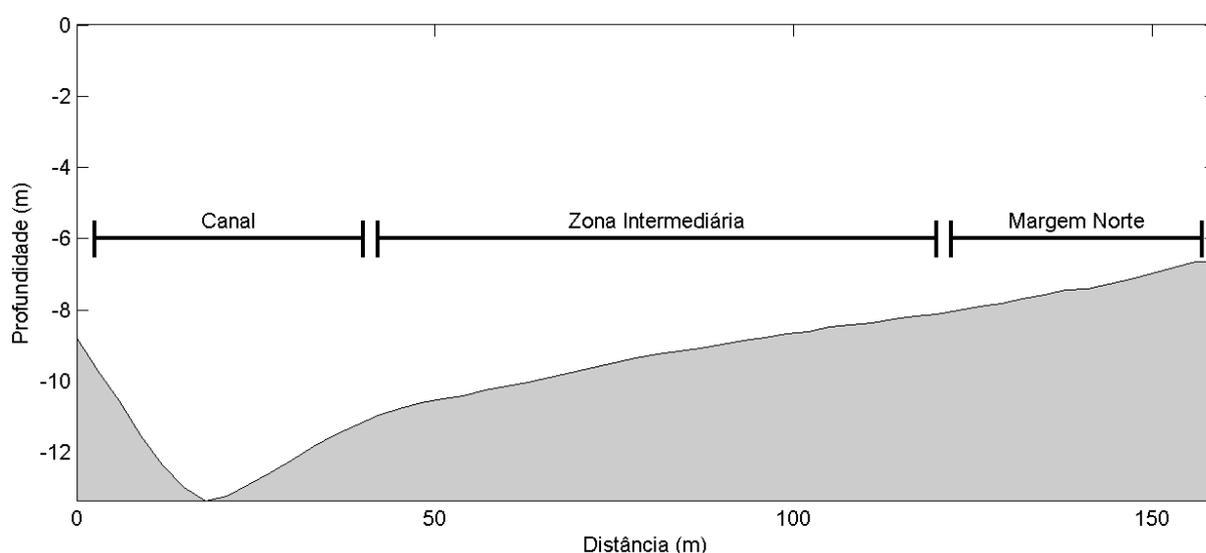


Figura 4– Região transversal a desembocadura do SEPAPM, dividido em três regiões principais: o canal (com profundidade máxima de 13 m), a zona intermediária (profundidades entre 10 e 8 m) e a margem norte (profundidades inferiores a 8 m).

Foram produzidos gráficos com as amplitudes e fases da maré e com o fluxo residual para cada período. Nesses gráficos foram analisadas as variações entre as regiões com batimetrias distintas (diferenças entre o canal e a margem norte, por exemplo), buscando caracterizar as regiões com maior e menor velocidades, qual o sentido dominante em cada fase da maré e como se comportam os fluxos ao longo do transecto. A velocidade lateral oferece uma boa relação das regiões com convergência e divergência do fluxo, ajudando a compreender o transporte de massa e sedimentos na região, justificando assim a análise da mesma.

Os resultados obtidos foram discutidos, como dito anteriormente, com base nos modelos descritos previamente pela literatura. A análise da circulação estuarina, portanto, será uma análise qualitativa do padrão de circulação exposto em cada época e do padrão geral que pode-se observar a partir dos conhecimentos prévios e dos gráficos gerados.

4. Resultados

Para compreender a hidrodinâmica local, foi analisado o comportamento espaço-temporal da salinidade e temperatura, a amplitude e a fase da maré para cada transecto e as velocidades residuais tanto transversal (N-S) quanto longitudinal (W-E). A Figura 5 representa as curvas de maré previstas para os dias amostrados.

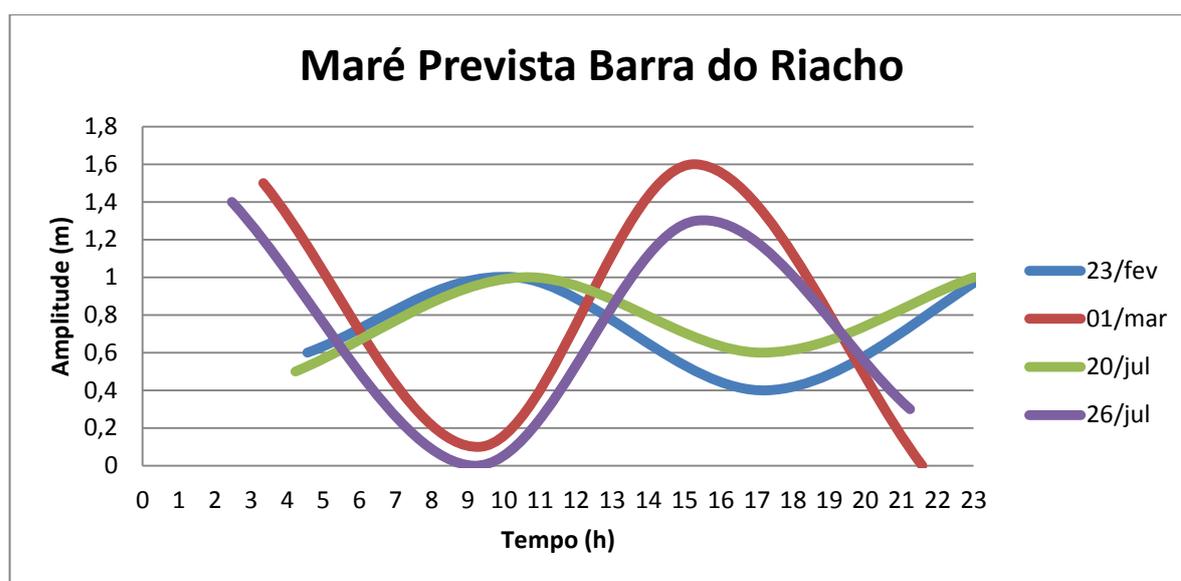


Figura 5 – Curva de maré prevista para os dias amostrados.

Os quatro dias representam duas fases distintas da maré (sizígia e quadratura), mas foram divididos pelas condições pluviométricas de cada período, ou seja, em período seco e chuvoso. Na média climatológica, março representaria o período chuvoso e julho o período seco. No entanto, o ano de 2010 foi um ano atípico, apresentando um padrão de pluviosidade diferente da média esperada, com uma pluviosidade negativa em março (em relação à média) e positiva em julho. Por causa dos valores pluviométricos do ano de 2010, será considerado julho como o período chuvoso e março como período seco, já que na realidade, para o ano de 2010, a

variabilidade pluvial sazonal se caracterizou dessa forma (ANA, 2010; CEMBA, 2010).

4.1. Parâmetros físico-químicos

4.1.1. Salinidade

4.1.1.1. Período Seco

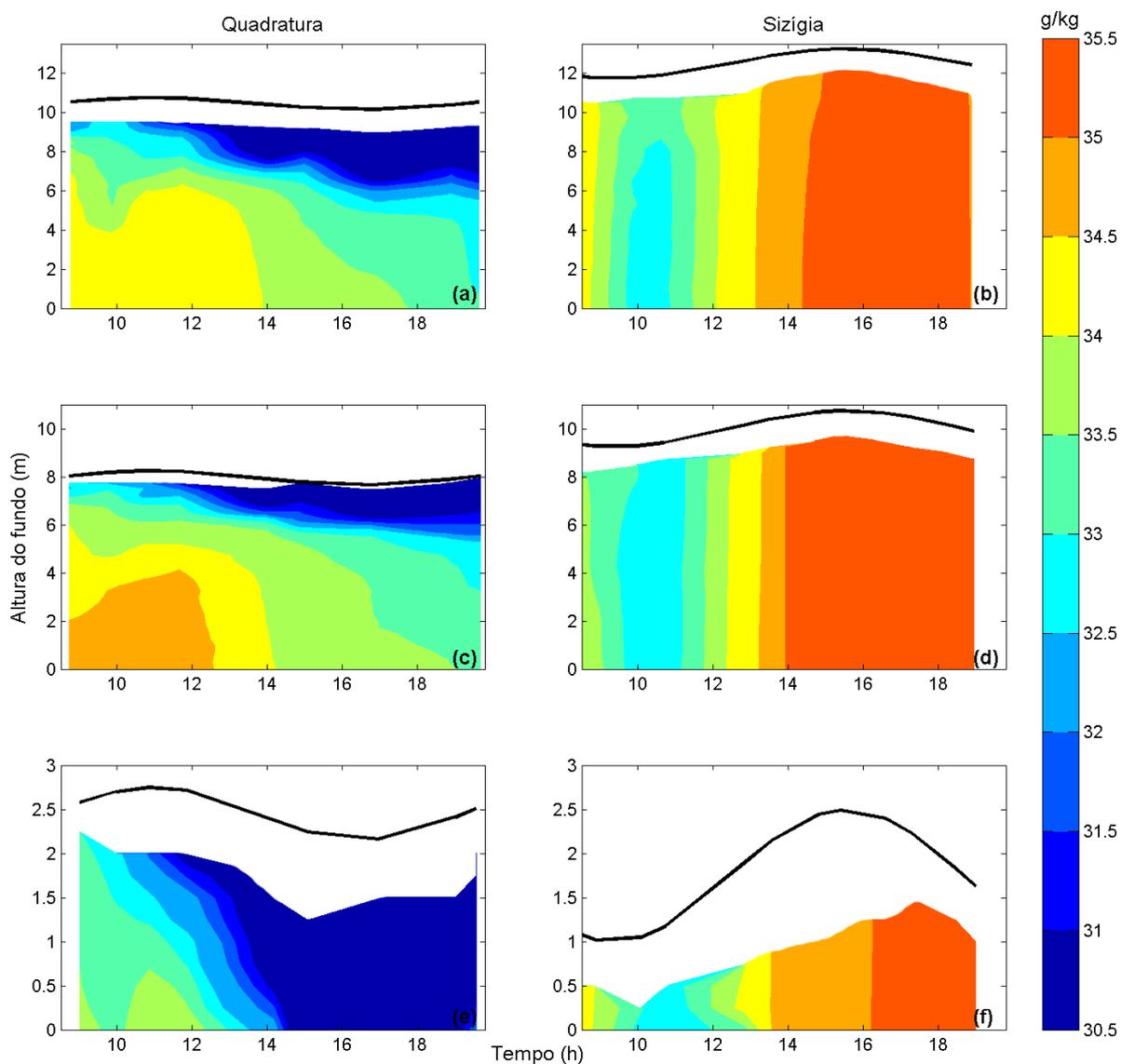


Figura 6 – Perfis de salinidade absoluta em g/kg. (a) T1 para o dia 23 de fevereiro; (b) T1 para o dia 1 de março; (c) T2 para o dia 23 de fevereiro; (d) T2 para o dia 1 de março; (e) T3 para o dia 23 de fevereiro; (f) T3 para o dia 1 de março. A linha preta representa a curva prevista de maré para cada dia.

A Figura 6 apresenta os perfis de salinidade ao longo do tempo para as duas fases de maré amostradas durante o período seco. É importante ressaltar que se optou por manter cada transecto com a profundidade relativa ao local de coleta, ou seja, as escalas de altura do fundo são diferentes nos três gráficos. É possível perceber que a coluna d'água apresenta-se fracamente estratificada na quadratura e verticalmente homogênea na sizígia, com exceção do perfil T3 da quadratura, que está verticalmente homogêneo também durante a vazante. O padrão de variação de salinidade ao longo de um ciclo de maré, para a quadratura, apresenta uma maior mistura durante a enchente, com uma pycnoclina mais próxima a superfície e boa parte da coluna d'água com águas mais salinas. Já durante a vazante percebe-se uma tendência a estratificação, fazendo com que as isohalinas estejam mais espaçadas verticalmente.

4.1.1.2. Período Chuvoso

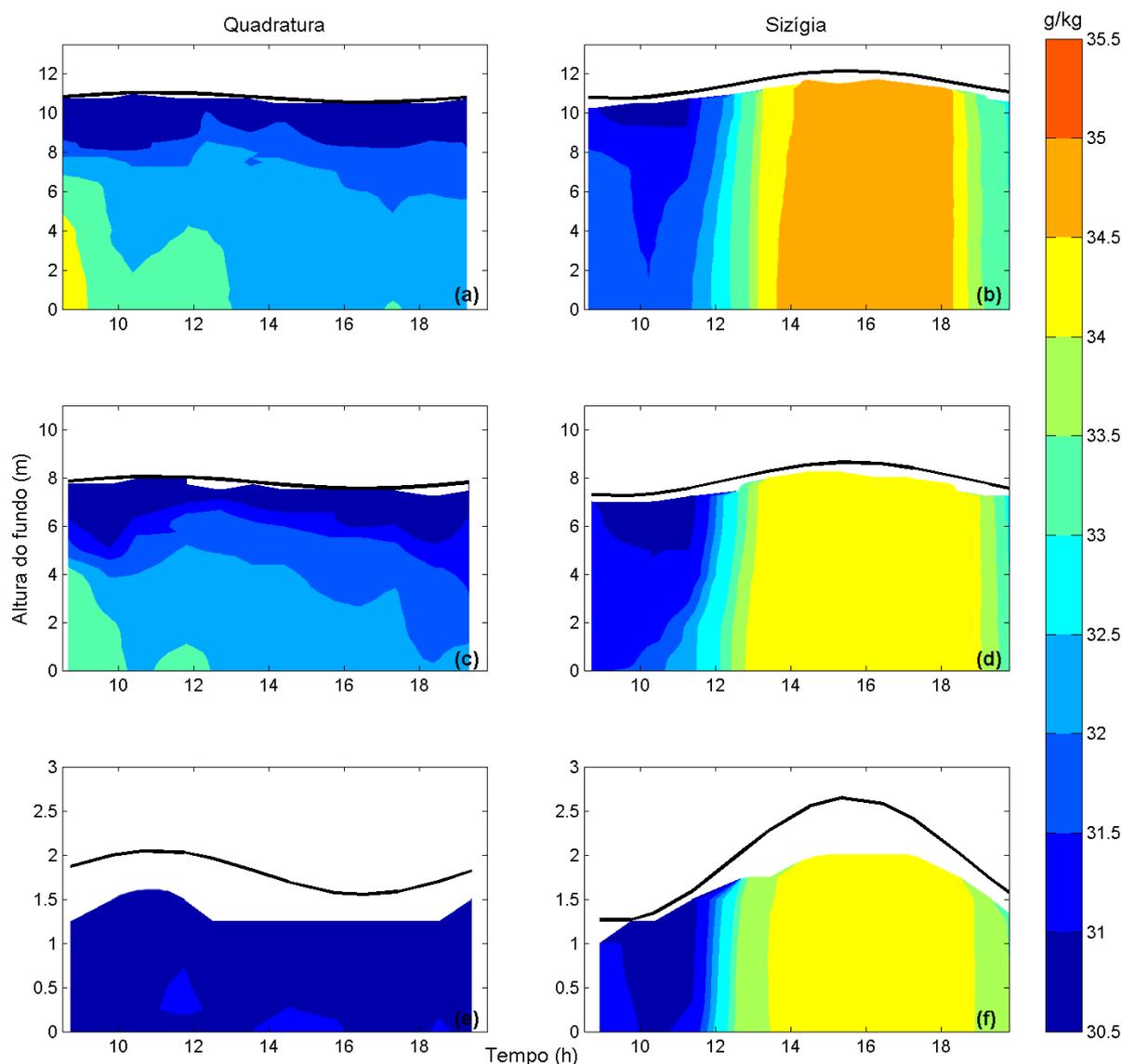


Figura 7 – Perfis de salinidade absoluta em g/kg. (a) T1 para o dia 20 de julho; (b) T1 para o dia 26 de julho; (c) T2 para o dia 20 de julho; (d) T2 para o dia 26 de março; (e) T3 para o dia 20 de julho; (f) T3 para o dia 26 de julho. A linha preta representa a curva prevista de maré para os respectivos dias amostrados.

A Figura 7 apresenta os perfis de salinidade absoluta ao longo do tempo para as duas fases da maré durante o período chuvoso. É importante ressaltar, novamente, que as escalas de altura do fundo são diferentes nos três gráficos pelos mesmos motivos anteriormente citados. A coluna d'água apresenta um perfil semelhante ao do período chuvoso, sendo fracamente estratificado durante a quadratura e verticalmente homogêneo na sizígia, com exceção dos perfis T1 e T2 da sizígia, que durante a vazante e início da enchente apresentam uma pequena estratificação vertical, e do perfil T3 da quadratura, que se encontra praticamente homogêneo ao longo de todo o tempo. O padrão de variação de salinidade ao longo

do tempo também é semelhante entre as duas estações, mas durante o período chuvoso percebe-se uma diminuição na intrusão salina, algo esperado devido ao aumento da pluviosidade da região.

4.1.2. Temperatura

4.1.2.1. Período Seco

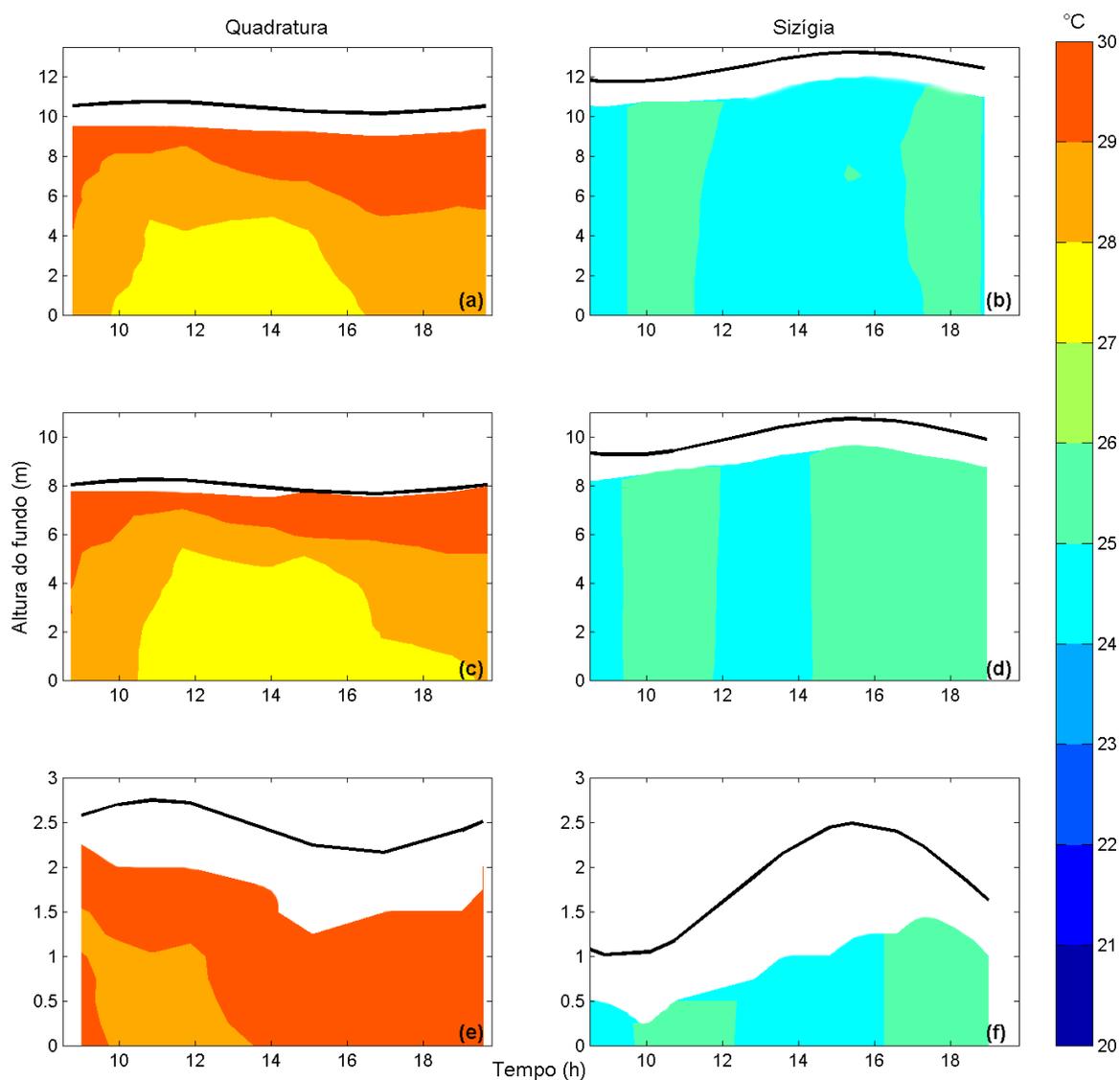


Figura 8 – Perfis de temperatura. (a) T1 para o dia 23 de fevereiro; (b) T1 para o dia 1 de março; (c) T2 para o dia 23 de fevereiro; (d) T2 para o dia 1 de março; (e) T3 para o dia 23 de fevereiro; (f) T3 para o dia 1 de março. A linha preta representa a curva de maré prevista para os dias amostrados.

A Figura 8 apresenta os perfis de temperatura ao longo do tempo durante o período seco. Assim como apresentado na salinidade, optou-se por manter cada

transecto com a profundidade relativa ao local de coleta, logo, as escalas de altura do fundo são diferentes nos três gráficos. O padrão de distribuição da temperatura foi relativamente semelhante ao da salinidade durante o período seco, apresentando-se fracamente estratificada para a quadratura e verticalmente homogênea para a sizígia. A evidência de maior intrusão pela temperatura ocorre logo após a enchente, o que era esperado devido à diferença de fase entre a corrente e amplitude da maré. Apesar de apresentar grande diferença entre as duas fases da maré, em um mesmo ciclo a variação é inferior a 3°C.

4.1.2.2. Período Chuvoso

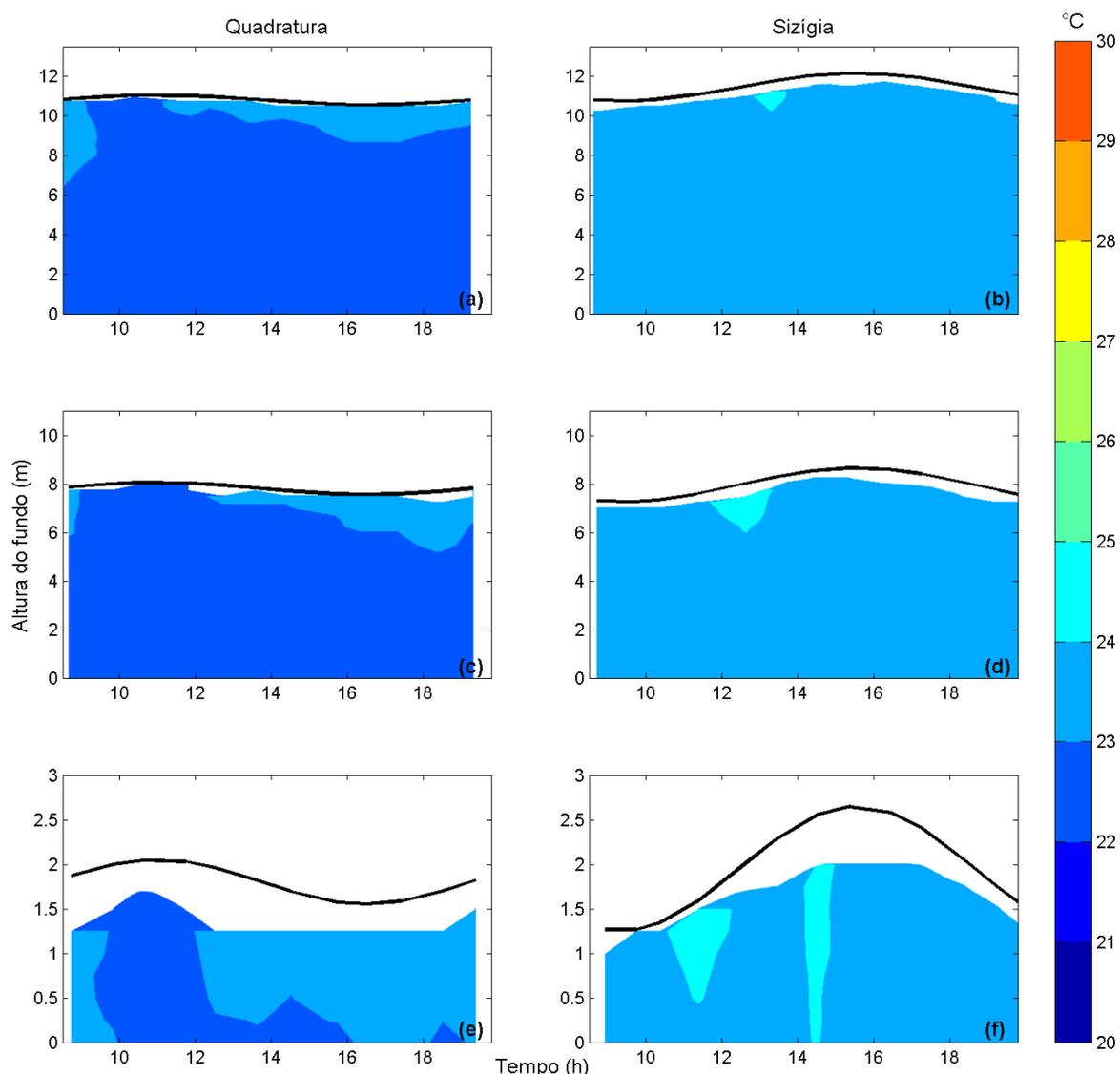


Figura 9 – Perfis de temperatura. (a) T1 para o dia 20 de julho; (b) T1 para o dia 26 de julho; (c) T2 para o dia 20 de julho; (d) T2 para o dia 26 de julho; (e) T3 para o dia 20 de julho; (f) T3 para o dia 26 de julho. A linha preta representa a curva prevista de maré para os dias amostrados.

A Figura 9 apresenta os perfis de temperatura ao longo do tempo. A temperatura tem um padrão bem distinto no período chuvoso, sendo praticamente homogêneo tanto vertical quanto temporalmente nas duas fases. Há leves alterações de temperatura, mas elas não ultrapassam 1°C. Além disso, a temperatura se manteve baixa nos dois perfis. Esse comportamento já era esperado, visto que o período chuvoso ocorreu durante o inverno.

4.1.3. Densidade

4.1.3.1. Período Seco

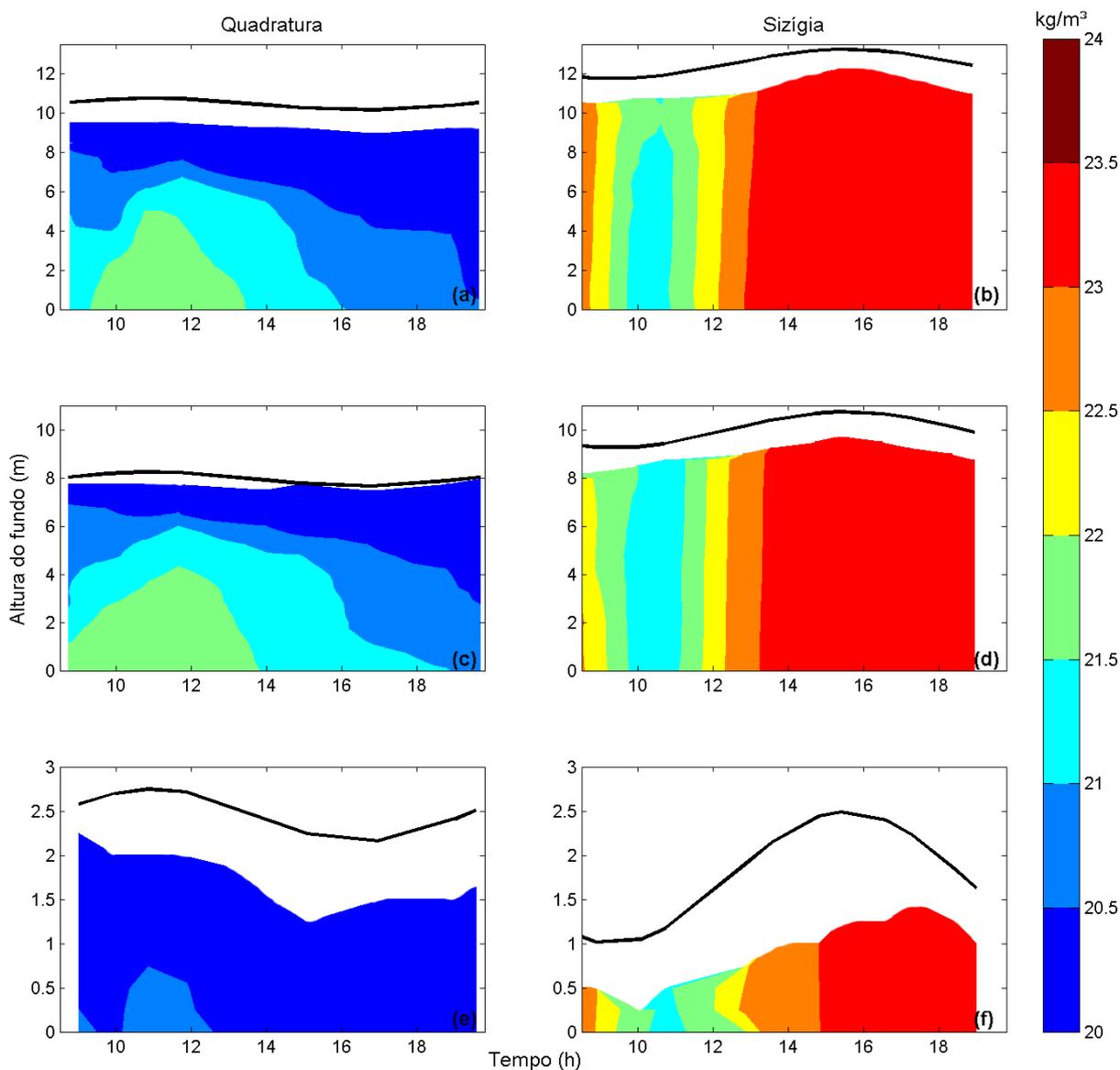


Figura 10– Perfis de anomalia da densidade em kg/m³. (a) T1 para o dia 23 de fevereiro; (b) T1 para o dia 1 de março; (c) T2 para o dia 23 de fevereiro; (d) T2 para o dia 1 de março; (e) T3 para o dia 23 de fevereiro; (f) T3 para o dia 1 de março. A linha preta representa a curva de maré prevista para os períodos amostrados.

A Figura 10 apresenta os perfis de anomalia da densidade (σ_t). Percebe-se que, assim como para a salinidade, a coluna d'água apresenta-se na quadratura fracamente estratificada e na sизigia verticalmente homogênea, com exceção ao perfil T3 da quadratura, que se encontra praticamente bem misturado. As escalas de altura do fundo são diferentes nos três gráficos também, assim como para a temperatura e salinidade. O mesmo tipo de mistura é perceptível nesses perfis ao longo de um ciclo de maré do que aquele encontrado para a salinidade, ou seja, uma maior mistura durante a enchente, fazendo com que a pycnoclina esteja mais

próxima da superfície, e uma maior estratificação horizontal (considerando a distância das isohalinas) durante a vazante.

4.1.3.2. Período Chuvoso

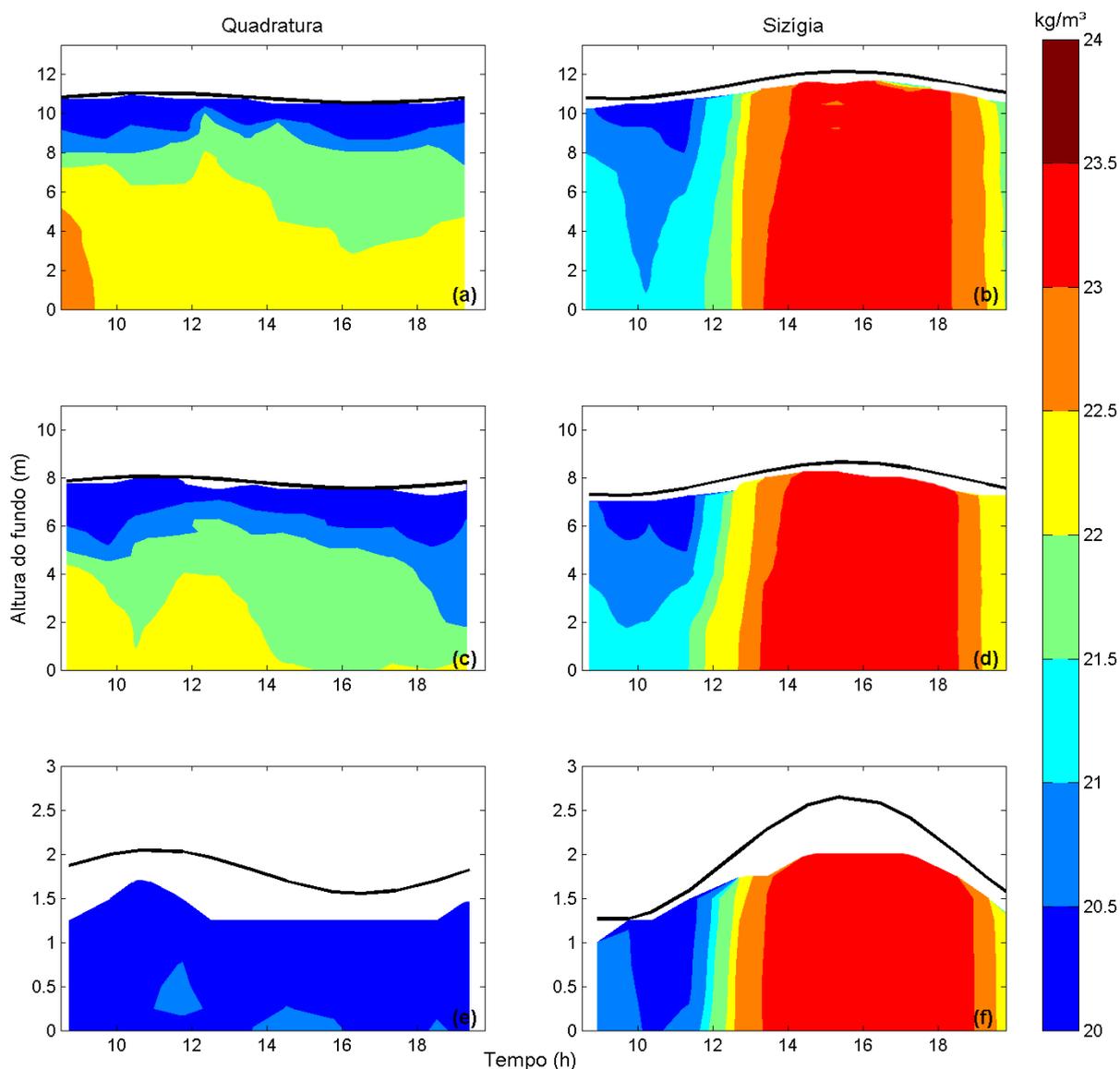


Figura 11 – Perfis de anomalia da densidade em kg/m³. (a) T1 para o dia 20 de julho; (b) T1 para o dia 26 de julho; (c) T2 para o dia 20 de julho; (d) T2 para o dia 26 de julho; (e) T3 para o dia 20 de julho; (f) T3 para o dia 26 de julho. A linha preta representa a curva prevista de maré para os dias amostrados.

A Figura 11 apresenta os perfis de anomalia da densidade (σ_t). O padrão encontrado é semelhante ao padrão durante o período seco, com o mesmo tipo de estratificação para a quadratura e sizígia do período previamente mostrada. No entanto, assim como aconteceu para a salinidade no período chuvoso, os perfis T1 e

T2 da sizígia apresentam o fim da vazante e início da enchente com uma leve estratificação.

4.2. Maré

A Figura 12 apresenta a velocidade média das correntes e a amplitude de maré em relação ao tempo.

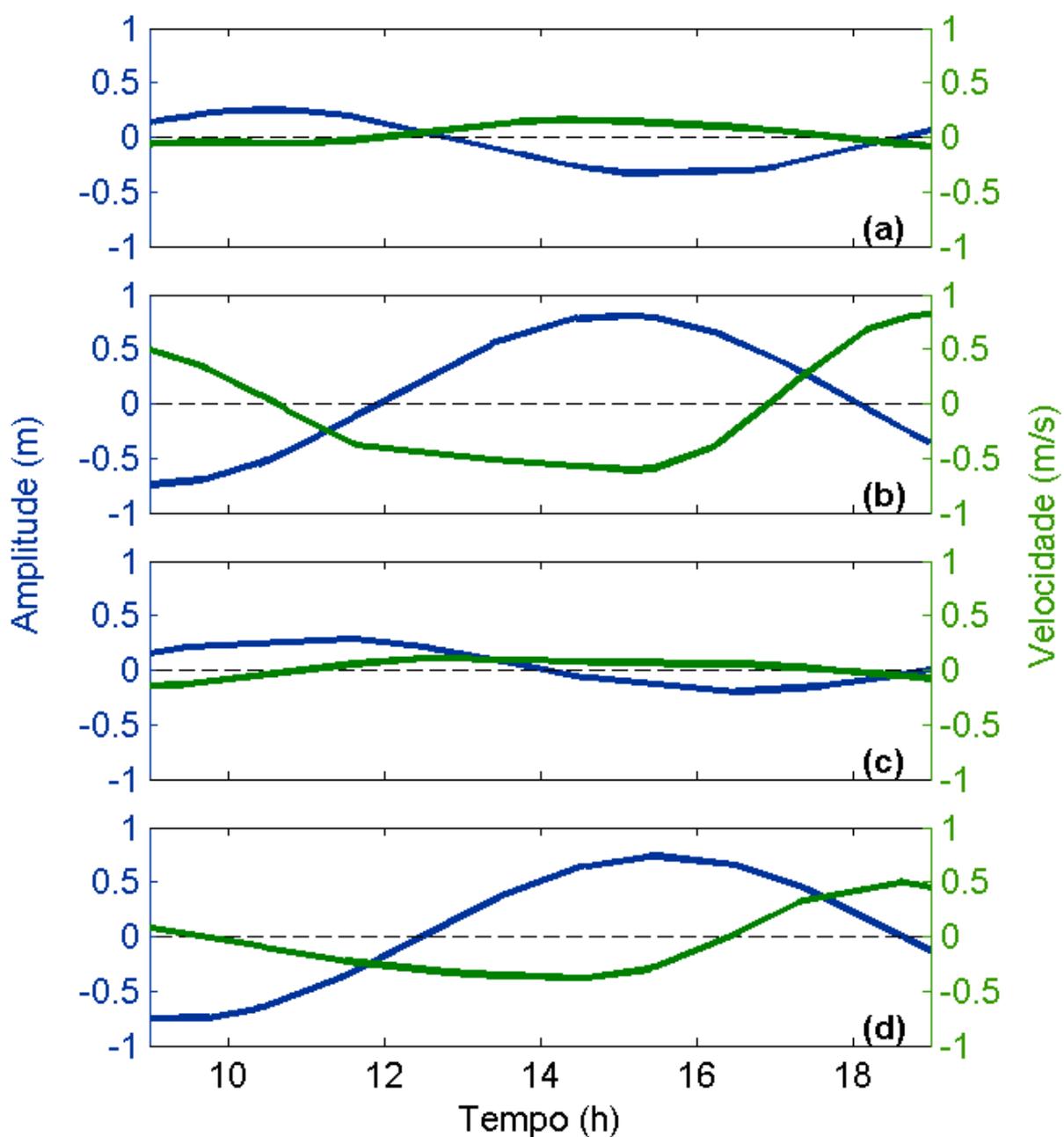


Figura 12 – Comparação entre a amplitude e a velocidade no transecto. (a) Quadratura no período

seco; (b) Sizígia no período seco; (c) Quadratura no período chuvoso; (d) Sizígia no período chuvoso.

É possível perceber, pelas imagens, que para todas as amostragens a amplitude e a velocidade estão levemente fora de fase. A diferença de praticamente 180° graus entre as duas é devido à direção das correntes, que durante a enchente são negativas (sentido oeste, entrando no estuário). Se analisarmos as correntes como tendo sinais opostos, perceberíamos que, principalmente durante a quadratura, as fases das velocidades e da amplitude são próximas. No entanto, durante as duas sizíguas, é possível perceber uma pequena defasagem entre os dois, o que ocasiona que as maiores velocidades ocorrem antes da máxima enchente, assim como as menores velocidades são antes da máxima vazante.

A seguir, são apresentadas as amplitudes e fase da componente harmônica semidiurna M2 da maré para os quatro dias amostrados. Apesar de ter sido feita a decomposição para três componentes harmônicas, como explicado anteriormente, optou-se por apresentar apenas os gráficos da componente M2 devido a sua maior importância (as outras componentes, juntas, não representam nem 5% das correntes) e para não estender ou repetir o trabalho. As figuras foram analisadas baseadas na nomenclatura proposta na Figura 4, que divide a região transversal em três áreas: canal, zona intermediária e margem norte. Os resultados encontrados para as componentes harmônicas M4 e M6 são apresentados ao final de cada seção, após os resultados da M2, mas são explicados descritivamente.

4.2.1. Período Seco

4.2.1.1. Quadratura

Os dados para o período seco apresentaram uma maior predominância do fluxo de maré comparado com os dados do período chuvoso. Para a velocidade longitudinal (Leste-Oeste), as componentes harmônicas semidiurnas representam mais de 70% (média de 84,11%) da variabilidade dos dados amostrados em cada ponto da grade. O erro médio quadrático para os pontos variou entre 8 cm/s e 2 cm/s, com uma média de 5 cm/s. Já para o fluxo transversal (norte-sul), os dados encontrados através da regressão possuem uma representação extremamente baixa comparada ao fluxo transversal da sizígia para esta mesmo período, tendo uma

média de 34,43% de representação da maré. A correlação desse fluxo foi baixo em todo o transecto. O erro médio quadrático para os pontos no fluxo transversal variou entre 16 cm/s e 2 cm/s, tendo uma média de 5 cm/s.

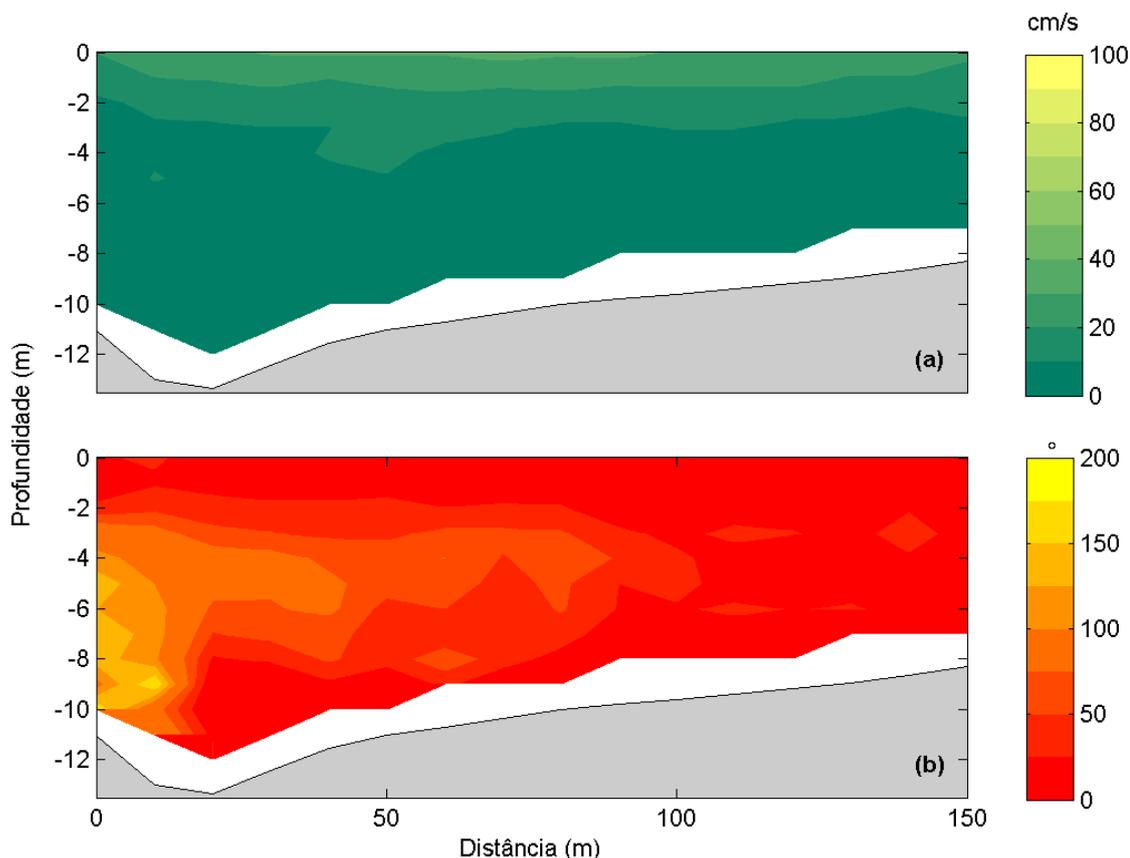


Figura 13– (a) Amplitude da Corrente e (b) fase da componente harmônica M2 da maré para o dia 23 de fevereiro de 2010.

O padrão de amplitude da corrente semidiurna (M2) encontrado na Figura 13a apresenta a amplitude tendendo a ser homogênea ao longo de todo o perfil, com os maiores valores próximos à superfície e ao canal (menor atrito do que junto ao fundo). Há um leve indício de cisalhamento horizontal, onde a amplitude no canal diminui em relação a margem norte, mas essa diferença é de menos de 10 cm/s. A onda, portanto, age neste trecho todo com uma pequena variação horizontal, a princípio, apresentando nessa fase da maré menor influência no canal.

A Figura 13b representa a fase da componente M2 da maré em graus. O perfil encontra-se praticamente homogêneo, com um ponto no canal bem elevado, provavelmente proveniente da baixa correlação que existe nesse ponto, não

tornando esse ponto válido. De modo geral não se percebe uma variação grande de fase ao longo do perfil.

Já considerando as outras componentes harmônicas, tanto a M4 quanto a M6 apresentaram-se com valores inferiores a 10 cm/s, sendo que a M4 apresentou-se com um padrão praticamente cisalhado verticalmente e homogêneo horizontalmente, com os maiores valores próximo a superfície e a M6 apresentou-se quase toda homogênea, com velocidades em torno de 6 cm/s, sendo maiores apenas no canal.

4.2.1.2. Sizígia

Os dados para o período seco apresentaram uma maior predominância do fluxo de maré comparado com os dados do período chuvoso. Para a velocidade longitudinal (Leste-Oeste), as componentes harmônicas semidiurnas representam mais de 80% (média de 92,8%) da variabilidade dos dados amostrados em cada ponto da grade. O erro médio quadrático para os pontos variou entre 18 cm/s e 6 cm/s, com uma média de 10 cm/s. Já para o fluxo transversal (norte-sul), os dados encontrados através da regressão possuem uma representação alta comparando com o fluxo transversal do período chuvoso, tendo uma média de 77,5% de representação da maré. No canal, o fluxo transversal apresentou a melhor correlação, sendo maior do que 80% em quase todo o canal. O erro médio quadrático para os pontos no fluxo transversal variou entre 19 cm/s e 4 cm/s, tendo uma média de 10 cm/s.

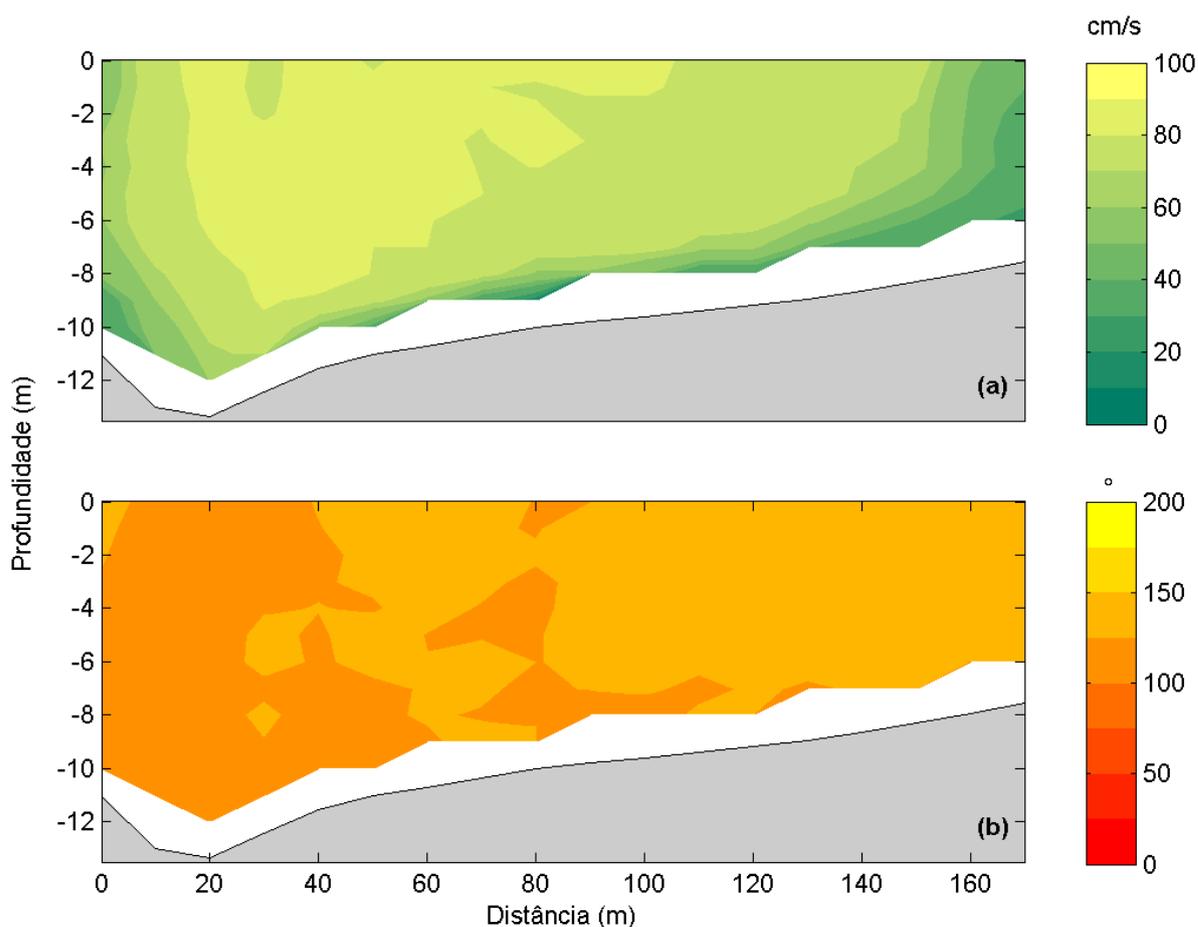


Figura 14 – (a) Amplitude da Corrente e (b) fase da componente harmônica M2 da maré para o dia 01 de março de 2010

A amplitude da corrente de maré para a componente M2 durante a sizígia do período seco está representada na Figura 14a. Podemos perceber valores altos de velocidades de maré (acima de 80 cm/s) mas o perfil encontra-se praticamente homogêneo horizontalmente com uma leve estratificação vertical, havendo diferença de amplitude apenas próximo às margens, onde há mais fricção. O máximo de amplitude não ocorre por todo o canal devido à inclinação da margem sul, que é muito íngreme, aumentando a fricção nessa região e reduzindo a amplitude.

A Figura 14b apresenta a fase da maré semidiurna em graus. A fase segue o mesmo padrão da quadratura, sendo praticamente homogênea ao longo de todo perfil, apenas com uma defasagem no canal. Essa defasagem no canal era esperada, visto que é a região mais profunda.

Para outras componentes harmônicas, tanto a M4 quanto a M6 apresentaram-se com valores inferiores a 20 cm/s. A M4 apresentou-se cisalhada horizontalmente e com uma leve estratificação vertical. Na margem norte, ao longo de toda a coluna

d'água, predominou valores próximos a 20 cm/s, sendo que os menores valores se concentraram no canal. Já a M6 encontrou-se quase toda homogênea, com valores decrescendo levemente na horizontal, da margem norte para a sul.

4.2.2. Período Chuvoso

4.2.2.1. Quadratura

Para a velocidade longitudinal (Leste-Oeste) as componentes harmônicas semidiurnas representam em média 75% da variabilidade dos dados amostrados na grade. O erro médio quadrático para os pontos se mantêm menor do que 8 cm/s, tendo uma média de 5 cm/s. Já para o fluxo transversal (norte-sul), os dados encontrados através da regressão possuem uma representação muito baixa ao longo do perfil, sendo inferior a 40% em praticamente todo o canal e atingindo valores maiores de 70% apenas na região da margem norte. A média da correlação para esses dados foi de 47,13%, sendo que o erro variou entre 5 cm/s a 0,4 cm/s, com média de 3 cm/s.

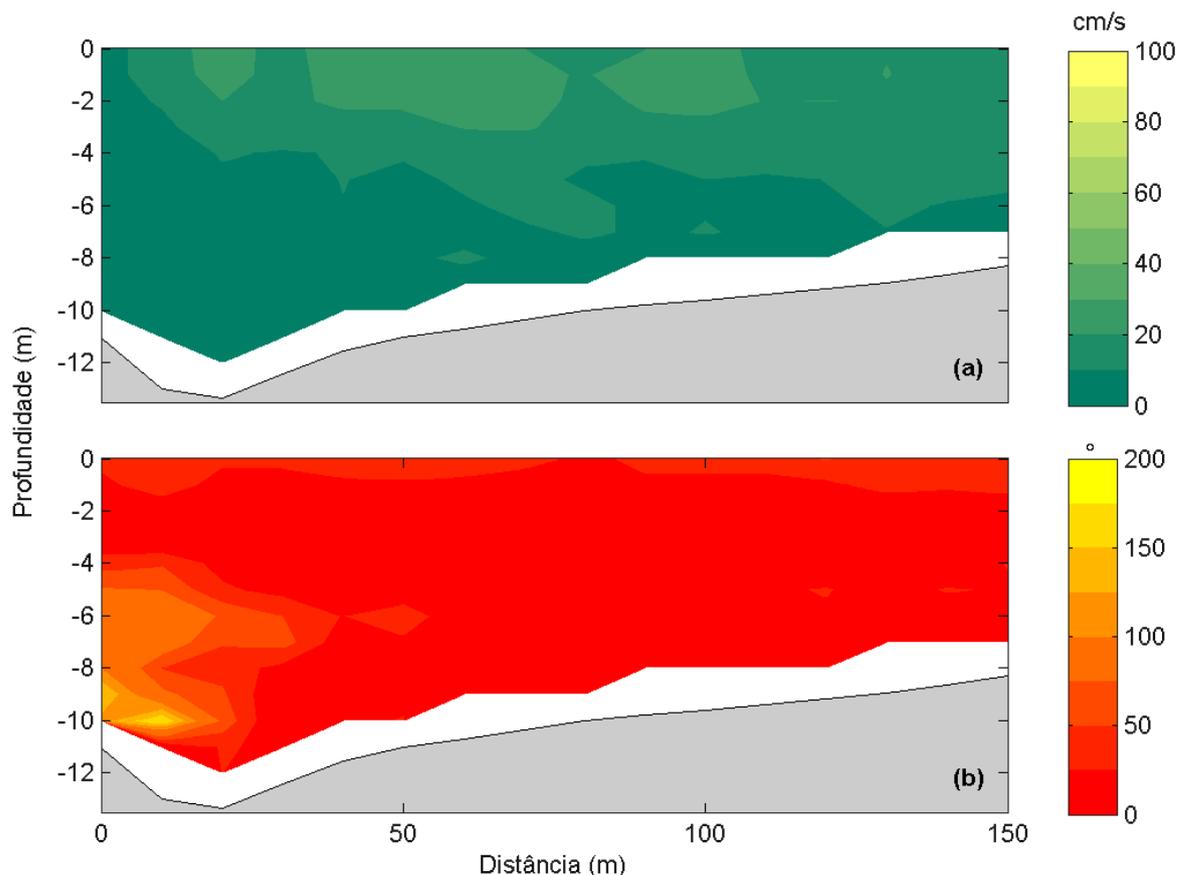


Figura 15 – (a) Amplitude da Corrente e (b) fase da componente harmônica M2 da maré para o dia 20 de julho de 2010.

Pela Figura 15a, é possível perceber que a maré apresenta-se quase homogênea ao longo de todo o transecto, com uma amplitude média de 14 cm/s. Valores mais altos de amplitude são encontrados bem próximos à superfície e o cisalhamento é apenas vertical, não sendo possível identificar diferença entre o canal e a margem norte.

A fase, apresentada em graus na Figura 15b, também encontra-se praticamente homogênea, com apenas um ponto com valor mais alto do que o esperado. Esse ponto, assim como para a quadratura seca, provavelmente é algum ponto com poucos dados coletados, o que resultou em um ponto não representativo. A homogeneidade da fase segue o padrão da amplitude, como era esperado.

Assim como na quadratura do período seco, as outras componentes harmônicas apresentaram-se com valores inferiores a 10 cm/s. Diferente do período seco, tanto a M4 quanto a M6 encontram-se praticamente homogêneas, tanto horizontal quanto verticalmente, havendo uma diferença apenas na M4, com valores altos de corrente no centro da coluna d'água da zona intermediária.

4.2.2.2. Sizígia

Para a velocidade longitudinal (Leste-Oeste), a regressão qui-quadrática com as componentes harmônicas semidiurnas representam mais de 70% (média de 92%) da variabilidade dos dados amostrados em cada ponto da grade. O erro médio quadrático para os pontos variou, mas se mantendo menor do que 14 cm/s, tendo uma média de 8 cm/s. Já para o fluxo transversal (norte-sul), os dados encontrados através da regressão possuem uma representação muito irregular ao longo do perfil, sendo inferior a 40% em praticamente todo o canal e atingindo valores maiores de 70% na região da margem norte. A média da correlação para esses dados foi de 68,8%.

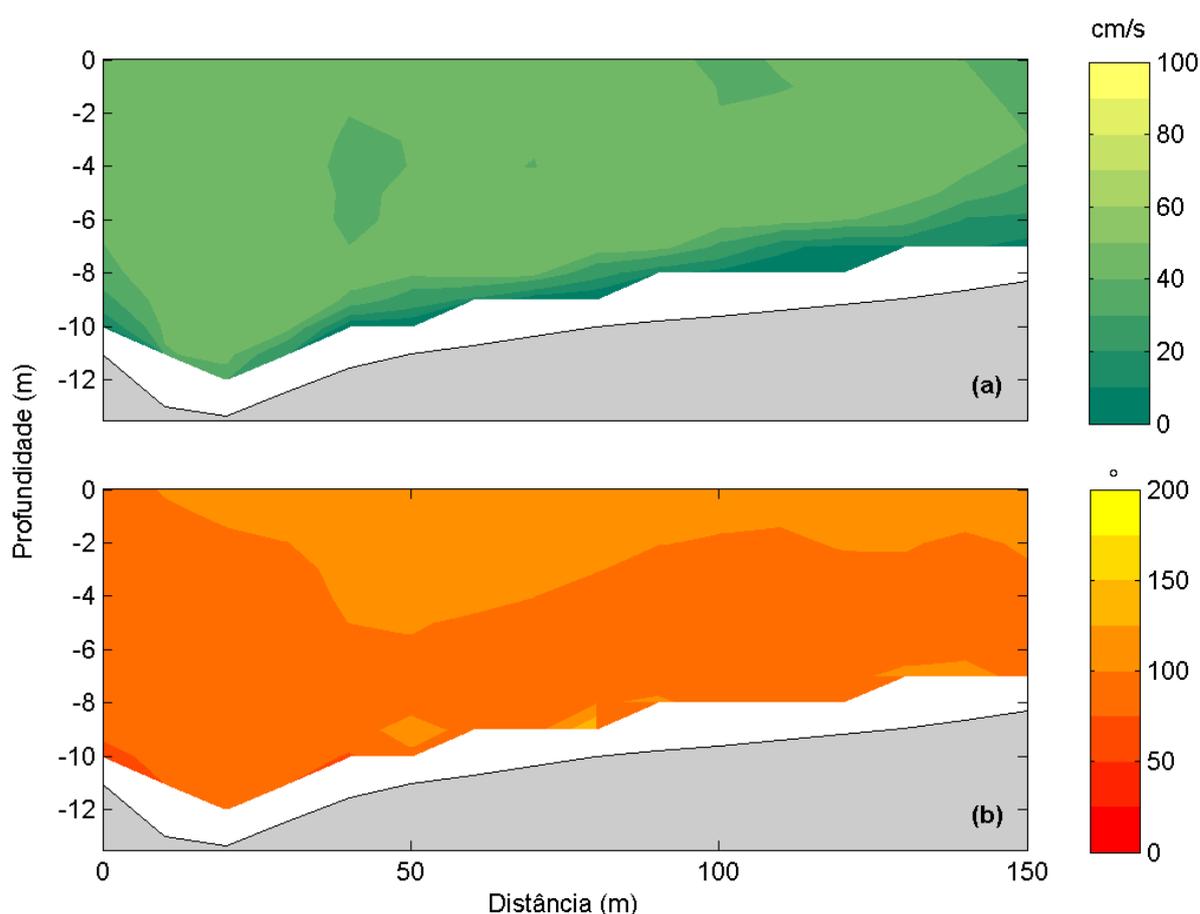


Figura 16 – (a) Amplitude da Corrente e (b) fase da componente harmônica M2 da maré para o dia 26 de julho de 2010.

Assim como ocorre durante a quadratura, para a sizígia (Figura 16a) a maré apresenta-se quase homogênea ao longo de todo o transecto, mas com uma

amplitude média mais elevada (41 cm/s). A amplitude diminui apenas próximo as margens, mas não é possível perceber nenhuma grande diferença nem vertical nem horizontalmente.

A Figura 16b apresenta a fase da maré semidiurna em graus em cada ponto da grade. Assim como no período seco, no período chuvoso a fase segue o padrão de velocidade, apresentando-se homogênea por quase todo o perfil, variando apenas na superfície. As maiores fases são próximas à superfície e fases menores estão nas margens e no fundo. O padrão da fase é o mesmo para praticamente todas as estações.

A componente harmônica M4 apresenta-se com a amplitude de corrente encontra-se com uma alta estratificação horizontal, sendo amplificada no próximo ao canal, atingindo velocidades um pouco superiores a 20 cm/s nesse local. O restante do perfil apresenta velocidades menores, principalmente a medida que nos afastamos do canal principal. Já a M6 apresenta-se com valores inferiores a 10 cm/s e homogênea ao longo de todo o transecto.

4.3. Fluxo Residual

4.3.1. Período Seco

4.3.1.1. Quadratura

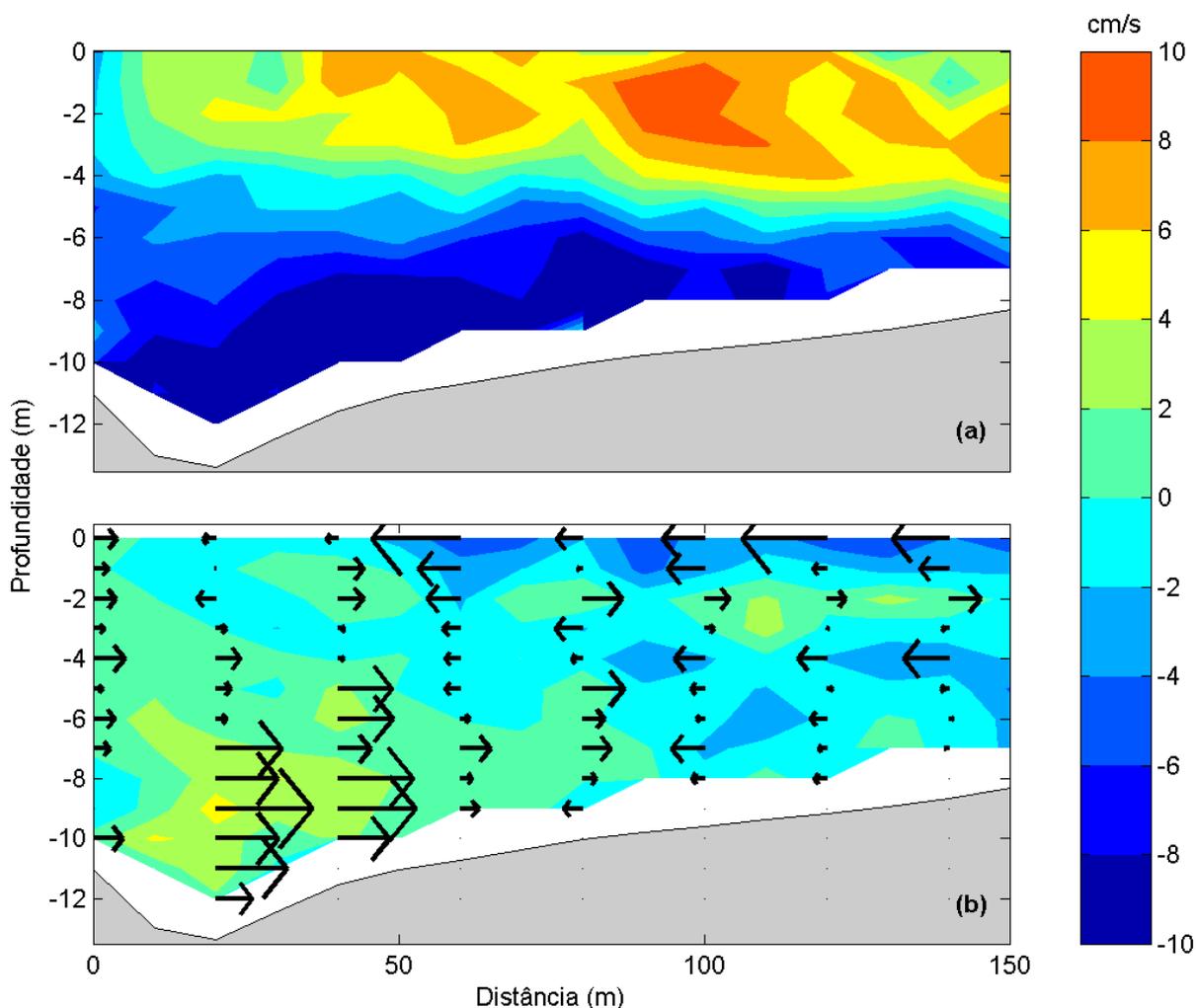


Figura 17 – Residual Quadratura Seca (RQS): Fluxo residual para o dia 23 de fevereiro. (a) velocidade longitudinal (oeste-leste); e (b) velocidade transversal (norte-sul).

Para o período seco, durante a quadratura o fluxo residual longitudinal (Figura 17a) apresenta o padrão clássico de fluxo residual ocasionado pela circulação gravitacional, ou seja, um fluxo cisalhado verticalmente de duas camadas, com entrada de água no estuário pelo fundo. Esta entrada é representada pelo fluxo com direção leste no canal, e ao longo de todo o fundo do transecto e com saída pela superfície, apresentando um fluxo com direção oeste na camada superficial. Percebe-se também uma tendência do fluxo leste em se concentrar nas regiões mais profundas, ou seja, no canal, onde se encontram as maiores velocidades e, em contrapartida, observa-se a tendência do fluxo oeste de se concentrar nas partes rasas, presentes nelas as maiores velocidades. Esse padrão de saída no canal e entrada nas partes rasas é comum em ambientes dominados pela fricção, indicando

que pelo menos para esse período, a fricção ao longo de toda a coluna d'água é um fator importante.

Já para o fluxo transversal (Figura 17b), pode-se perceber perfeitamente a predominância de um giro anti-horário nessa seção, que atinge desde a margem norte até o canal. O fluxo é principalmente forte no canal, próximo ao fundo, e na margem norte/zona intermediária bem próximo a superfície. Esse forte fluxo próximo ao fundo no canal indica que há um transporte de massa do canal para a margem pelo fundo.

4.3.1.2. Sizígia

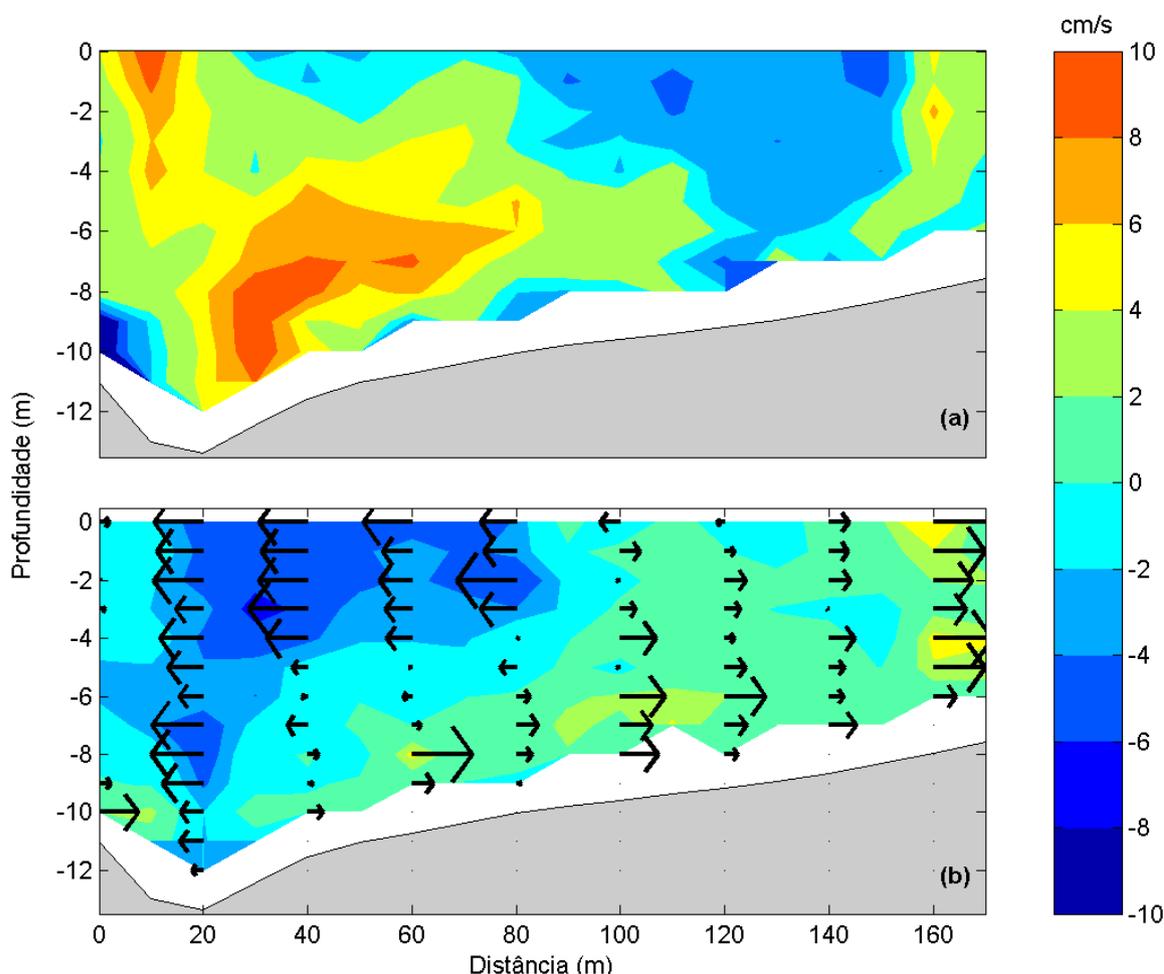


Figura 18 – Residual Sizígia Seca (RSS): Fluxo residual para o dia 1 de março. (a) velocidade longitudinal (oeste-leste); e (b) velocidade transversal (norte-sul).

A circulação residual da sizígia durante o período seco mostra, considerando a componente longitudinal (Figura 18a), um fluxo no fundo de leste (“sai do estuário”) e pela superfície de oeste (“entra no estuário”), contrário ao padrão de circulação

gravitacional. Os valores de fluxo oeste tendem a ser maiores na margem norte, predominando nessa região. No entanto, na margem norte também ocorre fluxos de leste bem próximos a borda. O fluxo leste, predominante no transecto, tem os maiores valores próximo ao canal, tanto em superfície quanto no fundo, sendo que na zona intermediária o fluxo concentra-se no fundo. Esse padrão encontrado não se repete nos outros períodos amostrados, indicando que foi um evento influenciado pelas condições meteo-oceanográficas do momento da coleta. Portanto, essa circulação será melhor discutida e analisada no próximo capítulo.

Pela Figura 18b, não é possível identificar nenhum giro claro e completo no transecto, mas podemos perceber uma tendência de fluxo norte próximo ao fundo e fluxo sul na superfície. Essa tendência tem a mesma característica do giro anti-horário encontrado na quadratura, sendo que as velocidades apresentadas aqui durante a sizígia são mais fortes. Pela figura, percebe-se que durante essa sizígia há uma predominância do fluxo sul, principalmente próximo ao canal. Considerando que nessa região o fluxo longitudinal é de leste, poderíamos supor que a tendência do fluxo é retirar o sedimento.

4.3.2. Período Chuvoso

4.3.2.1. Quadratura

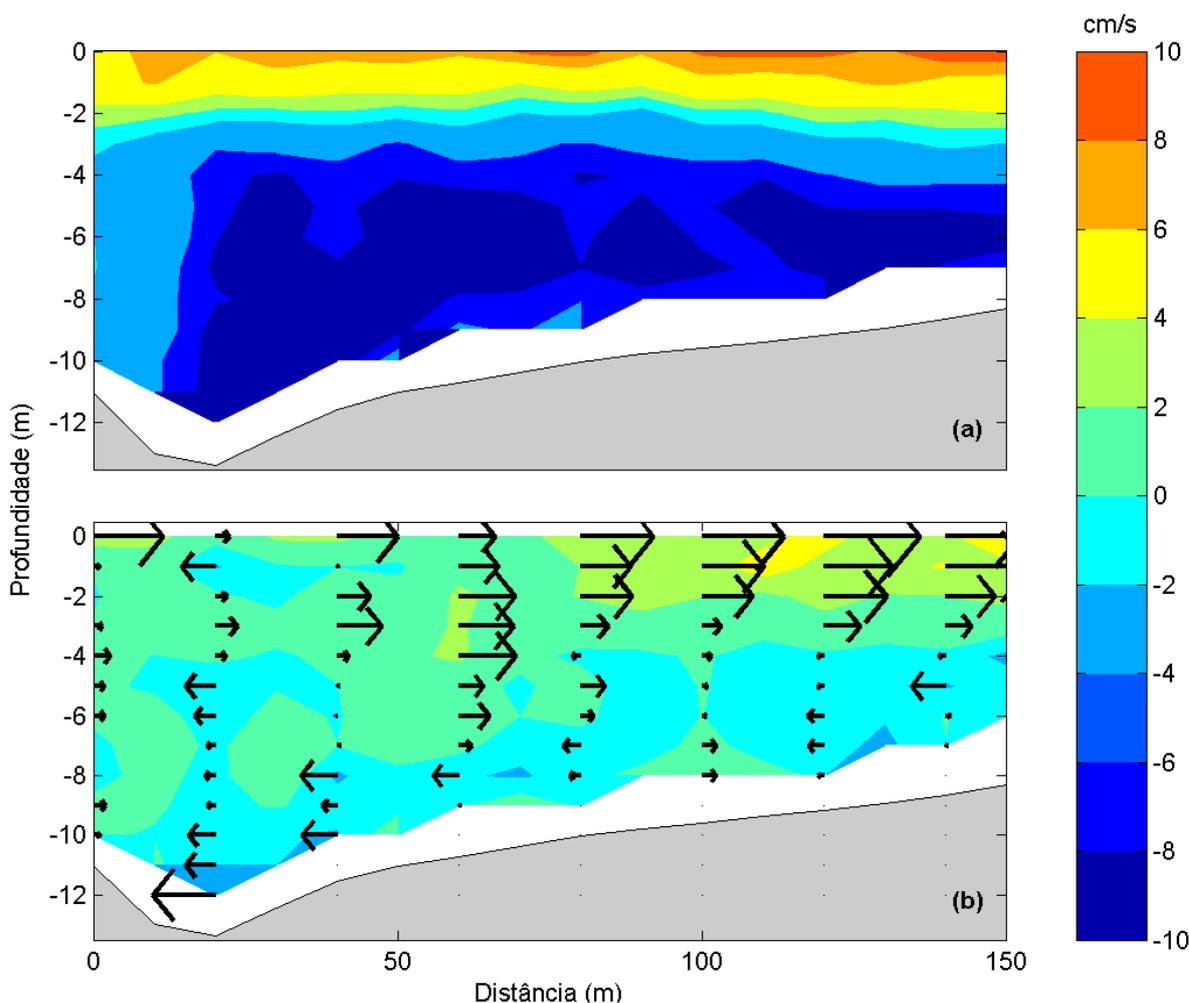


Figura 19 – Residual Quadratura Chuvosa (RQC): Fluxo residual para o dia 20 de julho. (a) velocidade longitudinal (oeste-leste); e (b) velocidade transversal (norte-sul).

A Figura 19a apresenta o fluxo residual longitudinal ao canal, sendo representado por duas camadas principais de fluxo, igual à circulação gravitacional. O fluxo oeste (“entrando” no estuário) é predominante na coluna d’água, confinando o fluxo leste à superfície. Diferente da situação encontrada na quadratura seca, durante essa fase não podemos ver uma indicação bem marcada da fricção, sendo que o perfil encontra-se verticalmente cisalhado, e não horizontalmente.

Já a Figura 19b, que representa o fluxo residual transversal, mostra uma situação inversa a encontrada durante o período seco, com a formação de um giro horário na seção, com as maiores velocidades na superfície. A convergência, na superfície, para a margem norte é forte nesse período.

4.3.2.2. Sizígia

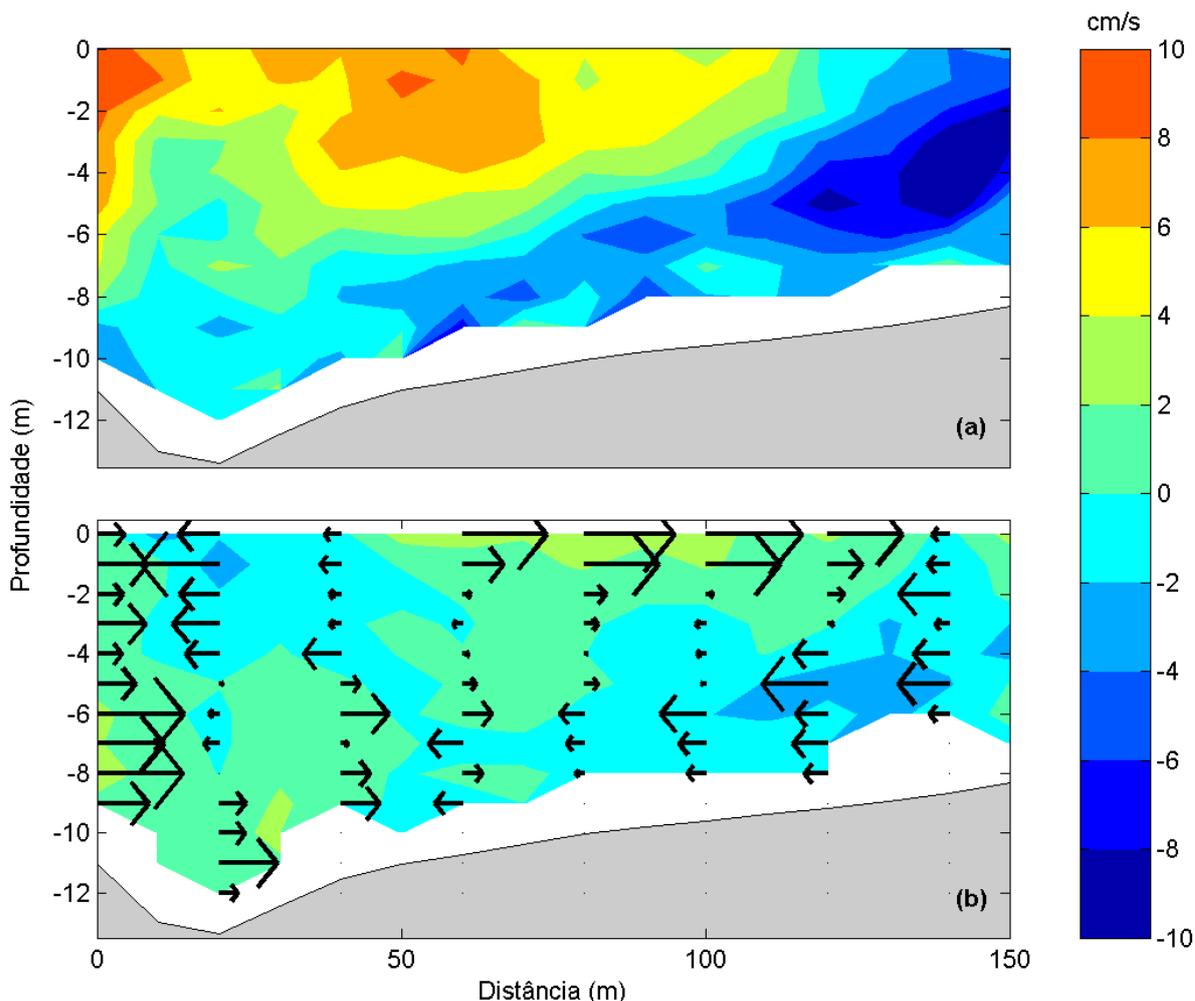


Figura 20 – Residual Sizígia Chuvosa (RSC): Fluxo residual para o dia 26 de julho. (a) velocidade longitudinal (oeste-leste); e (b) velocidade transversal (norte-sul).

A circulação apresentada na Figura 20a apresenta, mesmo em um estuário homogêneo, o fluxo conforme o esperado para regiões dominadas por gradientes de densidade (água mais densa se movimentando pelo fundo e água menos densa pela superfície). O fluxo predominante é de oeste (“entra”), sendo concentrado principalmente no fundo e na margem norte. Há um fluxo leste (“sai”) na superfície, próximo ao canal e à margem sul, mas os valores são bem inferiores se comparados ao fluxo de oeste.

A Figura 20b apresenta o fluxo residual transversal. É possível perceber um giro horário na região mais rasa, próximo à margem norte. Esse giro pode ser explicado pela interação entre a maré e a fricção com o fundo, que altera o padrão de circulação nessa região. No canal é possível perceber uma leve convergência do

fluxo próximo à margem sul. A zona intermediária interage com a margem norte na formação do giro horário.

5. Discussão

5.1. Parâmetros físico-químicos

A seção estudada representou as características esperadas de acordo com os trabalhos pretéritos. O sistema encontra-se bem misturado ou fracamente estratificado, dependendo das condições de maré e deságue de água doce. Barroso (2004) e Melado (2011) já haviam observado esse comportamento. Além disso, os parâmetros físico-químicos obtidos nessa região são muito parecidos aos encontrados no braço sul (Piraquê-mirim) para o mesmo período amostrado, estudados por Neves (2010). A semelhança é tanto em questão de valores quanto em relação ao comportamento (estratificação e mistura).

Considerando a salinidade, para o período seco o valor máximo de salinidade encontrado no braço sul estava presente apenas no perfil T2 da seção inferior, podendo ser um indício de que a intrusão salina ocorre principalmente na região intermediária, não no canal. Já para o período chuvoso, os valores encontrados no braço sul são inferiores aos valores encontrados no canal, o que era esperado, considerando que o deságue de água doce limita (ou diminui) a entrada de água marinha no estuário. Mesmo com valores inferiores aos da seção inferior, o braço sul apresentou também no período chuvoso um comportamento bem parecido com essa região.

Em relação a temperatura, é possível supor que esta parte do sistema não teve nenhuma alteração realmente significativa nos dois períodos, sendo que as menores temperaturas encontradas durante o período chuvoso são congruentes com o fato de ser no período de inverno. Além disso, as baixas temperaturas no período

chuvoso, assim como a homogeneidade temporal, provavelmente estão relacionadas ao deságue fluvial, maior nesse período.

Os valores de anomalia da densidade, comparando a seção inferior com o braço sul, encontraram-se sempre inferiores no braço sul, mas com uma diferença bem pequena. O comportamento de estratificação e variação de acordo com a passagem da onda de maré foi praticamente o mesmo nas duas regiões, como uma leve defasagem de alguns minutos.

Um estuário é considerado fracamente estratificado (ou parcialmente misturado) quando está sob uma forte a moderada ação mareal e um fluxo fraco a moderado de água fluvial. Essas condições estão presentes durante as marés de quadratura para os dois períodos, indicando que o SEPAPM apresenta correntes de maré moderadas e fluxo fluvial fraco (período seco) a moderado (período chuvoso) nessas épocas. Muitos estuários em climas temperados, como *Chesapeake Bay*, *Delware Bay* e *James River* (todos no leste dos Estados Unidos) se enquadram nessa mesma classificação (VALLE-LEVINSON, 2010).

Além disso, o perfil vertical de salinidade, nessas condições, geralmente apresenta duas situações distintas ao longo do ciclo de maré: maior mistura com uma pycnoclina bem próxima a superfície durante a enchente e uma coluna mais estratificada ao longo da enchente. Esse padrão de comportamento ao longo do ciclo estuarino pode ser muito bem explicado pelo processo de *tidal straining*, um dos principais forçantes da variabilidade estuarina relacionada ao ciclo de maré. O mesmo comportamento já foi observado em outros estuários que possuem características semelhantes (estuários curtos dominados por maré), como é o caso do *Pitipalena Estuary*, no Mar Chileno (CACERES *et al.*, 2003). A estratificação periódica causada pelo *tidal straining* é representada pela sigla SIPS (*strain-induced periodic stratification*). *Long Island Sound* (em algumas regiões), *York River*, *San Francisco Bay* e o estuário do rio Amazônia apresentam condições de SIPS durante marés de sizígia (WHITNEY *et al.*, 2012).

O *tidal straining* é um processo conhecido e comum nos estuários, principalmente quando estes são dominados pela maré. Foi melhor estudado e apresentado por Simpson *et al.* (1990) como um dos mecanismos de controle da estratificação estuarina. O papel do *tidal straining* em criar assimetrias na mistura turbulenta gerada por maré tem sido muito bem documentada por dados observacionais (NEPF e GEYER, 1996; SIMPSON *et al.*, 2005; STACEY e

RALSTON, 2005; SCULLY e FRIEDRICH, 2007) e simulações numéricas (SIMPSON *et al.*, 2002; LI *et al.*, 2008).

Melado (2011) percebeu que, para a quadratura nos dois períodos, durante a maré de enchente a coluna d'água apresentava condições de fraca estabilidade vertical ($2 \leq RiL \leq 20$), resultando um baixo grau de estratificação da salinidade. A partir da preamar, em ambos os períodos da quadratura, foi observada uma tendência a estratificação da coluna d'água ($RiL > 20$). Esse resultado previamente apresentado corrobora com o processo de *tidal straining* acima explicado.

Durante a sizígia para as duas estações, a situação é de alta força mareal, o que resulta num estuário verticalmente misturado, mesmo com uma descarga fluvial moderada como ocorre no período chuvoso. O perfil de salinidade médio em estuários bem misturados é praticamente uniforme, sendo que geralmente em estuários rasos e curtos o influxo de salinidade pode ocorrer somente durante a enchente. Partes do baixo *Chesapeake Bay* podem exibir esse comportamento no início do outono, assim como o *North Inlet*, em *South Carolina* (KJERFVE, 2013), o estuário do rio Jaguaribe, no Ceará (MARINS *et al.*, 2003), o estuário *Conwy*, em North Wales, no Reino Unido (TURRELL *et al.*, 1996), entre outros.

A estratificação vista nos perfis T1 e T2 no fim da vazante está relacionado ao processo de *tidal straining*. Durante a maré vazante, a velocidade na coluna d'água declina verticalmente em função do cisalhamento com o fundo, do pouco atrito na camada superficial e do próprio fluxo de água doce proveniente dos rios que aumentam a velocidade da maré nessa fase. Essa diferença de velocidades na maré vazante entre a superfície e o fundo altera a configuração das isohalinas, inclinando-as em direção ao oceano. Esse processo não é percebido durante o período seco porque o gradiente de estratificação horizontal é pequeno para que o processo seja visto, ou seja, a inclinação gerada por *tidal straining* nas isohalinas, na região observada do canal, é negligenciável. No entanto, durante o período chuvoso, com o aumento da descarga fluvial, o gradiente de estratificação horizontal também aumenta (a distância horizontal entre diferentes isohalinas diminui), permitindo que o processo de *tidal straining* não só se intensifique como gere a estratificação nesse período. Com o início da maré de enchente o processo é interrompido e tende a ser invertido, aumentando a mistura.

5.2. Maré

O padrão encontrado na amplitude está de acordo com o padrão suposto, a maré propagando-se praticamente homogênea ao longo de todo o perfil sendo reduzida próxima as margens devido ao atrito com as bordas. Esse padrão está presente nas quatro situações amostradas, com algumas diferenças entre as diferentes estações e os ciclos. Além disso, considerando a relação entre a amplitude e a velocidade das correntes, a diferença de fase apresentada indica que a onda de maré no estuário é uma composição complexa de ondas progressivas e estacionárias (MIRANDA *et al.*, 2002), no entanto, tendendo a ser mais progressivas do que estacionárias.

Para as quadraturas, o comportamento foi bem semelhante, tendo a média de valores bem próximos. O máximo de amplitude da maré no período seco da sizígia não se encontra exatamente em cima do canal devido ao coeficiente de atrito gerado pela alta inclinação que existe na margem sul do canal. Essa inclinação elevada em relação ao ambiente estudado causa uma maior fricção na corrente de maré, diminuindo a amplitude próxima à margem sul no canal.

Para as sizígias, apesar de semelhante, é evidente a maior velocidade das correntes durante o período seco. Isso se deve tanto pela ausência de fluxo fluvial (permitindo uma maior propagação da maré) quanto pela diferente fase de sizígia entre as duas amostragens (no período seco estava próximo ao equinócio de outono, quando a maré na região estaria máxima). Apesar de ambas apresentarem-se na sizígia de lua nova, a primeira possui uma amplitude maior do que a segunda.

Os maiores valores de amplitude de maré são encontrados durante o período seco, o que era esperado, pois com a baixa vazão fluvial nesse período, a maré encontra uma “barreira” menor, permitindo que a onda de maré entre no estuário mais forte e se propague por maiores distâncias. Esse fato pode, inclusive, ser comprovado ao comparar os dados de salinidade entre a região do canal e o braço sul, como explicado na seção anterior.

Segundo Oliveira (2012), a corrente de maré tende a ser homogênea ao longo de toda a região do transecto, sendo menor apenas nas margens. No entanto, o trabalho apenas considerou a linha de costa do estuário, não sendo considerado a

influência batimétrica na onda. Mesmo assim, para o período chuvoso a onda de maré comporta-se como o modelado por Oliveira (2012).

Com exceção da sizígia seca, a correlação para o fluxo transversal nos períodos foi muito baixo, indicando que o que controla esse fluxo não é a maré, mas sim os fluxos de maior frequência. Portanto, provavelmente os giros que ocorrem na circulação residual (melhor discutida na próxima seção) são provenientes da interação entre morfologia e deságue fluvial, não sendo gerados diretamente pelos efeitos da maré. A alta correlação durante a sizígia seca, no entanto, pode estar relacionada com o comportamento atípico do fluxo residual encontrado nessa região, indicando que os efeitos de frequências submareais alteraram o padrão de circulação de maneira que a maré passou a ser predominante na circulação lateral.

5.3. Fluxo Residual

Estudos pioneiros do fluxo residual nos estuários focaram principalmente no efeito dos eventos submareais e sugerem que as correntes residuais estuarinas são resultados principalmente do gradiente de pressão baroclínico longitudinal, mesmo em estuários bem misturados ou fracamente estratificados. (PRITCHARD, 1956; HANSEN e RATTRAY, 1965; CHATWIN, 1976; MACCREADY, 2004). Apesar do fluxo residual apresentado durante a sizígia no período seco não estar conforme o padrão de duas camadas gerado pelo gradiente baroclínico de pressão longitudinal (circulação gravitacional clássica), os padrões de fluxos residuais encontrados nas outras situações indicam que o fluxo residual no SEPAPM é principalmente dominado/controlado pelos gradientes longitudinais baroclínicos.

A circulação gravitacional é representada pelo modelo de duas camadas, com um fluxo em direção ao oceano (saindo do estuário) na superfície e fluxo em direção a montante (entrando no estuário) junto ao fundo. Essa configuração clássica é devido aos diferentes valores de densidade do oceano e da foz do estuário, sendo que eles diminuem à medida que nos afastamos da desembocadura. A água proveniente da montante do estuário, por ter menor densidade, tenderá a “cobrir” a água proveniente do oceano, gerando assim o modelo de duas camadas classicamente encontrado.

Esse modelo é visto muito bem demarcado principalmente durante as quadraturas, com a separação vertical das duas camadas ao longo de todo o transecto. Durante a quadratura seca, além de apresentar a circulação gravitacional clássica, é possível perceber uma tendência a estratificação horizontal, processo comum em ambientes com alta fricção (WONG, 2004). Ambientes dominados pela fricção tendem a ter o fluxo de saída de água estuarina pelas margens mais rasas e o fluxo de entrada pelos canais, ao longo de toda a coluna d'água. Em ambientes com alta fricção essa separação é total e completamente horizontal (ARNOTT *et al.*, 2012), sendo que esse fluxo tende a ter um cisalhamento tanto vertical quanto horizontal a medida que a fricção do ambiente diminui.

Já para a quadratura chuvosa, a estratificação é puramente vertical e a entrada de água é predominante, ocupando quase toda a coluna d'água. A circulação gravitacional está presente, sendo que o fluxo leste, como dito anteriormente, está concentrado principalmente bem próximo a superfície. Por ser um período chuvoso, esperava-se uma camada maior de fluxo leste do que o apresentado. No entanto, o predomínio de entrada de água no estuário pode estar relacionado com algum fenômeno *offshore*, provavelmente associado a um acúmulo de água na desembocadura do estuário que impulsionou a maior entrada nesse período.

Durante a sizígia chuvosa, quando o gradiente de densidade no estuário está maior, devido a maior entrada de água doce, o padrão clássico de fluxo residual está presente nos dados encontrados, mas com indícios de que há uma modificação ocasionada pela topografia da região. Ou seja, nós temos um fluxo “entrando” pelo fundo e “saindo” pela superfície, o que está de acordo com a circulação gravitacional como era esperado, no entanto a estratificação horizontal indica uma modificação no fluxo gerada pela curvatura do estuário.

Segundo estudos prévios (WONG, 2004) e como foi visto durante a quadratura seca, era para o fluxo oeste estar concentrado na parte profunda e o fluxo leste na parte rasa, devido a maior fricção que tende a separar horizontalmente a circulação gravitacional de acordo com a batimetria. No entanto, está acontecendo o contrário, indicando que não é a fricção propriamente dita da batimetria do local do transecto interagindo com a circulação gravitacional gerada. Outras possibilidades seriam a ação de Coriolis na circulação, que pode alterar o comportamento dela, ou a morfologia do ambiente. Analisando o comportamento esperado caso o fluxo estivesse sendo influenciado por Coriolis, podemos descartar essa força, porque

a direção do fluxo está contrária ao esperado. Ou seja, se Coriolis fosse importante nessa região, o fluxo tenderia a “entrar” próximo a margem sul (a esquerda do movimento, já que estamos no Hemisfério Sul) e a “sair” pela margem norte. Excluídas a fricção e Coriolis, passamos a considerar o efeito da morfologia local, ou seja, o efeito que a curvatura existente um pouco antes da seção amostrada pode causar na circulação gravitacional assim como o efeito do tipo de onda que está interagindo com a batimetria.

O padrão da circulação depende se a onda de maré é progressiva ou estacionária. Para estas, o padrão é representado com um par de giros ocasionados pela entrada de água no canal e saída na região rasa adjacente (Figura 21 – lado direito). Já para ondas de maré progressivas ocorre o contrário, com fluxo saindo no canal e entrando na região rasa (Figura 21 – lado esquerdo). Esse último padrão de fluxo residual é o encontrado no caso do SEPAPM para a sizígia chuvosa.

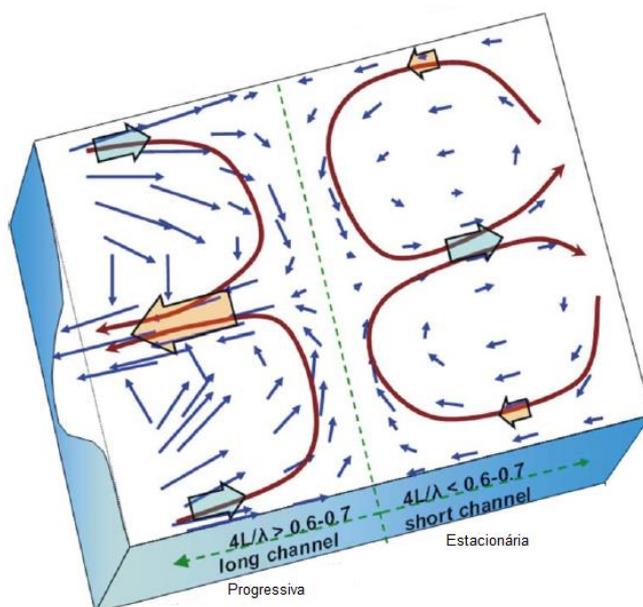


Figura 21 – Desenho esquemático do fluxo residual derivado dos resultados teóricos gerados por Li e O'Donnel (2005) e Winant (2008). O parâmetro indica o comprimento de onda (VALLE-LEVINSON et al., 2009)

Além disso, a morfologia do estuário apresenta uma curvatura após os braços dos rios Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim, assim como a uma batimetria com um canal mais profundo. Esses, então, são os fatores dominantes nessa situação, sendo a razão do fluxo residual na margem norte ser tão forte no sentido oeste. Estudos realizados em outros ambientes estuarinos fracamente estratificados, como o

apresentado por Waterhouse e Valle-Levinson (2010), indicam que a presença de uma curvatura gera uma recirculação do fluxo residual. Portanto, o fluxo residual na situação encontrada, apresenta um giro horário, explicando assim as maiores velocidades em direção ao oceano no canal (região sul, próxima a curvatura e com menos barreiras, onde o fluxo viria “forte” e com vorticidade) e a corrente na margem norte em direção à montante, proveniente da recirculação. A figura 22 apresenta o comportamento das velocidades próximas a uma curvatura encontrada por esses autores. Através dela é possível melhor entender o giro e o comportamento do próprio SEPAPM diante a alta descarga fluvial e força mareal.

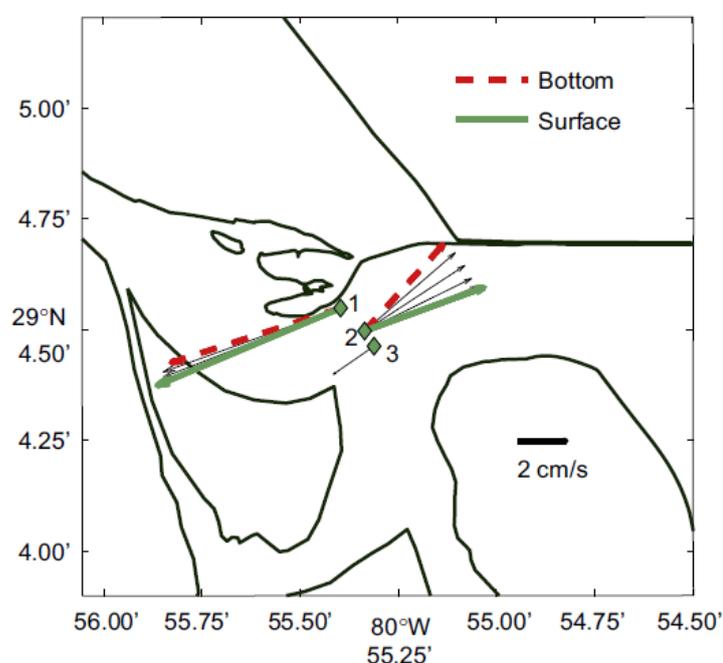


Figura 22 – Vetores do fluxo médio nos três pontos de ADCP realizados em Ponce de Leon Inlet, na Flórida (WATERHOUSE e VALLE-LEVINSON, 2010).

Já o fluxo residual encontrado durante a sizígia seca foi bem diferente do fluxo clássico esperado. Como não há gradiente de pressão baroclínico vertical ou transversal ao perfil, esse fluxo pode estar relacionado (i) ao gradiente de pressão barotrópico, gerado pelas ondas e pelo vento proveniente de uma frente fria que se aproximava da região; (ii) ao vento local que se encontrava em direção ao estuário, provocando assim o tipo de circulação residual vista; (iii) ou ao fluxo residual gerado pela assimetria na mistura gerada pela maré, que como apresentado por Cheng e Valle-Levinson (2010), pode apresentar um fluxo contrário ao clássico quando a assimetria é “reversa” a clássica, ou seja, o coeficiente de viscosidade de borda durante a vazante é maior do que a enchente. As três opções são possíveis, devido

aos dados meteorológicos encontrados na região. Para determinar qual processo é dominante, seria necessário calcular a escala de cada um dos processos, o que não foi realizado nessa dissertação.

Em relação à circulação lateral, vale lembrar que descobertas teóricas indicam que fluxo residual é altamente influenciado pela dinâmica batimétrica entre o canal e a margem mais rasa (LI e O'DONNELL, 2005; WINANT, 2008). Em todas as situações há giros, mostrando uma ativa interação entre o canal e a margem. No entanto, esses giros são opostos nos dois períodos.

Para o período seco, durante os dois ciclos de maré, é possível perceber um giro anti-horário, com as maiores velocidades próximas ao fundo no canal e próximas a superfície. Isso indica uma movimentação de sedimento sendo retirada do canal e transportada para a margem norte, região mais rasa, e o material particulado em suspensão presente na margem norte sendo transportado para a região do canal.

Considerando que a circulação residual longitudinal é dominada principalmente pela circulação gravitacional, isso indica que o material particulado em suspensão nas camadas superficiais está sendo transportado em superfície para o oceano e o sedimento transportado no fundo tem sentido para dentro do estuário. Portanto, é plausível supor que há um *input* de sedimento marinho/costeiro no ambiente estuarino por toda seção transversal pelo fundo e uma exportação de sedimento fluvial em suspensão para o oceano. Esse padrão varia principalmente sob diferentes condições hidrológicas, tendo comportamento diferente nas estações seca e chuvosa. Melado (2011) observou que o SEPAPM comporta-se como um exportador de MPS durante o período seco e importador durante o período chuvoso. Esse comportamento está congruente com os resultados de circulação apresentados nesse estudo.

Para o período seco, é possível perceber uma forte circulação lateral no fundo para o período seco, independente da maré. As maiores velocidades estão concentradas sempre próximas ao fundo, indicando que nesse período o sedimento no fundo é retirado do canal e transportado para as margens, principalmente para a margem norte. É possível também perceber que há o transporte do material particulado em suspensão na superfície para o canal e em direção a margem sul.

Ao considerar a circulação longitudinal da quadratura seca, onde temos uma circulação gravitacional com domínio da fricção, juntamente com a circulação lateral,

e o giro anticiclônico, pode-se concluir que o sedimento que está sendo importado do ambiente marinho, apesar de entrar principalmente pelo canal (onde as velocidades oeste são mais fortes), dali é transportado para a margem norte, indicando que haverá uma grande concentração de sedimento marinho principalmente na região norte do sistema. Considerando também que durante a quadratura seca o ambiente encontra-se com uma coluna d'água menor e uma dinâmica altamente dominada por fricção, é possível concluir que nas margens (regiões rasas) qualquer distúrbio na água pode ocasionar o sedimento que está se acumulando ali a se suspender. Esse sedimento suspenso será transportado tanto para o canal quanto para fora do estuário, caracterizando uma situação de exportação. É importante lembrar também que, segundo Wong (2004), a tendência da velocidade de cisalhar horizontalmente é alta durante esse período (fricção dominando), portanto a tendência ao longo das margens mais rasas será de exportar o sedimento.

Para a sizígia seca, é mais complicado estabelecer um padrão claro porque o que encontramos foi uma situação atípica. No entanto, percebe-se a tendência do ambiente em exportar sedimento, principalmente porque a camada superficial com entrada de água é muito fina e fraca comparada as velocidades de saída no canal. O sedimento que está sendo suspenso na margem norte, pelo giro, é transportado para o canal e tende a ser exportado para o oceano, visto que em praticamente todo o canal temos saída de água. Além disso, a circulação lateral indica uma situação de forte divergência em relação ao fluxo oeste, corroborando a tendência do ambiente, nessas condições, em exportar o sedimento.

Já para o período chuvoso, o giro encontrado é oposto, ou seja, horário. Esse comportamento diferente, que provavelmente está relacionado ao aumento do fluxo fluvial no ambiente, explica o comportamento de importação encontrado por Melado (2010) para o período chuvoso. Com um giro horário, temos o sedimento em suspensão sendo transportado para as margens na superfície e o sedimento próximo ao fundo sendo transportado para o canal. Pelo fluxo lateral é possível perceber uma forte convergência no canal nessa situação.

Para a quadratura chuvosa, a alta importação de sedimento encontrada por Melado (2011) pode estar relacionada também ao fato de ter havido um maior fluxo residual longitudinal de oeste nesse período. O alto *input* de água gerou um grande *input* de sedimentos também. Esse *input* foi tanto no canal (velocidades maiores)

quanto ao longo de toda a margem. Portanto, mesmo quando o sedimento era suspenso e transportado para a margem norte, nessa havia um forte fluxo de oeste importando o sedimento para o estuário.

Na quadratura chuvosa temos, além do giro horário ocasionado pela circulação lateral, o giro ocasionado pela curvatura, que transporta os sedimentos do canal novamente para a margem norte, como explicado na seção anterior. Além disso, as maiores velocidades oeste estão concentradas na margem norte, portanto apesar do alto fluxo fluvial, que deveria gerar exportação de sedimento, o comportamento da circulação é de importação, principalmente ao longo da margem. Essa diferença de comportamento da margem norte ao longo das duas estações é um dos maiores indicativos do comportamento diferenciado do sedimento nos dois períodos.

6. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo analisar a estrutura e a variabilidade dos fluxos mareais e submareais em um canal estuarino sob diferentes condições hidrológicas e de maré. Após a análise e discussão dos resultados, foi possível concluir que, apesar da variação sazonal existente no estuários, padrões de circulação podem ser estabelecidos para o ambiente.

A estratificação estuarina, no SEPAPM, é controlada principalmente pela maré em todas as fases, sendo que durante as quadraturas esse comportamento é minimizado mas ainda predominante.

Mesmo sob diferentes condições hidrológicas (seca e chuva) e de maré (sizígias e quadraturas), o fluxo residual apresentou-se dominado pelo gradiente baroclínico da densidade, ou seja, o fluxo é dominado pela circulação gravitacional. No entanto, a distribuição, tanto horizontal quanto vertical, dessa circulação varia ao longo do ano, dependendo das condições impostas.

Em condições de alta hidrológica, o fluxo é influenciado pela morfologia do canal, principalmente pela curvatura logo após a confluência dos braços do Piraquê-açu e Piraquê-mirim. Já para a seca, a tendência é dos parâmetros de fricção ambiental dominarem, tendendo a homogeneizar verticalmente a coluna d'água e separar horizontalmente.

As amplitudes das correntes de maré apresentam-se sem grandes alterações nos diferentes períodos, quase sempre homogêneas na seção transversal, tanto vertical quanto horizontalmente. A variação horizontal, quando presente, concentra-se com os maiores valores próximos ao canal. Foi notável a diferença de velocidade entre as quadraturas e sizígias, mas apenas com relação a magnitude.

A circulação lateral é a que apresenta maior variação sob diferentes condições hidrológicas, tendo padrões opostos nos dois períodos. Durante o período seco o

ambiente possui um giro anti-horário nessa circulação, que juntamente com a circulação gravitacional, favorece a exportação de sedimento nessa fase. Já o período chuvoso é composta por um giro horário, facilitando a importação de sedimentos, principalmente pela margem norte.

É importante ressaltar que o trabalho apresentado é qualitativo. Desta forma, são sugestões para futuros trabalhos a realização de trabalhos quantitativos da região, com a aplicação de modelos numéricos e analíticos, o estudo dos parâmetros adimensionais aplicáveis aos SEPAPM e análise de escalas dos fenômenos a que o ambiente está exposto.

Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. Séries temporais de estações pluviométricas. Disponível em: www.ana.gov.br/hidroweb. Acessado em 2010.

ALBINO, J. 1999. *Processos de Sedimentação atual e morfodinâmica das Praias de Bicanga a Povoação, ES*. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

ALBINO, J.; GIRARDI, G.; NASCIMENTO, K. A. 2006. Erosão e progradação do litoral do Espírito Santo. In: Muehe, D. (Org.). *Erosão e Progradação do Litoral do Brasil*. Ministério de Meio Ambiente, Brasília, v. 1, p.226-264.

ALBINO, J.; PAIVA, D. S.; MACHADO, G. M. 2001. Geomorfologia, tipologia, vulnerabilidade erosiva e ocupação urbana das praias do litoral do Espírito Santo, Brasil. *Geografares*. Vitória, ES, n. 2. p.7

ALLEN, G. P., SAUZAY, G.; CASTAING, P.; JOUANNEAU, J. M. 1977. Transport and deposition of suspended sediment in the Gironde estuary, France. In: M. WILEY. *Estuarine processes*, Academic Press N.Y., v.2: 63-81.

ANDERSON, F. E. 1972. Resuspension of estuarine sediments by small amplitude waves. *J. sedim. Petrol.* 42: 602-607.

ARIATHURAI, R.; MACARTHUR, R.E.; KRONE, R.B. 1977. Mathematical model of estuarial sediment transport. *Tech. Rep. D-77-12, Environmental Effects Laboratory*, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station: 1-70.

ARNOTT, K. D.; VALLE-LEVINSON, A.; LUTHER, M. 2012. Friction dominated exchange in a Florida estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 113, 248-258.

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

BURCHARD, H.; BAUMERT, H. 1998. The formation of estuarine turbidity maxima due to density effects in the salt wedge: A hydrodynamic process study. *J. Phys. Oceanogr.* 28:209–321

BURCHARD, H.; HETLAND, R. D. 2010. Quantifying the contributions of tidal straining and gravitational circulation to residual circulation in periodically stratified tidal estuaries *J. Phys. Oceanogr.* 40(6), 1243-1262, doi: 10.1175/2012JPO4270.1.

BURCHARD, H.; HETLAND, R. D.; SCHULTZ, E.; SCHUTTELAARS, H. M. 2011. Drivers of residual estuarine circulation in tidally energetic estuaries: straight and irrotational channels with parabolic cross-section. *J. Phys. Oceanogr.* 41: 548–570. doi:10.1175/2010JPO4453.1

CALIMAN, A. 1997. *Projeto de Macrozoneamento Costeiro do Estado do Espírito Santo – Litoral Norte*. Vitória: Instituto Jones dos Santos Neves. p 47.

CAMERON, W. N.; PRITCHARD, D. W. 1963. Estuaries. In: *Goldberg, E. D.; McCave, I. N.; O'Brien, I. I & STEELE, I. H.* eds. *The Sea*. New York, John Wiley & Sons. p. 306-324.

CAMPOS, A. E. M. 2011. *Análise da variabilidade espacial e temporal da pluma do Rio Doce (ES) através de sensoriamento remoto*. Dissertação (mestrado em Oceanografia Ambiental). Departamento de Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória, Brasil.

CÁCERES, M.; VALLE-LEVINSON, A.; ATKINSON, L. 2003. Observations of cross-channel structure of flow in an energetic tidal channel. *Journal of Geophysical Research.* 108, 3114.

CENTRO ESTADUAL DE METEOROLOGIA DA BAHIA (CEMBA). *Monitoramento Mensal de Precipitação*. 12 p. 2010.

CHATWIN, P. C. 1976: Some remarks on the maintenance of the salinity distribution in estuaries. *Estuarine Coastal Mar. Sci.*,4, 555–566.

CHENG, P.; VALLE-LEVINSON, A. 2009. Spatial variations of flow structure over estuarine hollows. *Cont. Shelf Res.*, 29, 927–937.

CHENG, P.; VALLE-LEVINSON, A. DE SWART, H. E. 2010. Residual currents induced by asymmetric tidal mixing in weakly stratified narrow estuaries. *J Phys Oceanogr.*, 40:2135–2147. doi:10.1175/2010JPO4314.

CHENG, P.; VALLE-LEVINSON, A.; DE SWART, H. E. 2011. A numerical study of residual circulation induced by asymmetric tidal mixing in tidally dominated estuaries. *Journal of Geophysical Research* 116, C01017, doi:10.1029/2010JC006137.

DALRYMPLE, R. W.; RHODES, R. N. 1995. Estuarine dunes and bars. In: PERILLO, G. M. E. (org.). *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Developments in Sedimentology*. n . 53, Elsevier Science, p.359-422.

DAVIES, A. G.; Brown, J. M. 2007. Field measurement and modelling of scour pit dynamics in a sandy estuary. *Coastal Sediments*, 1–14.

DRONKERS, J. 1986. Tide-induced residual transport of fine sediment. In: J. VAN DE KREEKE. *Proceedings of the Symposium on the physics of shallow bays and estuaries*, Miami. Springer Verlag

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

FEITOZA, L. R.; CASTRO, L. L. F. de; RESENDE, M.; ZANGRANDE, M. B.; STOCKING, M.; BOREL, R. M. A.; FULIN, E. A.; CERQUEIRA A. F.; SALGADO, J. S.; FEITOZA, H. N.; STOCK L. A.; DESSAUNE FILHO, N. 1997. Map of natural units of Espirito Santo State, Brasil. Enschede. *Instrumental Transcommunication Journal*, (3/4): p.1-38.

FEITOZA, L. R.; STOCKING, M.; RESENDE, M. 2000. *Natural Resources Information Systems for Rural Development: Approaches for Espírito Santo State, Brazil*. Vitoria, ES. INCAPER, p.200.

FESTA, J. P.; HANSEN, D. V. 1976. Turbidity maxima in partially mixed estuaries: a two-dimensional numerical model *Estuar, coast, mar. Sci.* 7: 347-359.

FRIEDRICHS, C. T.; Aubrey, D. G. 1988. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Est. Coast. Shelf Sci.* 27, 521–545.

FRIEDRICHS, C. T.; HAMRICK, J. M. 1996. Effects of channel geometry on cross-sectional variation in along channel velocity in partially stratified estuaries. *Buoyancy Effects on Coastal and Estuarine Dynamics*, ed. DG Aubrey, CT Friedrichs, 53:283–300. Washington, DC: Am. Geophys. Union

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.

GEYER, W. R.; TROWBRIDGE, J. H.; BOWEN, M. M. 2000. The Dynamics of a Partially Mixed Estuary. *Journal of Physical Oceanography*, 30, 2035-2048.

GUO, X.; VALLE-LEVINSON, A. 2008. Wind effects on the lateral structure of density-driven circulation in Chesapeake Bay. *Continental Shelf Research*, 28, 2450-2471.

HANSEN, D. V.; RATTRAY, M. 1965. Gravitational circulation in straits and estuaries. *J. Mar. Res.* 23:104–22

HANSEN, D. V.; RATTRAY, M. 1966. New dimensions in estuary classification. *Limnol. Oceanogr.* 11(3):319–26

JAY, D. A.; MUSIAK, J. D. 1996. Internal Tidal Asymmetry in Channel Flows: Origins and Consequences. *Coastal and Estuarine Studies*, 50, 211-249.

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

LERCZAK, J.A.; GEYER, W. R. 2004. Modeling the lateral circulation in straight, stratified estuaries. *J Phys Oceanogr*, 34:1410–1438

LI, C.; O'DONNELL, J. 2005. The effect of channel length on the residual circulation in tidally dominated channels. *Journal of Physical Oceanography*, 35, 1826-1840.

LI, M.; Trowbridge, J.; Geyer, R.; 2008: Asymmetric tidal mixing due to the horizontal density gradient. *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 418–434.

LEITE, T. A. 2012. *Variação espacial e temporal da salinidade no sistema estuarino do rio Piraquê-Açu (Aracruz, es)*. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

LWIZA, K. M. M.; Bowers, D. G.; Simpson, J. H. 1991. Residual and tidal flow at a tidal mixing front in the North Sea, *Cont. Shelf Res.*, 11, 1379–1395.

MACCREADY, P. 2004: Toward a unified theory of tidally-averaged estuarine salinity structure. *Estuaries*, 27, 561–570.

MACCREADY, P. 2007: Estuarine adjustment. *J. Phys. Oceanogr.*, 37, 2133–2145.

MACCREADY, P.; GEYER, W. R. 2010. Advances in Estuarine Physics. *Annual Review of Marine Science*. Vol. 2: 35-58. DOI: 10.1146/annurev-marine-120308-081015

MARINS, R. V.; LACERDA, L. D.; ABREU, I. M.; Dias, F. J. S. 2003. Efeitos da açudagem no Rio Jaguaribe. *Ciência Hoje*. Vol.33. (197): p. 66-70, 2003

MCDOWELL, D. M.; O'CONNOR, B.A. 1977. Hydraulic behaviour of estuaries. *Civil engng hydraul. Series*, MacMillan, London: 1-292.

MELADO, A. S. S. G. 2010. *Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão na desembocadura do sistema estuarino Piraquê-açu e Piraquê-mirim, Aracruz – ES*. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. 2002. *Princípios de oceanografia física de estuários*. São Paulo, EDUSP.

NEPF, H. M.; Geyer, W. R. 1996: Intratidal variations in stratification and mixing in the Hudson estuary. *J. Geophys. Res.*, 101 (C5), 12 079–12 086.

NEVES, R. C. 2010. *Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão nos dois braços do sistema estuarino Piraquê-açu e Piraquê-mirim, Aracruz - ES*. Monografia de Conclusão d Curso em Oceanografia. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

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

NÓBREGA, N. E. F.; SILVA, J. G. F.; RAMOS, H. E. A.; PAGUNG, F. S. 2008. Análise da distribuição sazonal e espacial da precipitação no sul do estado do Espírito Santo. *Anais do XV Congresso Brasileiro de Meteorologia*. São Paulo. P.5.

ODD, N. C. M.; OWEN, N. W. 1972. A two layer model of mud transport in the Thames estuary. *Proc. Inst. civ. Engng, Suppl.* paper 7517S: 175-205.

OLIVEIRA, K. S. S. 2012. *Comportamento da Maré e das Correntes de Maré em um Sistema Estuarino utilizando o modelo Regional Ocean Modeling System (ROMS)*. Monografia de Conclusão d Curso em Oceanografia. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

POSTMA, H. 1967. Sediment transport and sedimentation in the marine environment. In: G.H. LAUFF. *Estuaries, Am. Ass. Adv. Sci.*, Washington: 158-179.

PRITCHARD, D. W. 1952. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuaries system. *J. Mar. Res.* 11:106–23

PRITCHARD, D. W. 1954. A study of the salt balance in a coastal plain estuary. *J. Mar. Res.* 13:133–44

PRITCHARD, D. W. 1956. The dynamic structure of a coastal plain estuary. *J. Mar. Res.* 15:33–42

QUARESMA, V. S. *et al.* 2007. Sedimentary Processes over intertidal flat: A field investigation at Hythe flats, Southampton Water (UK). *Mar. Geol.*

RICHARDS, C. 2004. The Basics of Estuarine Circulation, and the Contributions of an Internal Tidal Asymmetry. Disponível em: <myweb.dal.ca/cl487279/school/estuarine_circulation.pdf> Acesso em: 20 abr. 2010.

SCULLY, M. E.; FRIEDRICHS, C. T. 2007: The importance of tidal and lateral symmetries in stratification to residual circulation in partially mixed estuaries. *J. Phys. Oceanogr.*, 37, 1496–1511.

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

SIMPSON, J. H.; Brown, J.; Matthews, J.; Allen, G. 1990: Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries*, 13, 125–132.

SIMPSON, J. H.; Burchard, H.; Fisher, N. R.; Rippeth, T. P. 2002: The semidiurnal cycle of dissipation in a ROFI: Model-measurement comparisons. *Cont. Shelf Res.*, 22, 1615–1628.

SIMPSON, J. H.; Williamsa, E.; Brasseurb, L. H.; Brubakerb, J. M. 2005: The impact of tidal straining on the cycle of turbulence in a partially stratified estuary. *Cont. Shelf Res.*, 25, 51–64.

STACEY, M. T.; RALSTON, D. K. 2005: The scaling and structure of the estuarine bottom boundary layer. *J. Phys. Oceanogr.*, 35, 55–71.

Tábuas de Maré. Diretoria de hidrografia e Navegação (DHN). <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/index.htm>> Acesso em 14 de julho de 2010.

TURRELL, W. R.; BROWN, J.; SIMPSON, J. H. 1996. Salt intrusion and secondary flow in a shallow, well-mixed estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 42, 153–169.

VALLE-LEVINSON, A.*et al.* 1998. Flow patterns at the Chesapeake Bay entrance. *Continental Shelf Research*, 18, 1157–1177.

VALLE-LEVINSON, A.; Atkinson, L. P. 1999. Spatial gradients in the flow over an estuarine channel. *Estuaries*, 22, 179–193.

VALLE-LEVINSON, A.; REYES, C.; SANAY, R. 2003. Effects of bathymetry, friction, and rotation on estuary–ocean exchange. *Journal of Physical Oceanography*, 33, 2375–2393.

VALLE-LEVINSON, A. 2008. Density-driven exchange flow in terms of the Kelvin and Ekman numbers. *J. Geophys. Res.* 113:C04001; doi:10.1029/2007JC004144

VALLE-LEVINSON, A.; GUO, X. 2009. Asymmetries in tidal flow over a Seto Inland Sea scour pit. *Journal of Marine Research*, 67.

VALLE-LEVINSON, A. 2010. *Contemporary Issues in Estuarine Physics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

WATERHOUSE, A. F.; VALLE-LEVINSON, A. 2010. Transverse structure of subtidal flow in a weakly stratified subtropical tidal inlet. *Continental Shelf Research*, 30, 281-292.

WONG, K. C. 1994. On the nature of transverse variability in a coastal plain estuary. *Journal of Geophysical Research*. 14, 209-222

SILVA, A. E.; QUARESMA, V. S.; BASTOS, A. C. 2013. Sedimentological Sectorization of An Estuarine System In A Regressive Coast, Southeast Brazil. *Journal of Sedimentary Research*.

STACEY, M. T.; FRAM, J. P.; CHOW, F. K. 2008. Role of tidally periodic density stratification in the creation of estuarine subtidal circulation. *Journal of Geophysical Research*, 113, C08016. DOI: 10.1029/2007JC004581.

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

WINANT, C. D. 2008. Three-dimensional residual tidal circulation in an elongated, rotating basin. *Journal of Physical Oceanography*, 38, 1278–1295.

WHITNEY, M. M.; CODIGA, D. L.; ULLMAN, D. S.; Mcmanus, P. M.; JIORLE, R. 2012: Tidal Cycles in Stratification and Shear and Their Relationship to Gradient Richardson Number and Eddy Viscosity Variations in Estuaries. *J. Phys. Oceanogr.*, 42, 1124–1133. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JPO-D-11-0172.1>