



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E LIMNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

TAINÁ COSTA MAIA

**CORRENTES E ESTRUTURA TERMOHALINA NO COMPLEXO PORTUÁRIO
DE SÃO LUÍS (CPSL) AO LONGO DE UM CICLO DE MARÉ**

São Luís

2018

TAINÁ COSTA MAIA

**CORRENTES E ESTRUTURA TERMOHALINA NO COMPLEXO PORTUÁRIO
DE SÃO LUÍS (CPSL) AO LONGO DE UM CICLO DE MARÉ**

Monografia apresentada ao curso de graduação de Oceanografia, da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias

Co-Orientador: Hugo Pereira Lima

São Luís

2018

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Maia, Taina Costa.

Correntes e estrutura termohalina no Complexo Portuário de São Luís CPSL ao longo de um ciclo de maré / Taina Costa Maia. - 2018.

46 p.

Coorientador(a): Hugo Pereira Lima.

Orientador(a): Francisco José da Silva Dias.

Monografia (Graduação) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Complexo Estuarino de São Marcos. 2. Energia potencial. 3. Massas de água. 4. MPS. 5. Região portuária. I. Dias, Francisco José da Silva. II. Lima, Hugo Pereira. III. Título.

TAINÁ COSTA MAIA

**CORRENTES E ESTRUTURA TERMOHALINA NO COMPLEXO PORTUÁRIO
DE SÃO LUÍS (CPSL) AO LONGO DE UM CICLO DE MARÉ**

Monografia apresentada ao curso de
Graduação em Oceanografia, da
Universidade Federal do Maranhão,
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Bacharel em Oceanografia.

Aprovada em: ___/___/___

Banca Examinadora

Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias
Vice-Diretor do Instituto de Ciências do Mar - ICMar
Universidade Federal do Maranhão
Orientador

Prof. Dr. Audalio Rebelo Torres Junior
Diretor do Instituto de Ciências do Mar - ICMar
Universidade Federal do Maranhão

Prof.^a Dr.^a Marianna Basso Jorge
Coordenadora do Laboratório de Ecotoxicologia - LabEcotox
Universidade Federal do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, meus pais Jorgevaldo e Maria dos Reis e meu irmão, Ednei, pelo apoio em todo o período universitário, incentivando-me a continuar e sempre fornecendo sugestões de como proceder nesta fase da minha vida.

Agradeço imensamente ao Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias, que me acompanhou ao longo de toda minha trajetória no curso e foi o primeiro a acreditar no meu potencial mesmo quando ninguém acreditava, proporcionando diversas oportunidades e conselhos que levaram à realização deste trabalho.

Ao meu namorado Allan pelo incentivo e disposição, sempre apto a ouvir minhas dificuldades e desabafos, fornecer opiniões, incentivar a estudar e cumprir com minhas obrigações.

À equipe do Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores – LHiCEAI – UFMA pela grande ajuda e contribuição através de seus conhecimentos. Cada um de vocês teve um pedacinho na história desse trabalho e na minha vida acadêmica, seja com uma simples frase de apoio ou me ajudando a encontrar e resolver problemas em tantos programas utilizados ao longo desses anos.

Aos amigos dentro e fora do curso que se mantiveram ao meu lado ao longo de todos esses anos, especialmente aos que estavam sempre dispostos a ouvir desabafos e contribuíram para que eu me mantivesse firme em minha decisão.

À agência de fomento à pesquisa CNPq pelo financiamento dos projetos nos quais estive inserida ao longo do curso e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC que por meio desta agência de fomento à pesquisa científica me concedeu bolsa. Ao Programa Ciência Sem Fronteiras pela experiência enriquecedora e inesquecível no exterior e à agência de fomento à pesquisa CAPES pelo fornecimento de todo o suporte financeiro necessário para a participação no mesmo.

À Universidade Federal do Maranhão e ao Departamento de Oceanografia e Limnologia pela infraestrutura dada e pelo conhecimento passado através dos professores.

A todas as pessoas que me ajudaram direta ou indiretamente, meu muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar a variabilidade das propriedades hidrográficas e circulação durante um ciclo completo de maré, no período seco, em setembro de 2017, classificar o estuário com o diagrama Estratificação-Circulação proposto por Hansen & Rattray (1966), calcular o transporte resultante de sal e a contribuição relativa dos termos advectivos, de difusão turbulenta e quantificar a distribuição temporal do material particulado em suspensão (MPS). Dados de temperatura, condutividade e densidade foram obtidos com um CTD (*Conductive-Temperature-Depth*), *Exo2*, e processados em laboratório. Para medição das velocidades instantâneas em cada hora foi utilizado um ADCP (Sontek/YSI). As concentrações de MPS foram obtidas por gravimetria e para seus fluxos utilizamos a equação de transporte, segundo metodologia descrita por Miranda (2002). O valor médio encontrado no período amostral foi de 28,78 °C para temperatura e 30,08 gkg⁻¹ para salinidade, com a componente longitudinal de velocidade apresentando maiores valores e velocidade residual predominante em maré vazante. Observou-se homogeneidade da coluna de água e a presença de duas massas de água: Água de Rio (AR) e Água de Frente (AF). O Complexo Estuarino de São Marcos foi classificado como do tipo 1a (bem misturado e fracamente estratificado), dominado por difusão turbulenta e de alta instabilidade vertical de acordo com o número de Richardson por camada. O cálculo da anomalia de energia potencial indicou alto potencial energético. Os elevados valores de MPS indicam proveniência de ressuspensão de material particulado de fundo e erosão das margens.

Palavras-chave:

Complexo Estuarino de São Marcos, região portuária, massas de água, Energia potencial, MPS.

ABSTRACT

The aim of this study was to analyze the variability of hydrographic and circulation properties during a complete tidal cycle in the dry period in September 2017, to classify the estuary with the Stratification-Circulation diagram proposed by Hansen & Rattray (1966), to calculate the salt transport, the relative contribution of the advective terms, turbulent diffusion and quantify the temporal distribution of suspended particulate matter (SPM). The data of salinity and density were obtained with a CTD (Conductivity-Temperature-Depth), Exo2, and processed in the laboratory. To measure the instantaneous velocity in each hour, it was used an ADCP (Sontek/YSI). The SPM concentrations were obtained by gravimetry and for its fluxes it was used the transport equation according to Miranda (2002). The average value found for the sampling period was 28.78 °C for temperature and 30.08 gkg⁻¹ for salinity, with the longitudinal component of velocity showing highest values and predominant residual velocity on ebb tide. It was noticed water column homogeneity and the presence of two water masses: River Water (RW) and Front Water (FW). The Estuarine Complex of São Marcos was classified as type 1a (well mixed and weakly stratified), dominated by turbulent diffusion and high vertical instability according to the Richardson number per layer. The potential energy anomaly estimative indicated high energetic potential. The high SPM values indicate that it might come from particulate matter resuspension and margin erosion.

Keywords:

Estuarine Complex, port region, water masses, potential energy, SPM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Complexo Estuarino de São Marcos.....	12
Figura 2 – Mapa das Bacias e Sistemas Hidrográficos do Maranhão (Fonte: NUGEO/UEMA, 2010).	14
Figura 3 - Série histórica de precipitações médias mensais para a região de São Luís, entre os anos de 1987 a 2017. Dados disponibilizados pelo INMET.	15
Figura 4 - Velocidades de correntes antes e depois da Preamar, no ano de 1977, MORAES (1977).	15
Figura 5 - Mapa da área de estudo com a estação fixa demarcada em vermelho, próximo aos portos da região (Localização: -2.567651 S/ -44.401647 O).	17
Figura 6 – Perfil temporal da temperatura (°C) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h).	27
Figura 7 – Perfil médio de temperatura (°C) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h). Ta é o perfil médio espaço-temporal da temperatura.	27
Figura 8 - Perfil temporal da salinidade (gkg-1) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h).	28
Figura 9 - Perfil médio de salinidade (gkg-1) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h). Sa é o perfil médio espaço-temporal da salinidade.	28
Figura 10 - Diagrama T-S espalhado para o CESM. As isolinhas representam a densidade convencional (σ). Triângulo vermelho – maré vazante; círculo azul – maré enchente.	29
Figura 11 – Perfil temporal da componente longitudinal da velocidade (u) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h).	30
Figura 12 – Perfis médios do componente longitudinal da velocidade ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h); ua é a velocidade residual.	31
Figura 13 – Variação temporal da velocidade média [u(t)] (linha tracejada) na coluna de água e da superfície livre [h(t)] (linha contínua).	32
Figura 14 - Variação temporal da salinidade média [s(t)] (linha tracejada) na coluna de água e da velocidade média [u(t)] (linha contínua).	32
Figura 15 - Variação temporal da salinidade média [s(t)] (linha tracejada) na coluna de água e da superfície livre [h(t)] (linha contínua).	33
Figura 16 – Diagrama de Estratificação-Circulação de Hansen & Rattray (1966).	33
Figura 17 – Variação temporal do número de Richardson por camada.	34
Figura 18 – Componentes do transporte advectivo de sal. Parcelas: descarga fluvial (1); deriva de Stokes (2); correlação de maré (3); circulação gravitacional (4); flutuações turbulentas (5); dispersão de maré (6); circulação residual (7). A soma das parcelas está indicada em (9) e o transporte resultante integrado durante o ciclo de maré em (10).	35
Figura 19 – Perfil temporal do MPS ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h).	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	11
2.1 GERAL	11
2.2 ESPECÍFICOS	11
3. ÁREA DE ESTUDO	12
4. METODOLOGIA	16
4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO	16
4.2 ESTRUTURA TERMOHALINA	16
4.3 DIAGRAMA TS ESPALHADO E MASSAS DE ÁGUA	18
4.4 CORRENTES	19
4.5 DIAGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO DE HANSEN & RATTRAY	21
4.6 NÚMERO DE RICHARDSON POR CAMADA	22
4.7 ANOMALIA DE ENERGIA POTENCIAL (ϕ)	22
4.8 TRANSPORTE ADVECTIVO DE SAL	24
4.9 DETERMINAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS)	25
5. RESULTADOS	26
5.1 ESTRUTURA TERMOHALINA E MASSAS DE ÁGUA	26
5.2 CORRENTES	29
5.3 HIDRODINÂMICA E CLASSIFICAÇÃO DO ESTUÁRIO	31
5.4 ESTABILIDADE DA COLUNA DE ÁGUA	34
5.5 TRANSPORTE DE SAL	34
5.6 DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS)	35
6. DISCUSSÃO	37
7. CONCLUSÃO	41
8. REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

Segundo Pritchard (1955), um estuário é um corpo de água costeiro semifechado, com uma livre ligação com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental. Nestes ambientes os efeitos das marés e correntes associadas sobrepõem-se aos movimentos gerados pela descarga fluvial e pelo componente baroclínico da força de gradiente de pressão, fazendo com que os processos de escoamento assumam características bastante complexas. A oscilação natural do nível do mar e as correntes (maré, vento sinótico e local, densidade, oriundas de correntes de contorno oeste) em movimentos de enchente e vazante são as características mais notáveis dos movimentos das águas nestas regiões. A circulação, processos de mistura e estratificação dependem da geometria, descarga de água doce, intensidade da maré, salinidade, da circulação da região costeira adjacente e de ventos atuantes sobre a superfície livre (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

Os sistemas estuarinos são o principal meio de entrada de nutrientes e materiais oriundos das bacias de drenagem para a plataforma continental adjacente. De acordo com Milliman (1991), os rios contribuem com aproximadamente 70% do aporte total mundial de sedimentos para o oceano. No estado do Maranhão o rio Mearim, por exemplo, é de grande importância, uma vez que sua bacia possui 83 municípios (IBGE, 2010) e percorre aproximadamente 832,18 km até chegar à região costeira (UEMA/NUGEO, 2016), ao sul da Ilha de São Luís. Popularmente conhecida como Baía de São Marcos (BSM), a região recebe o aporte de 5 principais sistemas estuarinos: Rio dos Cachorros, Bacanga e Anil (margem leste) e Rio Aurá e Salgado (margem oeste). Importantes bacias de drenagem, transportam uma quantidade de materiais no gradiente continente-oceano ainda não conhecidas, mas que interferem de forma direta na hidrodinâmica local. Desta forma, denominaremos o local a partir daqui como Complexo Estuarino de São Marcos (CESM).

Desta forma, compreender a dinâmica de sedimentos das bacias de drenagem no gradiente flúvio-marinho tem grande importância, frente a alterações de uso e ocupação dos solos da bacia de drenagem, da pressão humana sobre o desenvolvimento socio-econômico e dos impactos das mudanças climáticas, regionais e globais. Neste contexto, a zona costeira está intrinsecamente ligada a este processo, pois os rios exportam para os oceanos uma grande parte dos materiais incluídos no processo de erosão/deposição (balanço morfo-sedimentar). Assim, a alta produtividade e o balanço ecológico desses ambientes estão

diretamente relacionadas com o aporte desses materiais, trocas flúvio-estuarinas e precipitações pluviométricas (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

Alguns dos processos que ocorrem nessa região podem ser controlados pela dinâmica sedimentar (DYER, 1997). As concentrações de sedimentos suspensos são, geralmente, altas nos estuários e muitos deles apresentam uma zona de máxima turbidez (ZMT), composta principalmente pelo material ressuspendido do fundo ou erosão de margens pela entrada de água marinha no sistema estuarino (JICKELLS; ANDREWS; PARKES, 2016). Os sedimentos em suspensão são geralmente sedimentos finos, coesivos e ricos em matéria orgânica (DYER, 1995) e altamente sensíveis a hidrodinâmica, podendo atuar como superfícies de adsorção para materiais dissolvidos como alguns contaminantes (SIEGLE et al., 2009). A capacidade de renovação de suas águas e o potencial de assimilação de substâncias nele introduzidas dependem de uma série de processos de natureza física, química, biológica e geológica que interagem entre si de forma extremamente complexa (BERGAMO, 2000). Com isso, se faz completamente necessário o estudo desses ambientes altamente dinâmicos, viabilizando a formulação hidrodinâmica para o estudo de circulação, transporte e processos de mistura, auxiliando assim no entendimento desse sistema.

A natureza oscilatória e turbulenta dos movimentos estuarinos gera a necessidade do conhecimento de um movimento resultante, sob condições estacionárias. Dessa forma, introduz-se o conceito de circulação residual, correspondente à corrente resultante após a remoção do movimento oscilatório da maré; esse resultado é alcançado através da média no tempo e espaço das correntes durante um ciclo completo da maré. A circulação residual, por representar condições médias, tem grande importância para o cálculo do transporte advectivo de sal em sistemas estuarinos (DYER, 1997). Um dos métodos utilizados para estudar a cinemática dos fluídos é o proposto por Euler, o qual considera todas as partículas que passam em um determinado ponto de controle (fixo) em um dado volume no espaço, em um dado intervalo de tempo. As informações do escoamento são obtidas então em função do que acontece no ponto de controle.

Outra forma de se entender a hidrodinâmica dos sistemas estuarinos é o estudo das massas d'água. Estas são definidas como uma grande porção de água com um volume mensurável e que ocupam um lugar finito nos oceanos, podendo ocupar um lugar exclusivo ou podem compartilhar o oceano com outras massas de água, onde ocorrerá a mistura das mesmas (TOMCZAK, 1999). Um estudo sobre essas massas de água é muito importante devido a influência que elas exercem nos padrões de circulação e na definição climática,

como o fenômeno do El Niño; na produção dos oceanos; identificação de comunidades de espécies de peixes e/ou planctônicas; no transporte de poluentes e de sedimentos finos através dos oceanos; na navegação e na engenharia oceânica (SPERB et al., 1999). A classificação de massas de água é realizada, basicamente, em função dos parâmetros de Temperatura e Salinidade. Deste modo, a identificação dos valores típicos para cada local é feita com base em estudos prévios (MASCARENHAS; MIRANDA; ROCK, 1971). Uma importante ferramenta na determinação dos índices termohalinos das principais massas de água envolvendo processos de circulação e mistura, nas últimas décadas, é o uso do diagrama T-S espalhado e volumétrico (BINDOFF et al., 2000; EMILSON, 1961; MASCARENHAS; MIRANDA; ROCK, 1971; MIRANDA; CASTRO, 1979; MIRANDA, 1985; OKUNDA, 1962).

Devido ao fato do CISM ser um sistema com forte hidrodinâmica e abrigar o segundo maior complexo portuário da América Latina em termos de movimentação de cargas (AMARAL; ALFREDINI, 2010), torna-se de suma importância os estudos e compreensão do seu comportamento hidrodinâmico. Para isso, devemos levar em consideração estrutura termohalina e as massas de água presentes na região, caracterizando sua influência nesse complexo sistema estuarino. Além do amplo interesse socioeconômico, a região também é utilizada como fonte de renda de pequenas comunidades ribeirinhas. Além disso, estudos sobre o comportamento do MPS na interface continente-oceano são de extrema importância para estimativas corretas das descargas de sedimentos dos rios para os estuários e conseqüentemente para a plataforma continental adjacente, principalmente em ambientes de macro maré. As variações no volume das descargas fluviais influenciam, significativamente, as trocas de sedimentos entre essas regiões, gerando alterações de salinidade e variações de processos erosivos e deposicionais.

2. OBJETIVOS

2.1 GERAL

Determinar a variação temporal do campo de correntes, a estrutura termohalina e a distribuição do material particulado em suspensão (MPS) em um ciclo de maré de quadratura (~13 horas) de um estuário de macromaré localizado na interface Amazônia-Semiárido durante a estação seca do ano de 2017.

2.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar a variação da estrutura termohalina em um ciclo de maré de 13 horas;
- Avaliar o campo de correntes sob a ótica euleriana;
- Classificar o complexo estuarino com base no diagrama de estratificação-circulação de Hansen & Rattray (1986).
- Calcular o número de Richardson por camada, para determinar a estabilidade vertical do escoamento no período seco.
- Determinar quais os componentes mais energéticos associados ao transporte advectivos de sal no período seco.
- Quantificar temporalmente e verticalmente os fluxos de MPS.

3. ÁREA DE ESTUDO

O CESM é um sistema estuarino, altamente dinâmico, localizado no extremo norte do estado do Maranhão (Figura 1), cuja variação do nível da água, provocada pela propagação das ondas longas de gravidade superficiais, podem chegar até 7 metros em maré de sizígia (FEITOSA, 1989).

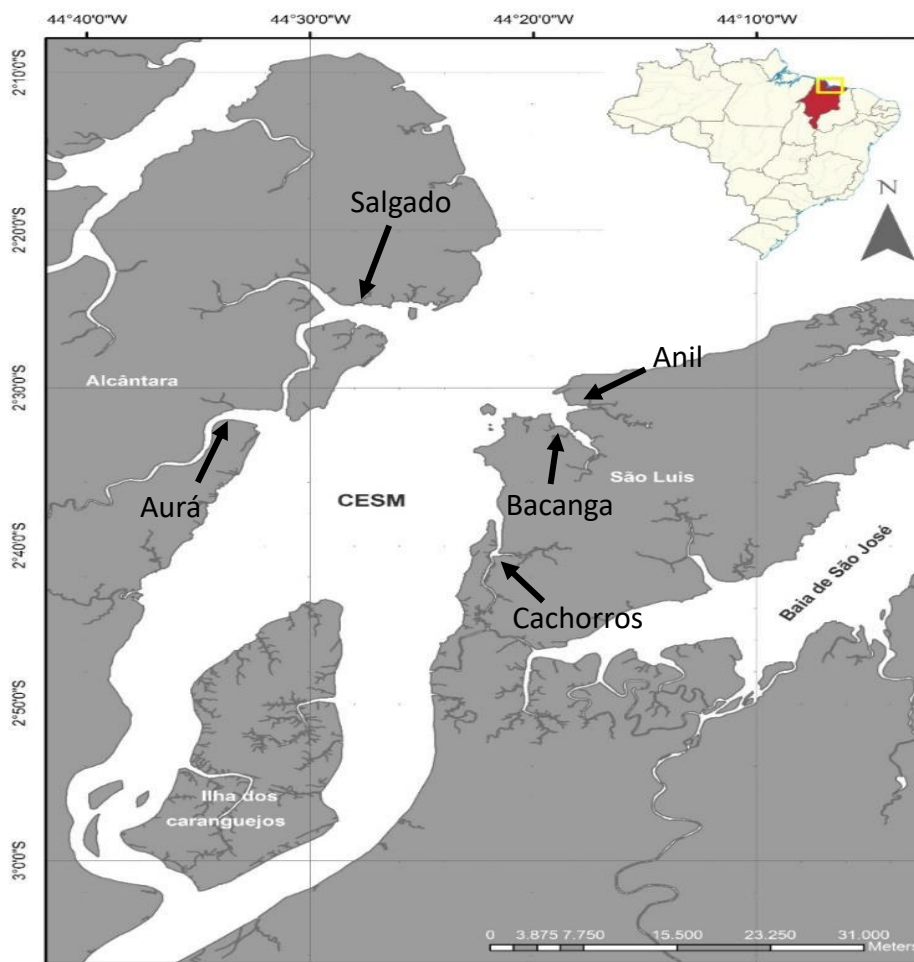


Figura 1 – Complexo Estuarino de São Marcos.

A largura do sistema estuarino varia de 55 km no seu limite norte em direção ao mar, a 13km na sua meia extensão, aumentando para 25km no seu limite sul ao iniciar-se a Ilha dos Caranguejos. Seu comprimento é de aproximadamente 64 km, sendo uma continuação do estuário do Rio Mearim que se bifurca na Ilha dos Caranguejos, além de ser a principal via de acesso ao Complexo Portuário de São Luís (MORAIS, 1977) onde é possível encontrar o Terminal de Ponta da Madeira, o Porto do Itaqui e o Porto da Alumar.

A bacia hidrográfica do rio Mearim (Figura 2) (antes separada em Bacia do rio Pindaré e Bacia do rio Mearim) possui uma área de 99.058,68 km², correspondendo a

29,84% da área total do Estado, sendo a maior entre todas as bacias hidrográficas do mesmo. Nasce na serra da Menina, entre os municípios de Formosa da Serra Negra, Fortaleza dos Nogueiras e São Pedro dos Crentes, recebendo a denominação de ribeirão (Água Boa) e seguindo um longo trajeto na direção Sudoeste-Nordeste, até Esperantinópolis, onde após receber as contribuições do rio Flores, direciona-se para o Norte, até desembocar no CESM, entre São Luís e Alcântara (NUGEO/UEMA, 2016). Este possui uma pequena conexão com o Complexo Estuarino Arraial – São José (CEASJ) através do Estreito dos Mosquitos.

A bacia de drenagem do rio Mearim é considerada como a de maior potencial hídrico superficial do estado, chegando a $13.971,85 \text{ hm}^3\text{ano}^{-1}$ (UEMA/NUGEO, 2010). É possível observar um índice de erosividade anual em torno de $820,0 \text{ t.ha}^{-1}$, valor considerado alto, também observado na região do CESM. Climatologicamente a média anual do potencial de chuvas da região da Bacia do Mearim é 1.511,4 mm, com um valor entre 1200 e 1350 mm para o CESM. Uma característica que merece destaque na Bacia de drenagem do rio Mearim é a de não apresentar deficiência hídrica nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril, por conta da estação chuvosa. A média histórica de deficiência hídrica da Bacia do Mearim, de maio a dezembro é 505,4 mm. A média anual identificada na região do CESM é entre 300 e 200mm, indicando baixa deficiência hídrica (UEMA/NUGEO, 2016). Na figura 3, pode-se observar uma série temporal de 30 anos da pluviosidade na região onde se localiza o CESM (Instituto Nacional de Meteorologia – INMET/ Estação A203).

O CESM, assim como todo o estado do Maranhão, apresenta dois períodos distintos no tocante à pluviosidade: um correspondente ao período chuvoso, de meados de janeiro a junho, e outro referente ao período de estiagem, entre os meses de julho e dezembro (SILVA, 2016). A variação sazonal do regime pluviométrico é controlada pela presença da Zona de Convergência Inter Tropical (ZCIT), que no período do verão austral apresenta ventos alísios de NE, trazendo massas de ar que ocasionam as chuvas no NE brasileiro, enquanto que no segundo semestre do ano, há um domínio dos ventos alísios de SE deslocando essa massa de ar para o hemisfério norte, ocasionando um déficit de precipitações. O clima é tropical úmido, com temperaturas entre 26°C e 27°C , crescendo em direção ao litoral pelo fator de proximidade ao mar, sendo o período mais quente de setembro a novembro e o mais frio de fevereiro a março, devido à nebulosidade alta.

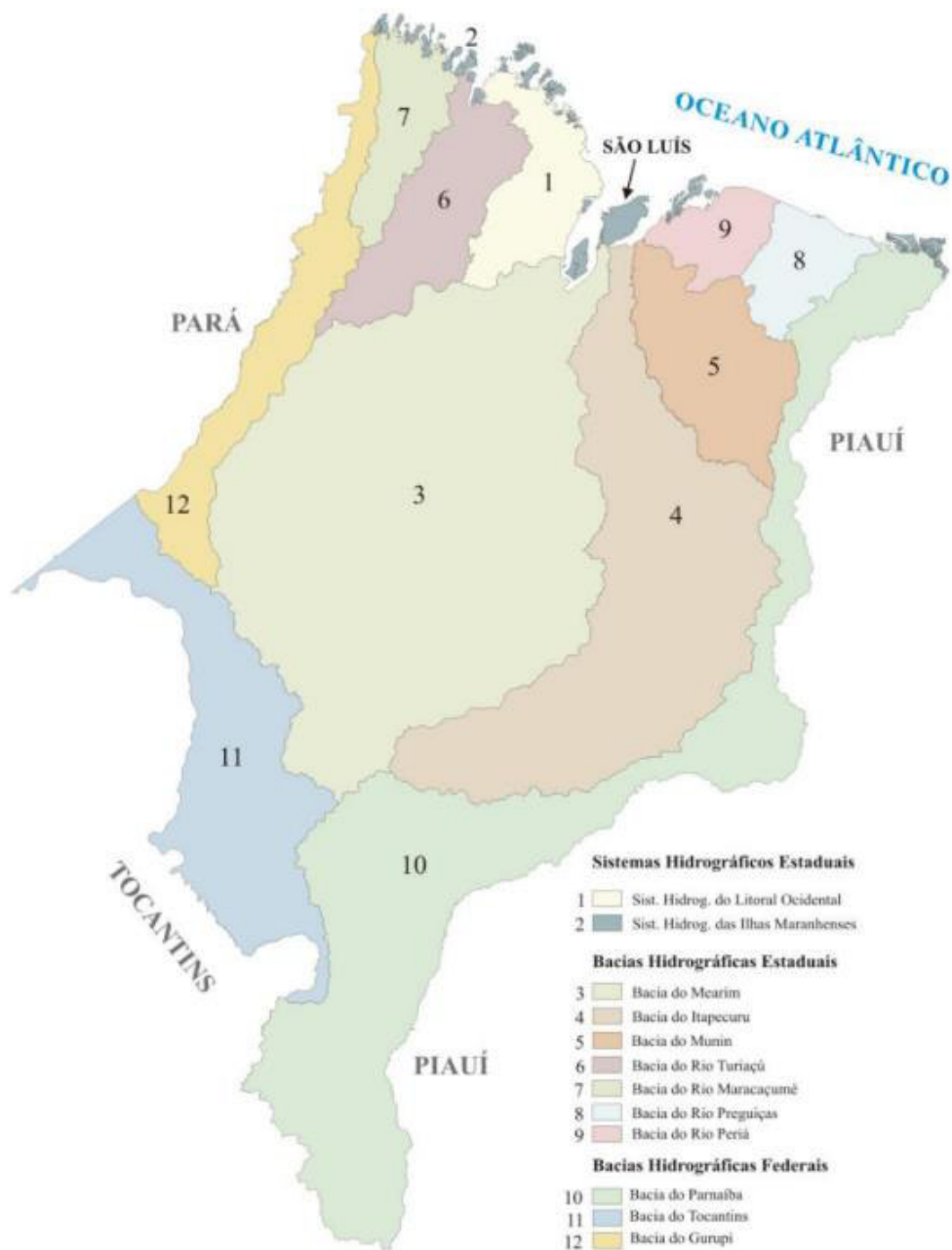


Figura 2 – Mapa das Bacias e Sistemas Hidrográficos do Maranhão (Fonte: NUGEO/UEMA, 2010).

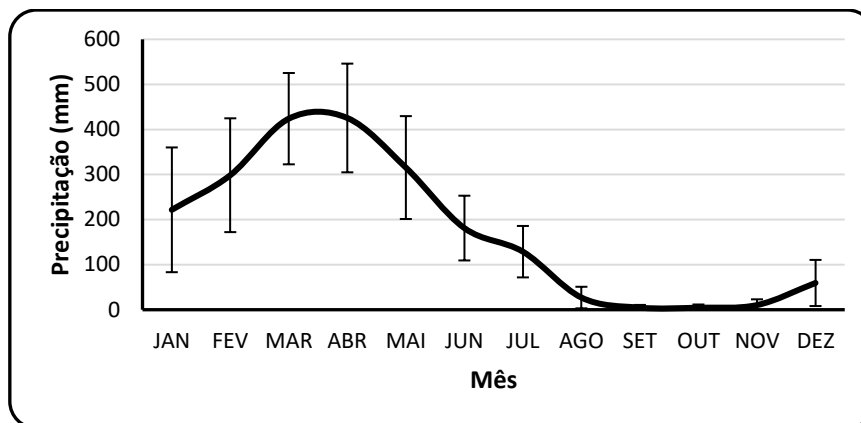


Figura 3 - Série histórica de precipitações médias mensais para a região de São Luís, entre os anos de 1987 a 2017. Dados disponibilizados pelo INMET (2018).

Silva (2016) caracterizou a maré no CESM como sendo do tipo mista com predominância semidiurna, apresentando duas preamares e duas baixa-mares a cada dia, caracterizado por grandes diferenças de altura entre uma maré alta e a maré baixa subsequente, não apresentando um intervalo temporal fixo entre baixa-mares e preamares.

A região apresenta amplitude média de maré de 3,3 m, podendo chegar a uma altura de 7 m durante períodos de sizígia, caracterizando a região como de um estuário de macromaré (FEITOSA, 1989). Segundo Morais (1977), através do uso de derivados lagrangianos, as velocidades de correntes no canal principal do CESM foram valores de $0,78 \text{ ms}^{-1}$, 6 horas antes da Preamar na maré de quadratura e de $1,37 \text{ ms}^{-1}$, 6 horas antes da Preamar na maré de sizígia. As 3 horas antes da Preamar, na maré de quadratura, foram amostrados dados de $5,51 \text{ ms}^{-1}$ e as 3 horas antes da Preamar, na maré de sizígia, foram registrados dados de $8,47 \text{ ms}^{-1}$, apresentando forte influência da maré (Figura 4).

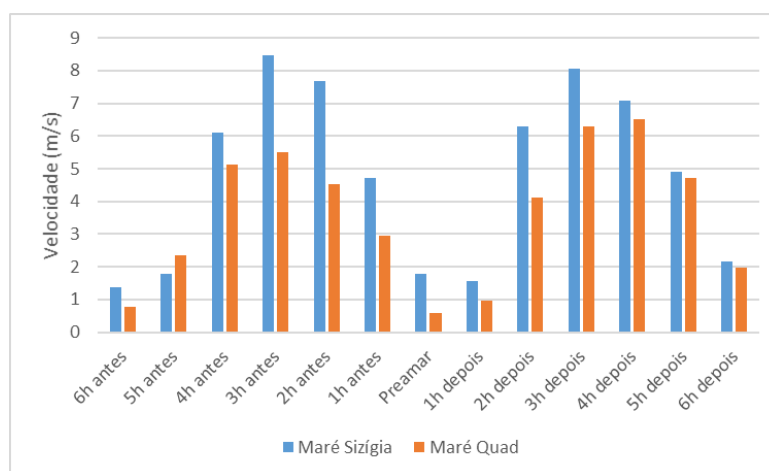


Figura 4 - Velocidades de correntes antes e depois da Preamar, no ano de 1977, MORAIS (1977).

4. METODOLOGIA

4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS EM CAMPO

A aquisição de dados foi realizada em um ponto fixo (localização: -2.567651 S/ -44.401647 O, figura 5) ao largo do Complexo Portuário de São Luís (CPSL), foram realizadas medidas por um período de 13 horas, durante um evento de maré de quadratura, nos dias 12 e 13 do mês de setembro de 2017. Medidas de salinidade, temperatura e material particulado em suspensão foram realizadas em intervalos de 1 hora. Dados das propriedades citadas foram obtidos ao longo da coluna d'água em intervalos regulares de 0,5 m, da superfície até cerca de 0,5 m do fundo. A variação temporal do campo de correntes foi medida por 13 horas ininterruptamente.

4.2 ESTRUTURA TERMOHALINA

Para a aquisição de dados de condutividade, temperatura e pressão, foi utilizado uma sonda da aquisição de dados contínuos, CTD (do inglês: *Conductivity, Temperature and Depth*), EXO2 (Sontek/YSI), segundo metodologia proposta por Dias, et al. (2010). O CTD tem sensores de temperatura com amplitude de medida entre -5°C e 50 °C, condutividade, com amplitude de medição entre 0 e 2000 mS cm⁻¹ e pressão, com amplitude de medição entre 0 e 200 dbar. A frequência de aquisição dos dados pelo CTD foi de 4 Hz. Foram eliminados dados inconsistentes (proveniente de erros sistemáticos e aleatórios), e estas lacunas foram preenchidas através do uso de uma interpolação linear. O processo de interpolação não foi maior que 3% dos dados amostrais.

Durante a etapa de tratamento dos dados do CTD, os valores espúrios foram detectados e eliminados através do uso de uma taxa de variação máxima de cada propriedade, removendo os valores que excederam a este limite. Foi utilizado um filtro Gaussiano para preencher espaços deixados pelos dados inconsistentes. Após esse pré-processamento, os perfis hidrográficos foram divididos em blocos de 0,5 m de espessura, desde a superfície até o fundo. Em cada bloco, os dados que diferiram da média ± 3 vezes o desvio padrão do bloco foram eliminados (EMERY; THOMPSON, 2001).

Devido à variação da coluna de água durante um ciclo completo de maré na estação seca (18,0 a 23,0 m), a profundidade de amostragem (z) foi normalizada pelo seu valor adimensional (KJERFVE, 1975);

$$Z = \frac{z}{|h(t)|} \quad \text{Equação 1}$$

onde $h(t)$ é a profundidade da coluna de água durante a amostragem e Z é a profundidade normalizada. Propriedades da água (S , T) foram interpoladas na coluna de água em intervalos de $0,1 Z$. As principais características das variações temporais e de propriedades escalares foram descritas na superfície ($Z = 0$) e perto do fundo ($Z = 1,0$) em um regime de maré vazante e enchente (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

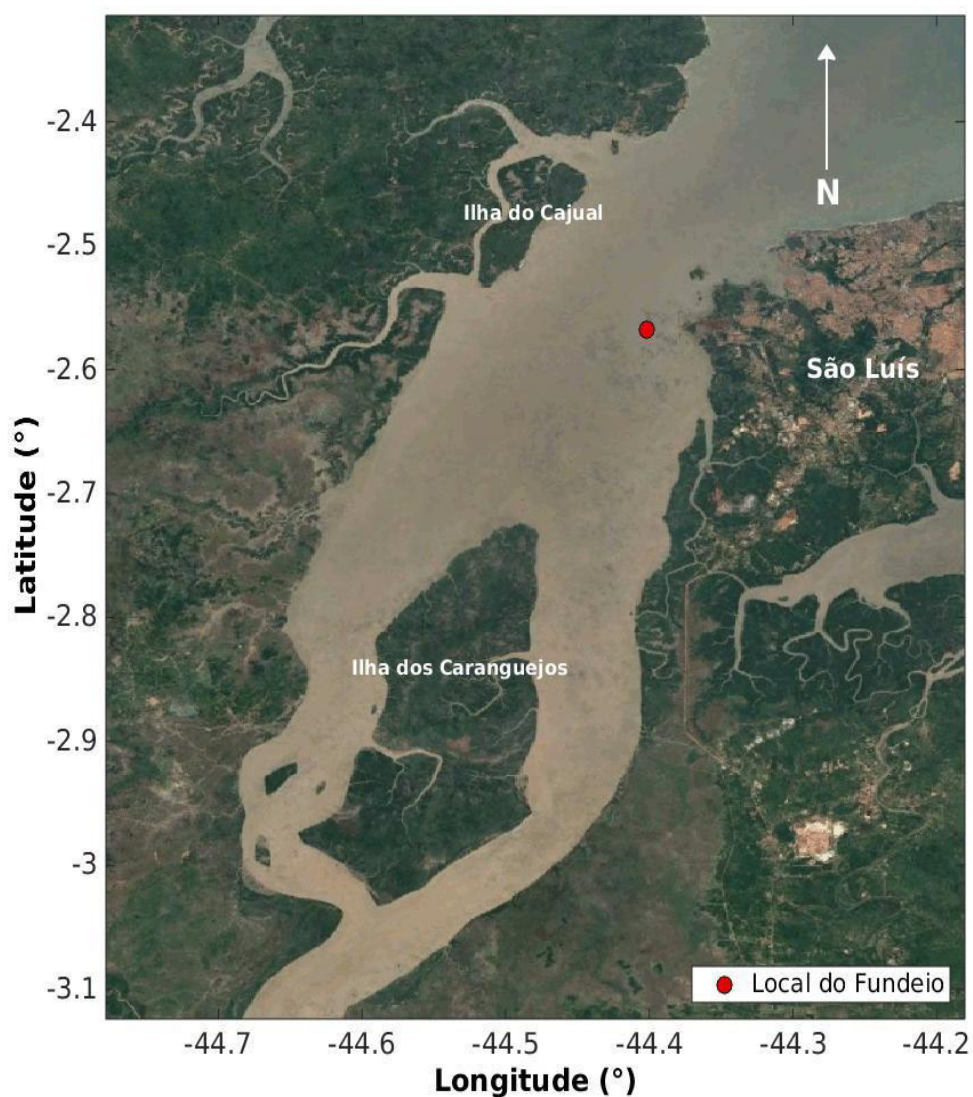


Figura 5 - Mapa da área de estudo com a estação fixa demarcada em vermelho, próximo aos portos da região (Localização: -2.567651 S/ -44.401647 O).

Após a determinação de valores em cada intervalo e a remoção dos valores espúrios, os espaços deixados pelos dados de temperatura e condutividade em cada intervalo de 0,5m foram preenchidos utilizando uma janela móvel e um procedimento de filtragem; os valores retirados nesse procedimento, foram substituídos por uma média ponderada entre eles mesmos e os valores adjacentes. A janela que foi utilizada é a do tipo *Hanning*, que promove uma distribuição de pesos de caráter gaussiano, privilegiando a medida central. O número de valores adjacentes incluídos na média correspondem ao tamanho da janela e a distribuição dos valores corrigidos em relação ao valor central foi determinado pelo tipo de janela utilizada. (EMERY; THOMPSON, 2001). Este procedimento se torna necessário devido aos dados do CTD serem extremamente ruidosos.

4.3 DIAGRAMA TS ESPALHADO E MASSAS DE ÁGUA

Foi empregado o Diagrama TS espalhado, introduzido na literatura oceanográfica por Helland-Hansen (1916), em que no plano TS é representado observações de temperatura e salinidade, postos na ordenada e na abscissa do diagrama cartesiano, respectivamente (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002). Para estimativa da área horizontal e vertical de influência de um dado par TS (Temperatura e Salinidade), foi levada em consideração a isotropia na distribuição das estações hidrográficas.

A distância vertical para cada par TS foi definida de acordo com a equação:

$$d_i \begin{cases} \frac{h_{i+1}-h_i}{2} & \text{se } i = 1 \\ \frac{h_{i+1}-h_{i-1}}{2} & \text{se } i < 1 < n \\ Z - h_i + \frac{h_i-h_{i-1}}{2} & \text{se } i = n \end{cases} \quad \text{Equação 2}$$

O índice i representa a i -ésima observação na coluna de água, numeradas consecutivamente a partir da superfície livre até o fundo ($i = 1$ é a observação mais próxima à superfície e $i = n$ é a observação mais próxima ao fundo); d_i representa a distância vertical de influência da i -ésima observação na coluna de água; $h_i \geq 0$ é a profundidade da i -ésima observação; Z é a profundidade da estação (MIRANDA; CASTRO, 1979).

Com base na análise do diagrama TS e nos critérios observados por Dias et al. (2013), é possível identificar as massas de água de acordo com os valores encontrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Índices termohalinos para classificação de massas de água de acordo com Dias et al (2013).

Massas de Água	Temperatura	Salinidade
Água de Rio (AR)	>28,5	≤ 30
Água Costeira (AC)	> 28	34,5-36
Água Tropical (AT)	< 25	> 36,2
Água de Frente (AF)	28-29	30-33

4.4 CORRENTES

As velocidades em cada hora foram medidas utilizando um ADCP (Sontek/YSI) rebocado, com frequência 500 KHz na direção transversal ao escoamento. O equipamento foi programado para realizar a aquisição de dados (*Burst Interval*) a cada 120 segundos com células de 0,5 m cada, em profundidades que variaram de 18 a 23 m. Para a variação vertical do campo de correntes, foi utilizada a condição de contorno de não escorregamento junto ao fundo, onde assumimos velocidades iguais a zero junto ao fundo ($u=0$).

O vetor velocidade foi decomposto em componentes longitudinal (u , *Along Channel*) e transversal (v , *Cross Channel*), direção O_x e O_y , respectivamente, com valores positivos de u representando as correntes de vazante e valores negativos representando as correntes de enchente. A decomposição é feita através de relações trigonométricas de seno e cosseno (MIRANDA, 2002), como mostrado nas expressões a seguir:

$$u = |\vec{V}| \cos(90 - (dd \pm D) \pm \gamma) \quad \text{Equação 3}$$

$$v = |\vec{V}| \sin(90 - (dd \pm D) \pm \gamma) \quad \text{Equação 4}$$

onde \vec{V} é o vetor velocidade, dd é o ângulo medido pelo ADCP, D é a correção pela declinação magnética, para a qual utilizamos 21°W (-21 na equação) e γ é o ângulo do eixo longitudinal (45°). Detalhes sobre o procedimento para a correção e decomposição das velocidades de corrente foram descritos por Miranda (2002).

As médias no espaço e tempo foram numericamente integradas de acordo com os métodos propostos por Miranda (2002) e Bergamo (2002). Para os perfis verticais de propriedades escalares detonados genericamente por $P = P(Z_j, t)$, amostradas em profundidades adimensionais discretas ($Z_j = 0, -0.1, -0.2, \dots -1$), e as médias desses perfis no tempo foram calculadas por integração numérica, conforme:

$$\langle P(Z_j, t) \rangle = \overline{P(Z_j)} = \frac{1}{T} \int_0^T P(Z_j, t) dt \quad \text{Equação 5}$$

Uma vez obtido o perfil médio em cada uma das propriedades adimensionais, o valor médio da propriedade na coluna de água será obtido numericamente:

$$\langle \overline{P(Z_j, t)} \rangle = \overline{P} = \int_{-1}^0 \overline{P(Z_j)} dZ \quad \text{Equação 6}$$

onde os símbolos $\langle \rangle$ e a barra ($\overline{\quad}$) indicam médias no tempo e no espaço, respectivamente, durante intervalos de tempo iguais a um período de um ciclo completo de maré (T) e ao longo da coluna de água.

Para estimar o efeito barotrópico da maré, será calculado o valor médio da propriedade escalar $P = P(Z, t)$ na coluna de água, por integração numérica:

$$\overline{P(Z_j, t)} = \overline{P(t)} = \int_{-1}^0 P(Z_j, t) dZ \quad \text{Equação 7}$$

Subtraindo-se a seguir esse valor do correspondente valor quase-estacionário, \overline{P} , obtido pela equação 5. Para o cálculo dos valores médios nas áreas $A = A(x, Z)$ das seções transversais no intervalo de tempo (T) das propriedades escalares $P = P(A, t) = P(x, Z, t)$, será utilizado:

$$P(x, Z, t) \geq \overline{P(x, Z)} = \frac{1}{T} \int_0^T P(x, Z, t) dt \quad \text{Equação 8}$$

$$\langle \overline{P(x, Z, t)} \rangle = \overline{\overline{P}} = \frac{1}{A} \iint_A \overline{P(x, Z)} dx dz \quad \text{Equação 9}$$

Quando na expressão média na coluna de água a propriedade $P(x, Z, t)$ é a componente longitudinal de velocidade $v = v(x, Z, t)$, a diferença entre o valor médio na coluna de água e o valor estacionário $v_t = v(x, Z, t) - \langle v(x, Z, t) \rangle$, representa o efeito do componente barotrópico da força de gradiente de pressão.

4.5 DIAGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO DE HANSEN & RATTRAY

O diagrama de estratificação-circulação foi deduzido com um modelo bidimensional estacionário, lateralmente homogêneo e com seção retangular, que simula perfis teóricos da velocidade longitudinal e da salinidade (HANSEN; RATTRAY, 1966). O modelo resolve analiticamente um sistema composto das equações do movimento, da continuidade, da conservação de sal e de estado da água do mar linear, no plano Oxz. Com base nos resultados teóricos desse modelo analítico, no trabalho subsequente de Hansen & Rattray (1966) foi introduzido um parâmetro adimensional (γ), que representa a proporção relativa do transporte de sal estuário acima, resultante do processo de mistura (difusão + advecção) (IZUMI, 2011).

De acordo com Hansen & Rattray (1966), os estuários podem ser classificados de acordo com o diagrama, em os seguintes tipos:

- Tipo 1 → O fluxo resultante (residual) é estuário abaixo em todas as profundidades, e o transporte de sal estuário acima é devido somente ao processo de difusão turbulenta;
- Tipo 2 → O fluxo resultante reverte com a profundidade, e os processos advectivo e dispersivo são importantes para contribuir para o transporte de sal estuário acima;
- Tipo 3 → O transporte de sal estuário acima ocorre quase que exclusivamente pelo processo advectivo;
- Tipo 4 → Esse tipo tem estratificação de salinidade máxima e corresponde aos estuários já classificados como cunha salina.

As curvas representadas pelas isolinhas do parâmetro γ podem ser divididas em:

- $N_i(\gamma) = 1$ → O transporte de sal estuário acima é realizado inteiramente por difusão turbulenta;
- $N_i(\gamma) \rightarrow 0$ → A difusão turbulenta é desprezível em relação aos processos advectivos no transporte de sal estuário acima;
- $0 < N_i(\gamma) \leq 1$ → Os processos de ambas as naturezas são importantes no transporte de sal estuário acima.

Para classificação do estuário foi utilizado o Diagrama Estratificação-circulação proposto por Hansen & Rattray (1966), de acordo com os parâmetros de estratificação e circulação:

$$\frac{\delta S}{\bar{S}}$$

Equação 10

$$\frac{u_s}{u_f} \approx \frac{U_S}{\bar{u}} \quad \text{Equação 11}$$

onde $S = S_f - S_s$ é a diferença entre os valores de salinidade no fundo (S_f) e de superfície (S_s), e \bar{S} é o valor médio da salinidade na coluna de água. U_S é o valor médio do componente longitudinal de velocidade na superfície e \bar{u} é a média da velocidade na coluna de água, onde a velocidade da descarga fluvial é dada por:

$$u_f = \frac{T_v}{\text{Área}} \quad \text{Equação 12}$$

4.6 NÚMERO DE RICHARDSON POR CAMADA

A estabilidade vertical da coluna de água pode ser expressa por vários números adimensionais. O número de Richardson por camada (Ri_L) definido por Bowden (1978), será calculado como:

$$Ri_L = \frac{gh\Delta\rho v}{\rho(\bar{u})^2} \approx \frac{gh\beta\Delta S v}{u^2} \quad \text{Equação 13}$$

onde $h = h(t)$ é a profundidade local, $\Delta\rho v$ e $\Delta S v$ é a diferença entre a densidade (salinidade) do fundo e da superfície, \bar{u} é o valor médio da velocidade na coluna e β é o coeficiente de contração salina. Os limites inferior e superior ($Ri_L = 2,0$ e $Ri_L = 20,0$) estabelecem as condições de instabilidade e alta estabilidade vertical na coluna de água, respectivamente.

4.7 ANOMALIA DE ENERGIA POTENCIAL (ϕ)

A energia do processo turbulento gerado pelas marés devido a estratificação periódica e sua influência na estabilidade da coluna de água foi calculada em termos de anomalia de energia potencial (ϕ) definida por Nunes (1989):

$$\phi = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 (\bar{\rho} - \rho) g z dz; \quad \bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho(z) dz \quad \text{Equação 14}$$

onde $\rho = \rho(z)$ e $\bar{\rho}$ são os perfis de densidade e densidade média, respectivamente.

A anomalia da energia potencial (ϕ) representa o trabalho, por unidade de volume, necessário para misturar verticalmente a coluna de água (Jm^{-3} , no sistema SI de unidades), em que $\phi = 0$ denota um estuário bem misturado, aumentando com a estratificação vertical, por exemplo, para um estuário altamente estratificado. Utilizando a condição para um fluxo horizontal praticamente incompressível, a variação da densidade local está atrelada aos termos advectivos:

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} = -u \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) \quad \text{Equação 15}$$

Em que é possível mostrar que a taxa de tempo de ϕ pode ser reescrita como (SIMPSON, 1990):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{g}{h} \frac{\partial \rho}{\partial X} \int_{-h}^0 (u - \bar{u}) z dz \quad \text{Equação 16}$$

Onde $u = u(z)$ e \bar{u} são as velocidades dos perfis da componente longitudinal u e a velocidade média, respectivamente. Em termos de profundidade adimensional, $Z = \frac{z}{|h|}$, essa equação pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = gh \frac{\partial \rho}{\partial X} \int_{-1}^0 (u - \bar{u}) Z dZ \quad \text{Equação 17}$$

Em que a variação da energia potencial, $\frac{\partial \phi}{\partial t}$, é utilizada para comparar a intensidade da mistura gerada pela agitação da maré, podendo apresentar valores altos e baixos de acordo com as características geradas na estratificação vertical de salinidade, com índices baixos para estuários bem misturados e índices altos para estuários altamente estratificados. A taxa de tempo de ϕ será utilizada para comparar as mudanças dos movimentos turbulentos gerados pela maré.

4.8 TRANSPORTE ADVECTIVO DE SAL

O transporte médio de sal (TS) durante um ciclo completo de maré é separado em: descarga fluvial, deriva de Stokes, difusão de maré, circulação gravitacional, difusão residual, cisalhamento da maré e efeito não estacionário do vento, calculado como:

$$T_s = \frac{1}{T} \int_0^T [\int_0^h \rho u S dz] = \langle \overline{\rho u S h} \rangle \quad \text{Equação 18}$$

onde ρ , u e S indicam a densidade, o componente longitudinal da velocidade e a salinidade, respectivamente, e h é a espessura da coluna d'água. A barra ($\bar{\quad}$) sobre as variáveis denota o valor médio ao longo da coluna de água e o símbolo $\langle \quad \rangle$ denota a média no tempo. No SI o T_s é dado em $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$.

Para que seja possível calcular os componentes do transporte advectivo de sal, visto que somente uma parte deste transporte de sal é calculado pela equação (18), é necessário decompor em parcelas o componente longitudinal da velocidade (quatro parcelas), a salinidade (quatro parcelas) e a espessura da coluna de água (duas parcelas) (BOWDEN, 1963; DYER, 1974; FISCHER, 1976; HUNKINS, 1981; KJERFVE, 1986). Para um canal estuarino, essa decomposição é expressa por:

$$u(x, Z, t) = u_a(x) + u_t(x, t) + u_s(x, Z) + u'(x, Z, t) \quad \text{Equação 19}$$

$$S(x, Z, t) = S_a(x) + S_t(x, t) + S_s(x, Z) + S'(x, Z, t) \quad \text{Equação 20}$$

$$h(x, t) = h_a + h_t(x, t) \quad \text{Equação 21}$$

As primeiras parcelas do segundo membro das equações (19) e (20) representam o efeito advectivo gerado pela descarga fluvial (u_a) na redistribuição advectiva da salinidade (S_a). Os segundos termos [$u_t(x, t)$ e $S_t(x, t)$] simulam os efeitos cíclicos da corrente de maré e os terceiros termos [$u_s(x, Z)$ e $S_s(x, Z)$] simulam o efeito da circulação gravitacional, ou seja, gradientes barotrópico e baroclínico da força de gradiente de pressão para segundo e terceiro termo, respectivamente. E por fim, os últimos termos [$u'(x, Z, t)$ e $S'(x, Z, t)$] são parcelas residuais, resultantes de processos físicos de pequena escala. O $h_a = \langle h \rangle$ é a média no tempo da profundidade local e $h_t(x, t)$ é a variação no tempo da altura da maré.

Substituindo as equações (19), (20) e (21) na equação (18), o transporte advectivo de sal resultante fica decomposto em 32 parcelas, no entanto, há termos muito pequenos que acabam sendo desprezados ou não há uma correlação com o significado físico definido, resultando em sete (7) parcelas para o transporte total médio de sal:

$$T_s = \bar{\rho}(u_a h_a S_a + \langle h_t u_t \rangle S_a + h_a \langle u_t S_t \rangle + h_a \overline{u_s S_s} + h_a \langle \overline{u' S'} \rangle + \langle u_t S_t H_t \rangle + u_a \langle S_t h_t \rangle) \quad \text{Equação 22}$$

As 7 parcelas da equação (22) estão relacionadas, respectivamente, aos seguintes processos físicos: descarga fluvial, deriva de Stokes, correntes de maré, circulação gravitacional, flutuações turbulentas, correlação tríplice e corrente residual.

Detalhes acerca da metodologia empregada podem ser adquiridos em Bergamo (2002) e Miranda (2002).

4.9 DETERMINAÇÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS)

A concentração de MPS do CPSL foi determinada a partir de uma amostra de 500ml de água, coletada com garrafa de *Van Dorn* lastreada com chumbo de 15kg para melhorar a estabilidade e direcionamento vertical. Durante o estudo, as amostras de água foram coletadas na camada superficial (0,5m abaixo da superfície da água) e camada inferior (1m acima do fundo), em todas as estações hidrográficas de coleta e nos fundeios ($\Delta t = 1h$). As amostras foram acondicionadas em frascos de polietileno de 500 ml (duplicata) e mantidas resfriadas a 4°C, até a chegada em laboratório. A determinação das concentrações do MPS foi por medida gravimétrica, segundo as metodologias descritas em Strickland & Parsons (1972), onde a diferença de peso antes e após a filtração, usando filtros de fibra de vidro (Millepore AP040) de 47mm de diâmetro, forneceu o MPS de mgL^{-1} . Nos perfis eulerianos, foram feitos gráficos de isopletas, cujas concentrações de MPS foram interpoladas na coluna d'água, através de interpolação linear.

5. RESULTADOS

5.1 ESTRUTURA TERMOHALINA E MASSAS DE ÁGUA

Durante o período de amostral, os valores de temperatura variaram entre 28,61 e 29,05 °C, com média de 28,78 °C. Em maré vazante, a amplitude térmica observada foi de apenas 0,41 °C (entre 28,63 e 29,04 °C), quase não variando em relação à enchente, que foi 0,45°C (entre 28,6 e 29,05°C). A temperatura apresentou maiores valores nas primeiras horas (Figura 6) durante maré enchente, diminuindo com maré vazante. Apesar da variação observada na figura 7, a pequena inclinação das isotermas nos permite inferir que no período amostral a temperatura se mantém constante da superfície ao fundo.

A variação temporal de salinidade (Figura 8) mostra isohalinas verticalizadas, variando de 28,5 a 31,0 gkg⁻¹ em maré enchente, e de 29,5 a 31,5 gkg⁻¹ em maré vazante. O perfil médio temporal da salinidade (Figura 9) mostrou uma salinidade média de 30,1 gkg⁻¹. De modo global, apresentou valores tipicamente estuarinos e de plataforma continental interna, entre 28,49 e 31,67 gkg⁻¹.

Observa-se a presença de uma temperatura com valores quase constantes poucas variações ao longo de um ciclo de maré de 13 horas, com salinidades que variaram de acordo com o maior ou menor volume de água do mar, modulado pela maré mista com predominância semidiurna.

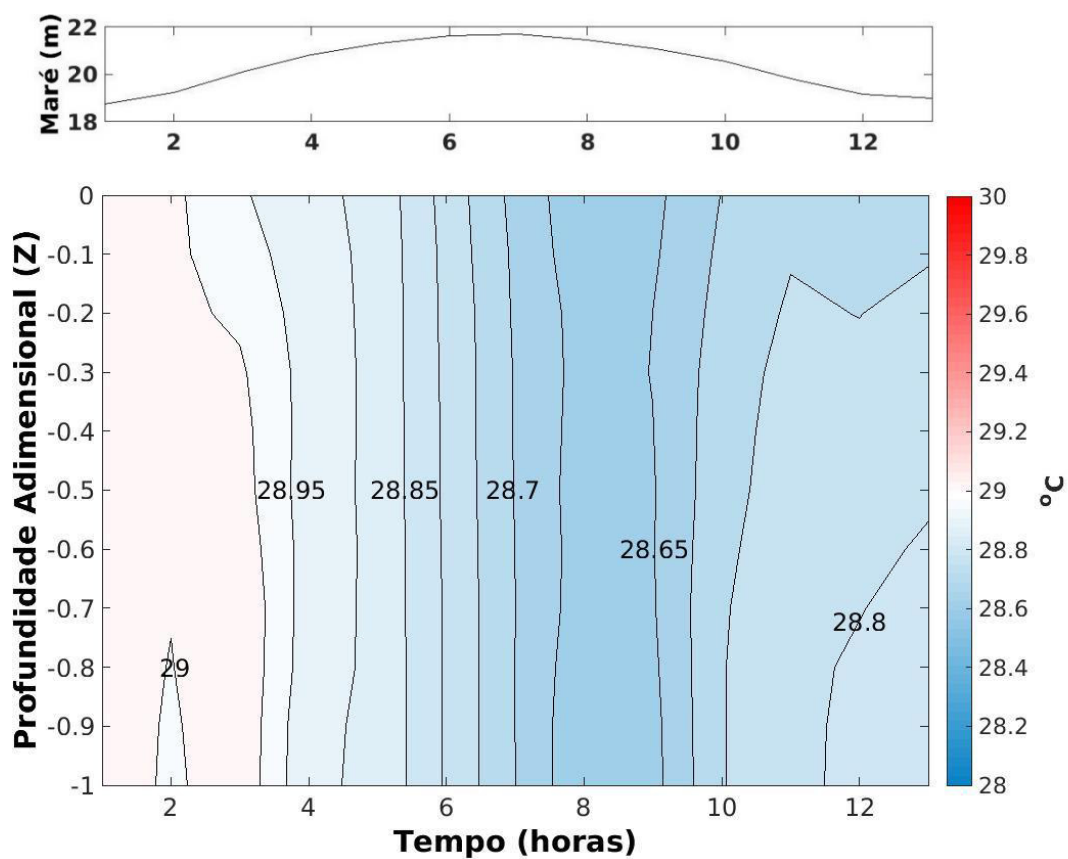


Figura 6 – Perfil temporal da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ao longo de um ciclo completo de maré semi-diurna (13h).

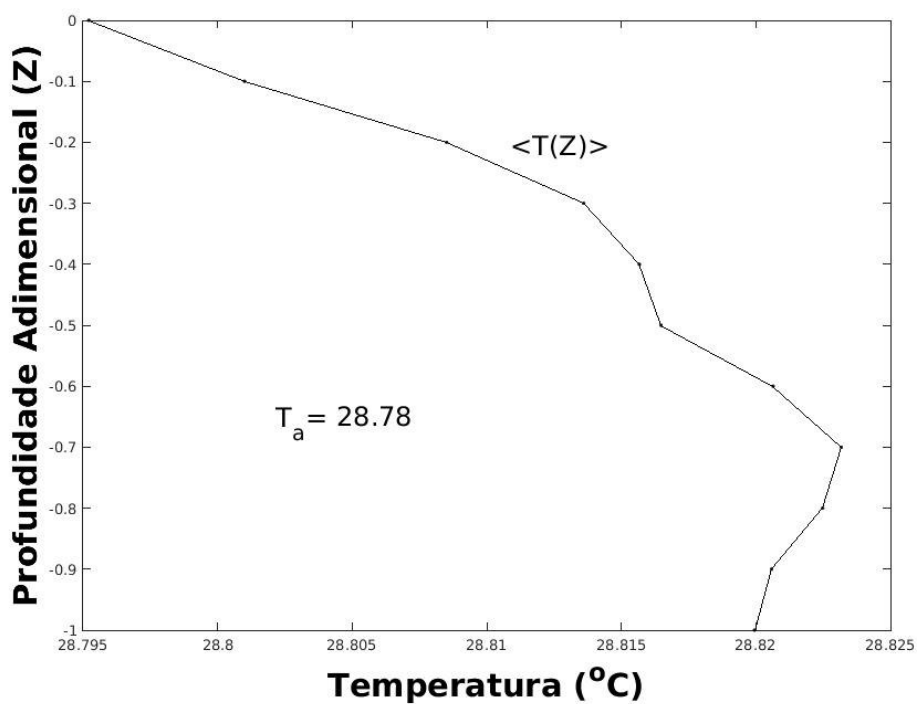


Figura 7 – Perfil médio de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ao longo de um ciclo completo de maré semi-diurna (13h). O T_a é o perfil médio espaço-temporal da temperatura.

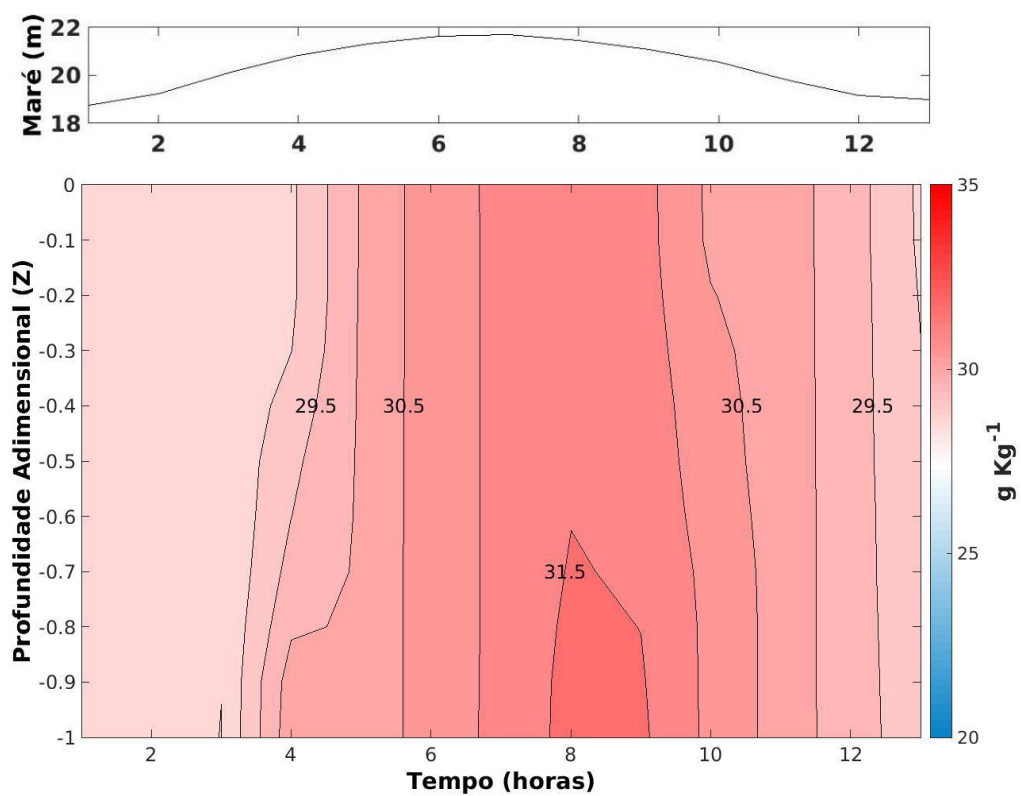


Figura 8 - Perfil temporal da salinidade (gkg^{-1}) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h).

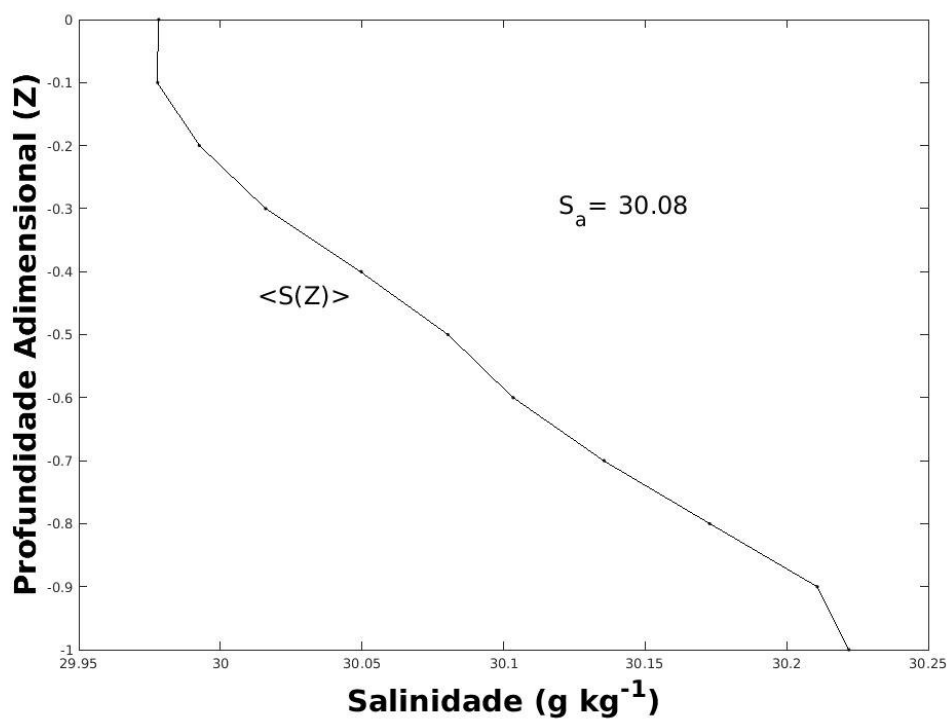


Figura 9 - Perfil médio de salinidade (gkg^{-1}) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h). O S_a é o perfil médio espaço-temporal da salinidade.

A análise do diagrama TS espalhado (Figura 10) mostrou uma distribuição dos índices TS, variando entre os limites isopicnais (σ_t) 17 a 20 kgm^{-3} , reportando uma variação de salinidade entre $28,49 < S < 31,67 \text{ gkg}^{-1}$, enquanto que a variação térmica foi praticamente constante ($T > 28,5^\circ\text{C}$). Os dados mostram a presença da massa de água de frente ($S > 30 \text{ gkg}^{-1}$), que em maré enchente é diluída pela água da drenagem continental ($S < 30 \text{ gkg}^{-1}$).

Nas condições de maré de quadratura, as correntes de maré são menos intensas do que na sizígia e, com isso, é esperado que menos energia se encontre disponível na coluna d'água para ocasionar a mistura da água de origem fluvial com a do mar, de acordo com o proposto por Miranda et al. (2002). O mesmo também declarou que a inclinação das isopicnais sugere elevada homogeneidade da coluna de água, fato que corrobora os dados encontrados. Com base nesta análise e nos critérios estabelecidos por Dias et al. (2013), é possível identificar a presença de Água de Rio (AR) e Água de Frente (AF).

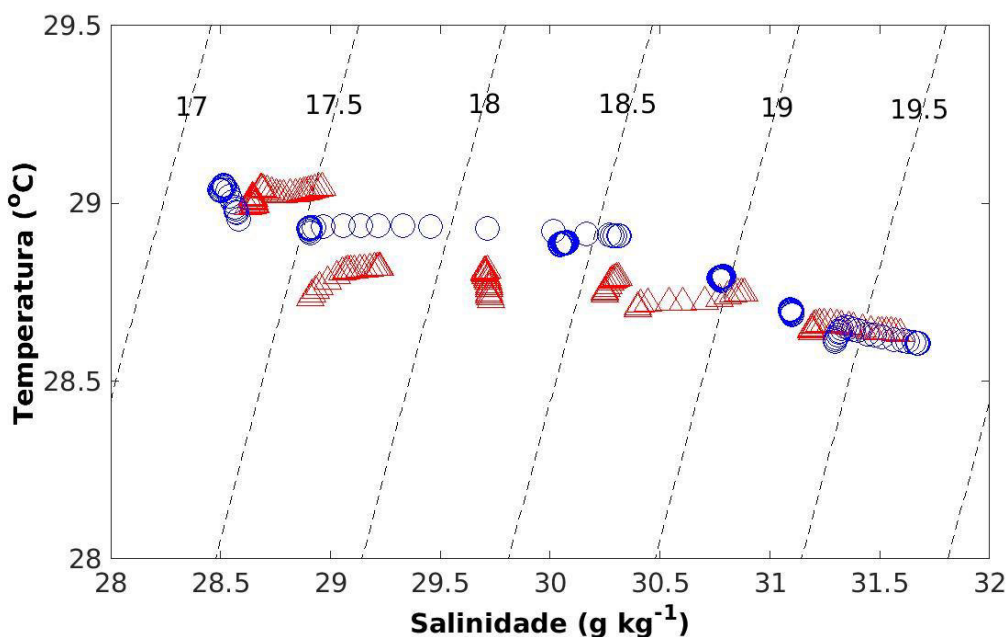


Figura 10 - Diagrama T-S espalhado para o CESM. As isopicnais representam a densidade convencional (σ_t). Triângulo vermelho – maré vazante; círculo azul – maré enchente.

4.2 CORRENTES

A componente longitudinal da velocidade ao longo de um ciclo de maré semidiurna (Figura 11) mostrou um escoamento bidirecional, tipicamente estuarino, com valores máximos de vazante e enchente atingindo $1,33$ e $-0,87 \text{ ms}^{-1}$, respectivamente. Mesmo em

evento de maré enchente, é possível observarmos que nas 3 primeiras horas iniciais as velocidades são positivas, mostrando um domínio de vazante, enquanto que entre a hora 3 e a hora 9 as velocidades são negativas, típicas de enchente, chegando a $-0,8 \text{ ms}^{-1}$. Este padrão mostra que o máximo de velocidade em maré enchente ocorre entre a hora 4 e a hora 7 ($-0,8 \text{ ms}^{-1}$), enquanto que o máximo de velocidade em vazante ocorre entre a hora 11,5 e a hora 13 ($1,2 \text{ ms}^{-1}$). Mesmo mais intensa (33% maior), o núcleo de máxima velocidade de vazante ocorre por um período de 1,5 horas, enquanto o núcleo de máxima velocidade de enchente é mais estável.

Ao analisarmos o perfil médio desta componente $\langle u(Z) \rangle$ é possível identificar que as correntes de vazante apresentam predominância, com velocidade residual de $0,11 \text{ ms}^{-1}$ (Figura 12), com as maiores intensidades ocorrendo no mesmo período. Isto quer dizer que há uma predominância do movimento sentido estuário abaixo.

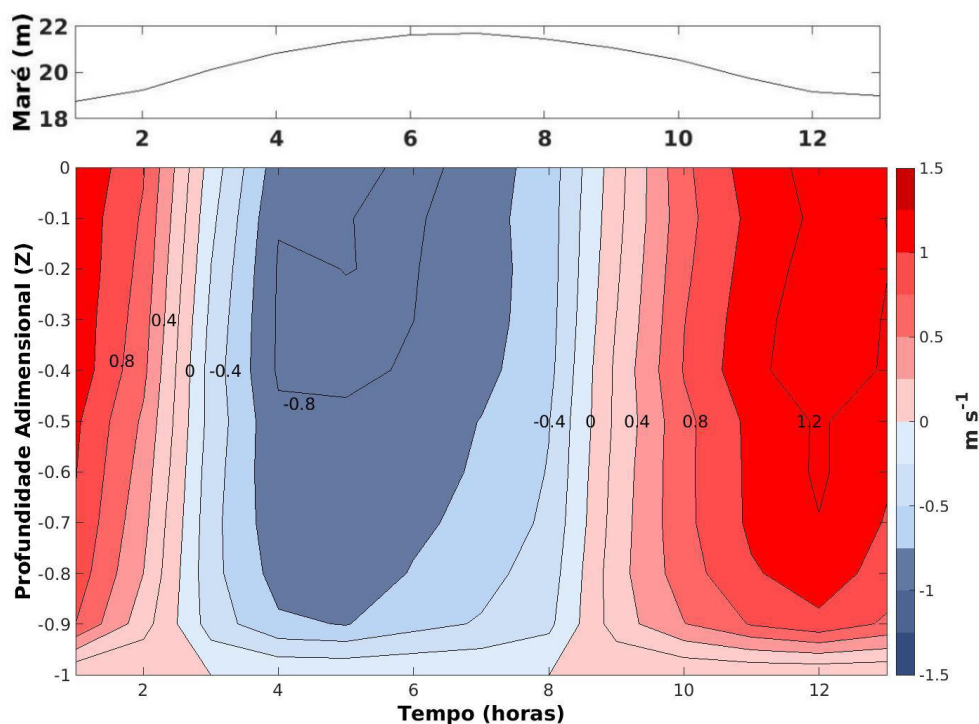


Figura 11 – Perfil temporal da componente longitudinal da velocidade (u) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h).

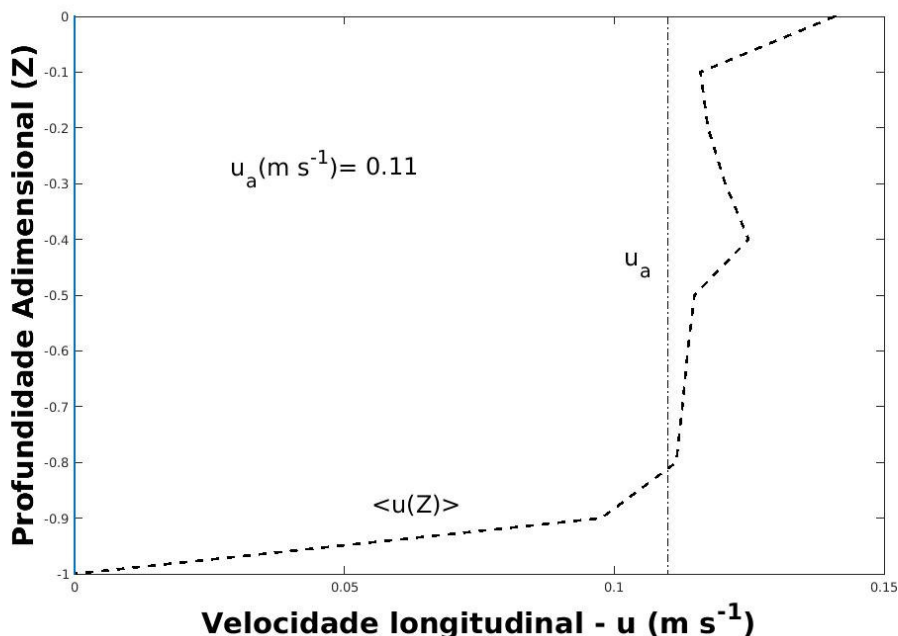


Figura 12 – Perfis médios do componente longitudinal da velocidade ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h); u_a é a velocidade residual.

Não é possível, através dos dados coletados, identificar quanto tempo antes do estófo da baixa-mar ocorreu o valor máximo da componente longitudinal em vazante, entretanto, através da análise da tábua de maré do dia em questão, pode-se sugerir que ocorreu aproximadamente uma hora e meia antes.

4.3 HIDRODINÂMICA E CLASSIFICAÇÃO DO ESTUÁRIO

A velocidade longitudinal média [$\bar{u}(t)$] apresentou valores que chegaram a $1,15 \text{ ms}^{-1}$ em maré vazante e $-0,72 \text{ ms}^{-1}$ em maré enchente (figura 13), enquanto o nível da superfície livre [$\bar{h}(t)$] ao longo do ciclo de maré oscilou cerca de 2,5 m, com a maré alta ocorrendo na hora 7 e a maré baixa na hora 1 e pouco depois da hora 13. Ao compararmos a variação temporal média da salinidade (gkg^{-1}) com a velocidade longitudinal média (ms^{-1}), figura 14, observa-se que os máximos de enchente ocorrem 3 horas antes do máximo de salinidade, enquanto que os máximos de vazante ocorrem 5 horas depois da salinidade máxima.

Podemos observar a variação temporal da salinidade média na coluna de água em comparação com a variação da superfície livre na figura 15. A defasagem entre a variação da maré dinâmica (ht) e salinidade (st) é de 1 hora. O comportamento observado nos permite deduzir que a redistribuição de salinidade ocorre do efeito advectivo da maré, uma vez que

em maré enchente nota-se aumento da salinidade enquanto em maré vazante ocorre uma redução desta devido ao aporte fluvial.

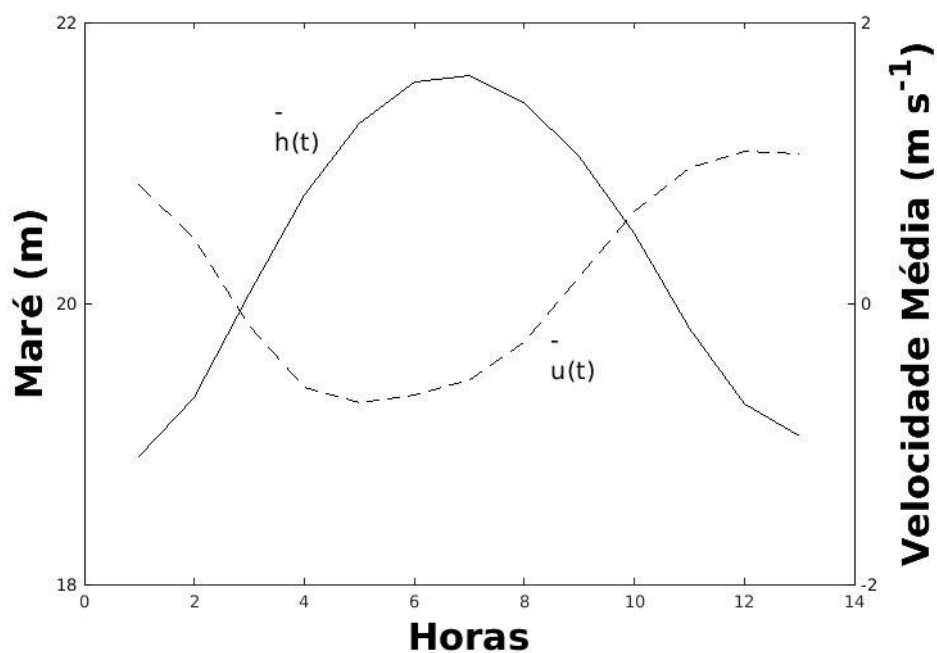


Figura 13 – Variação temporal da velocidade média [$u(t)$] (linha tracejada) na coluna de água e da superfície livre [$h(t)$] (linha contínua).

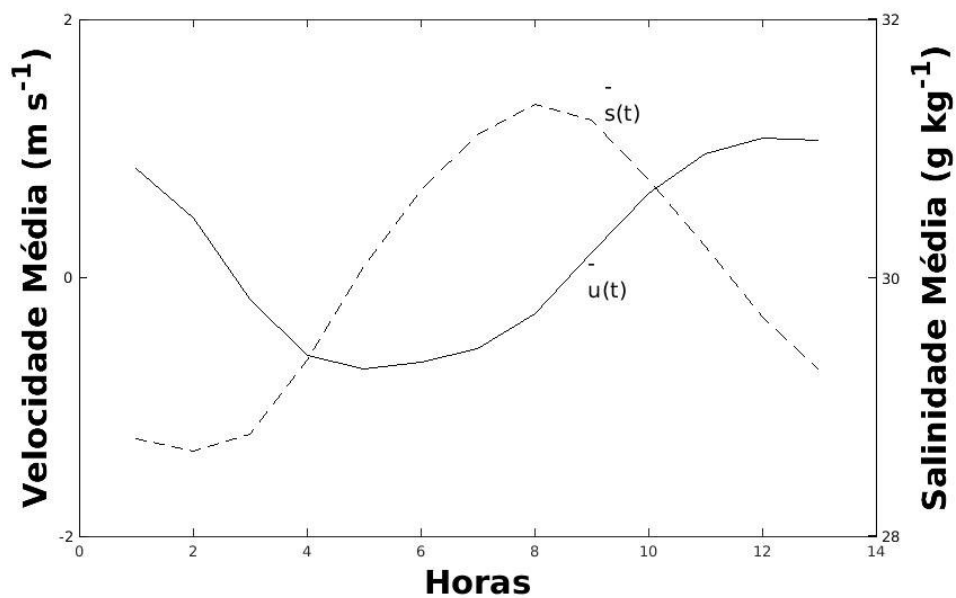


Figura 14 - Variação temporal da salinidade média [$s(t)$] (linha tracejada) na coluna de água e da velocidade média [$u(t)$] (linha contínua).

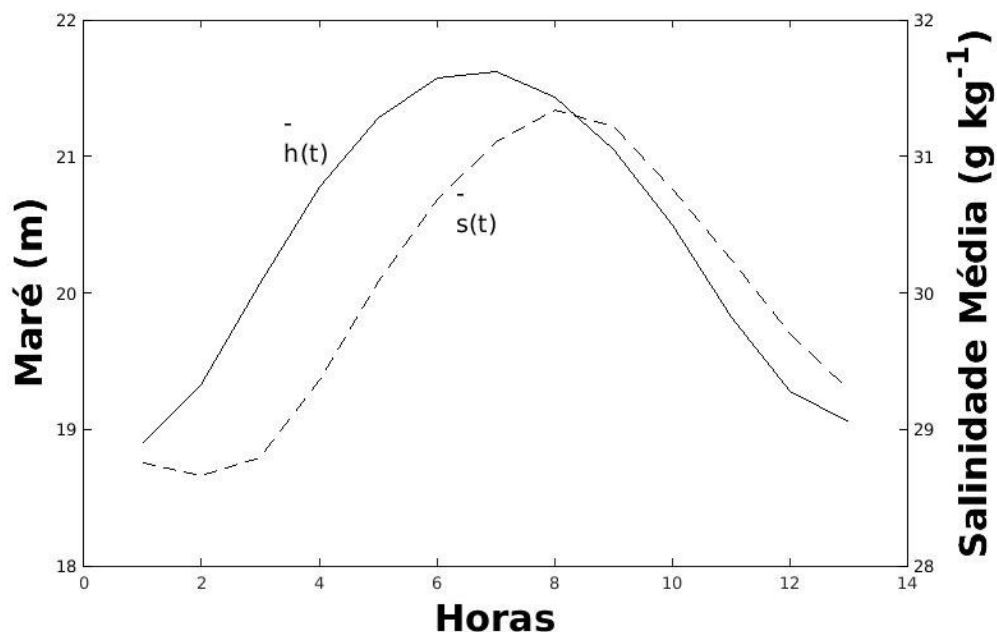


Figura 15 - Variação temporal da salinidade média $[s(t)]$ (linha tracejada) na coluna de água e da superfície livre $[h(t)]$ (linha contínua).

De acordo com os parâmetros de estratificação e circulação (Figura 16), o sistema estuarino foi classificado como do tipo 1a (bem misturado e fracamente estratificado), onde o fluxo resultante é estuário abaixo em todas as profundidades, o transporte de sal estuário acima é devido somente ao processo de difusão turbulenta e o efeito baroclínico para o transporte de sal estuário acima é desprezível (HANSEY & RATTRAY, 1966).

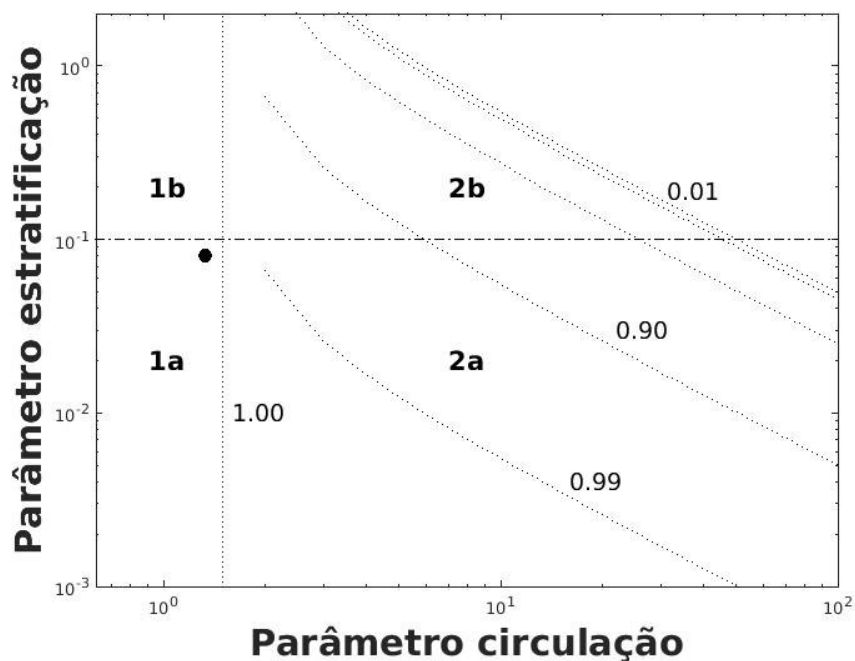


Figura 16 – Diagrama de Estratificação-Circulação de Hansen & Rattray (1966).

4.4 ESTABILIDADE DA COLUNA DE ÁGUA

A análise da variação temporal do número de Richardson por camada (Ri_L) podem ser observadas na figura 17. O comportamento do Ri_L apresentou no geral elevada instabilidade vertical ($Ri_L < 2$), indicando dominância dos processos de mistura e uma coluna d'água instável. Entretanto, próximo às horas 4 e 9 este valor aumenta, sugerindo fraca estabilidade vertical ($2 < Ri_L < 20$).

Ao fazer uma análise da anomalia da energia potencial, pôde-se encontrar um valor de $1,0 \times 10^{-4} \text{ Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$ para maré enchente e $3,67 \times 10^{-5} \text{ Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$ para maré vazante, sendo a média do ciclo de maré (~13 horas) $6,88 \times 10^{-5} \text{ Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$. Ao transformarmos estes valores em potencial energético, obtém-se um potencial energético de aproximadamente 73 GWhano^{-1} . Em período de maré vazante, o potencial energético apresentou valores de $25,2 \text{ GWhano}^{-1}$. Já em maré enchente, o potencial energético teve valores de $47,8 \text{ GWhano}^{-1}$.

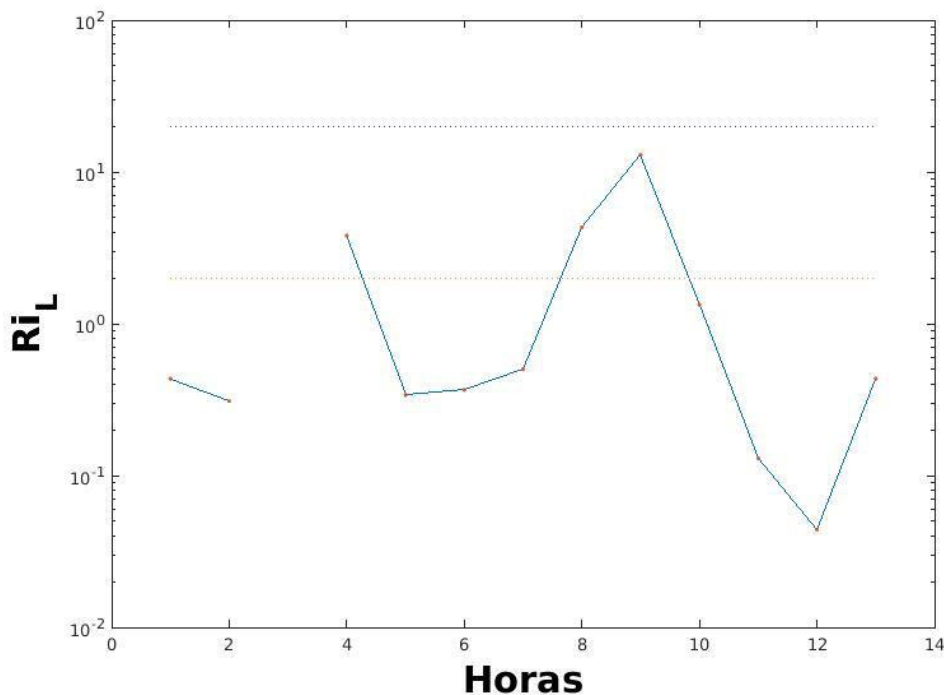


Figura 17 – Variação temporal do número de Richardson por camada.

4.5 TRANSPORTE ADVECTIVO DE SAL

As parcelas dominantes do transporte de sal foram descarga fluvial e deriva de Stokes, com uma pequena presença de corrente de maré, como é possível observar na Figura 18. O transporte relacionado à descarga fluvial foi o de maior valor, chegando a

61,58 $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$, enquanto a deriva de Stokes apresentou $-27,82 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ e a corrente de maré teve um valor de $-3,6 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$. O valor do transporte integrado de sal foi $30,27 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ e o transporte total calculado através da somatória das parcelas advectivas e dispersivas foi de $30,26 \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$. O comportamento observado através das parcelas indica um transporte estuário abaixo, sugerindo que o estuário funcionou como exportador de sal nesse período. A penetração da água do mar não ocorre na forma de cunha salina, adentrando pelo fundo, mas sim, ocorre uma penetração quase vertical, em que valores de superfície e fundo não sofrem grandes oscilações.

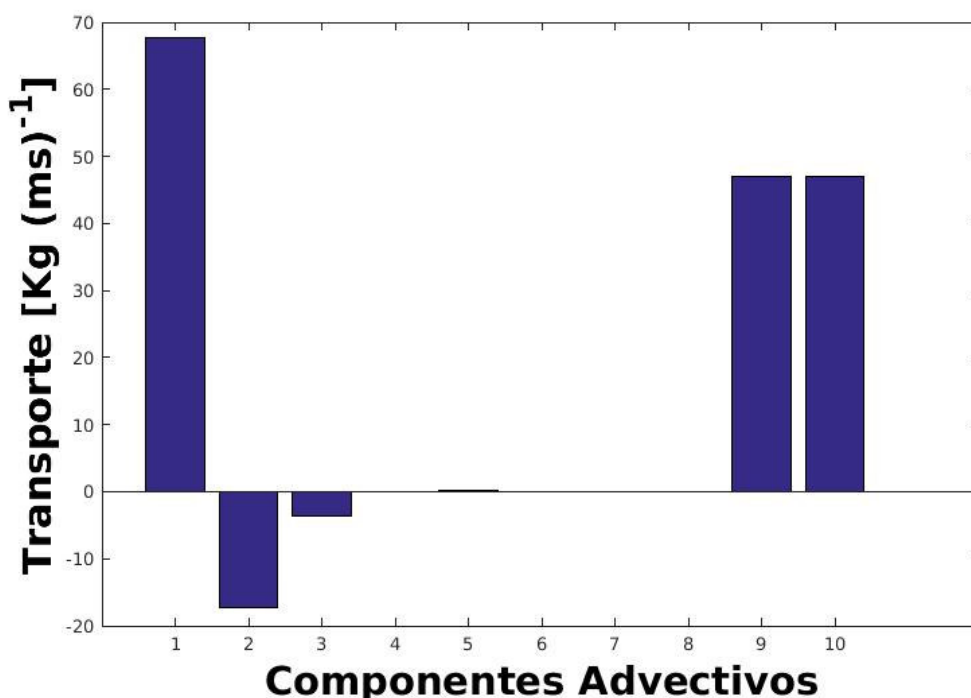


Figura 18 – Componentes do transporte advectivo de sal. Parcelas: descarga fluvial (1); deriva de Stokes (2); correlação de maré (3); circulação gravitacional (4); flutuações turbulentas (5); dispersão de maré (6); circulação residual (7). A soma das parcelas está indicada em (9) e o transporte resultante integrado durante o ciclo de maré em (10).

4.6 DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS)

Analisando as concentrações de MPS sob a ótica euleriana (Figura 19), observa-se que o perfil temporal de MPS variou de 108 a $880,6 \text{ mgL}^{-1}$, com valor médio de $335,35 \text{ mgL}^{-1}$, cujas maiores concentrações foram encontradas junto ao fundo, logo após o momento de mudança de velocidade em maré enchente. A maior atuação da onda de maré estuário

acima pode ter ocasionado ressuspensão do material de fundo e/ou erosão das margens, uma vez que estuários com forte influência da maré têm altas concentrações de MPS e as maiores concentrações foram encontradas próximo ao fundo. Santos (2018) observou no Complexo Estuarino Arraial-São José (CEASJ) um barramento hidráulico do MPS devido a uma maior penetração da maré naquele sistema estuarino.

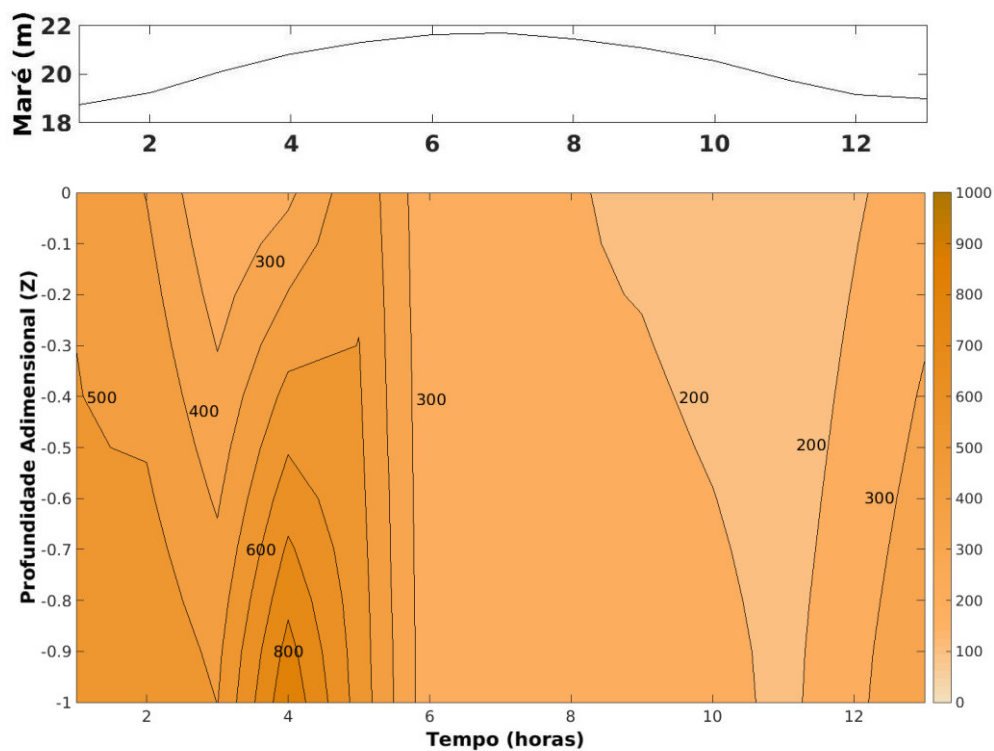


Figura 19 – Variação temporal do MPS ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13h).

5. DISCUSSÃO

Os valores encontrados para temperatura e salinidade são similares aos identificados por Silva Junior (2017) para o mesmo período no ano de 2015. Entretanto, é possível observar um ligeiro aumento de temperatura, sendo os valores mínimo e máximo 2,5% e 0,8% maiores, respectivamente. Estes dados, se comparados aos do estudo realizado por Lefrève (2017) no CESM no ano de 2014, permitem identificar um leve aumento na temperatura local, além de redução da amplitude térmica de 1°C para aproximadamente 0,4°C. Estudo realizado por Lopes (2018) para a estação de chuva de 2017 no CESM também seguiu este ritmo crescente, mostrando valores entre 28,53 e 28,78 °C. Dias et al. (2011) observou valores similares deste parâmetro para o Rio Jaguaribe (CE), dominado pela ação de mesomaré. O Complexo Estuarino Arraial-São José (CEASJ), que apresenta ligação com o CESM através do Estreito dos Mosquitos, apresentou uma amplitude térmica de 0,3 °C em estudo realizado nas mesmas condições de período seco sob ótica euleriana em 2014 por Santos (2018).

Para salinidade no CESM, é possível observarmos uma maior amplitude que a obtida em 2015 por Silva Junior (2017), onde os mínimos de salinidade obtidos neste estudo são 7,3% menores, enquanto que os valores máximos são 2,2% maiores. Os gradientes verticais de salinidade no tempo descritos por Dias (2011) e Santos (2018) mostram variações de 19 gkg⁻¹ e 4,1 gkg⁻¹, respectivamente, sendo este último o mais próximo da amplitude identificada no CESM. A pequena variação observada neste estudo sugere um elevado processo de mistura vertical.

Tabela 2 – Valores mínimos e máximos de temperatura e salinidade dos estuários do CESM, CEASJ e rio Jaguaribe. 1 – LEFÈVRE, N. et al.; 2 – SILVA JUNIOR, R.M.; 3 – SANTOS, V.H.M.; 4 – DIAS, F.J.S.

Estuários	Temperatura	Salinidade
CESM (2014) ¹	27 a 28°C	26 a 33 gkg ⁻¹
CESM (2015) ²	27,9 a 28,8 °C	28,7 a 31,6 gkg ⁻¹
CEASJ ³	28,2 a 28,5 °C	30,0 a 34,1 gkg ⁻¹
Rio Jaguaribe (CE) ⁴	28,9 a 29,5 °C	17 a 36 gkg ⁻¹
Este estudo	28,61 a 29,05 °C	28,49 a 31,67 gkg⁻¹

Foi possível identificar neste estudo a presença de duas massas de água: Água de Frente (AF) e a Água do Rio (AR). Em maré vazante, onde a força da descarga fluvial é maior que a da componente marinha, é possível observarmos os menores valores de salinidade. Em maré enchente, onde a influência marinha é dominante, é possível observar menor presença de AR em resposta ao avanço da AF estuário acima. O movimento turbulento causado por este encontro é evidenciado pelo número de Richardson por camada (Ri_L), corroborando os dados que sugerem instabilidade da coluna d'água. Valores de Ri_L maiores que 2 e menores que 20 puderam ser identificados próximo aos momentos de inversão de velocidade, indicando fraca estabilidade vertical. Este aumento pode ser identificado ao realizar a análise da componente longitudinal de velocidade, que evidencia redução da velocidade. A instabilidade vertical, mais presente ao longo do estudo, gera um barramento hidráulico do volume fluvial na região, como observado por Santos (2016), que identificou que o regime de macromarés atuante na região do CEASJ, somado ao grande aporte fluvial, gerava uma elevação na superfície livre da região acarretando em um barramento hidráulico, concluindo que este gerava o aprisionamento do MPS oriundo de fontes fluviais.

A variação temporal da componente longitudinal de velocidade mostra que a região portuária do CESM possui elevada hidrodinâmica, com os maiores valores sendo observados em maré vazante, 37% maiores que os de enchente. Ressaltamos que a estabilidade das correntes em maré enchente foi o dobro da encontrada em maré vazante. Entretanto, ao analisarmos o perfil médio desta componente é possível identificar que as correntes de vazante apresentam predominância, com velocidade residual de $0,11 \text{ ms}^{-1}$ (estuário abaixo). Comparados aos dados obtidos por Silva Junior (2017), que observou os valores $-5,8 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ e $1,6 \text{ ms}^{-1}$ para as máximas de enchente e vazante, respectivamente, o valor máximo para enchente foi significativamente maior que aquele de 2015, enquanto o valor máximo foi pouco menor. Podemos observar que os picos da maré ocorrem em torno de duas horas após a inversão da velocidade, indicando que após a redução de velocidade o movimento continua, ou seja, ocorre um período inercial. Este fato também foi observado por Magalhães (no prelo) na mesma região, que identificou uma defasagem em torno de duas horas entre a inversão de velocidade e o estofa da preamar e de aproximadamente uma hora para o estofa da baixa-mar. É possível identificar também que, com a redução das velocidades de vazante, a força da maré consegue sobrepor-se antes mesmo de ocorrer a inversão da velocidade.

Apesar de esperar-se que em maré de quadratura menos energia se encontre disponível na coluna d'água para ocasionar a mistura da água de origem fluvial com a do mar de acordo com o proposto por Miranda et al (2002), encontrou-se valores significativamente maiores para anomalia de energia potencial que aqueles identificados em maré de sizígia por Silva Junior (2017), em uma ordem de grandeza. Conseqüentemente o potencial energético também foi maior, registrando 73 GWhano^{-1} neste estudo contra 62 GWhano^{-1} encontrados em 2015. Considerando-se um consumo médio por residência de 157 KWh/mês (EPE, 2017), pode-se sugerir que a região possui potencial energético para abastecer aproximadamente 39 mil casas. Cada vez mais se discute o uso fontes alternativas de energia limpa e, ao observar o potencial energético encontrado neste estudo, pode-se dizer que a energia maremotriz pode surgir como uma opção de energia renovável com pequeno impacto ao meio ambiente.

O diagrama Estratificação-Circulação de Hansen & Rattray (1966) nos permitiu identificar que o CESM apresentou valores de “ γ ” da ordem de 1, um indicativo que o estuário é caracterizado como do tipo 1a (bem misturado e fracamente estratificado), nos levando à conclusão de que o transporte de sal estuário acima é realizado inteiramente por difusão turbulenta e forçado predominantemente pela maré, situação também observada por Santos (2018) para o Complexo Estuarino Arraial-São José. Dias (2011) ressaltou que o processo de difusão turbulenta foi o principal mecanismo no transporte de sal para o estuário do rio Jaguaribe, permitindo concluir que os comportamentos foram semelhantes, uma vez que a maior força da maré gera instabilidade vertical e, conseqüentemente, maior processo de mistura.

A descarga fluvial e deriva de Stokes foram as principais forçantes responsáveis pelo transporte advectivo de sal no sistema estuarino, com pequena influência de correntes de maré, cujos valores indicam transporte estuário acima. Entretanto, a descarga fluvial apresenta um valor considerável, fazendo com o que o transporte estuário abaixo seja intenso. Miranda et al. (2002) descreveu a deriva de Stokes como parcela comumente significativa em regiões de macromaré, fato que pôde ser comprovado neste estudo, entretanto, o sentido comumente encontrado é estuário abaixo, enquanto neste estudo encontrou-se movimento sentido estuário acima. Os valores encontrados foram maiores, porém ainda similares aos encontrados por Silva Junior (2017), que identificou como parcelas principais as mesmas descritas por este estudo. A descarga fluvial em 2015 foi 22% menor que a observada em 2017, enquanto a deriva de Stokes foi 71% menor.

A análise das concentrações de MPS permitiu identificar valores que variaram de 108 mgL⁻¹ a 880,6 mgL⁻¹, os maiores valores encontrados próximo aos momentos de menor velocidade em maré enchente, ressaltando a influência da maré na concentração de material particulado. Comparados àqueles encontrados por Santos (2016) para o CEASJ, a mínima é 160% maior, enquanto a máxima é 8% menor. Corrêa (2017) identificou o local como sendo uma região com grande quantidade de material em suspensão, caracterizada por uma elevada turbidez mesmo na época de seca, onde a descarga fluvial é pouco significativa devido ao baixo volume pluviométrico. Assim, a maré e o vento são variáveis que possibilitam o transporte de mistura do MPS na coluna de água. Também foi observado pela mesma e por Corrêa (2016) que o MPS da região possui um comportamento não conservativo com uma perda expressiva em relação ao aumento da condutividade elétrica e que ocorre diminuição do MPS com o aumento da salinidade, permitindo dizer que a região é retentora de sedimentos. De acordo com Santos (2016), a ciclagem de MPS nos estuários em estação seca e maré de quadratura se deve ao fato de uma possível ressuspensão do sedimento de fundo e/ou erosão de margens, devido à propagação da onda de maré mais atuante no período, já que o fluxo fluvial é reduzido e assim boa parte do fluxo de MPS proveniente deste pode não chegar ao complexo estuarino. Isto também foi constatado por Uncles et al. (2002), que identificaram que a turbidez estuarina depende principalmente do alcance da maré e do comprimento de sua intrusão, assim, estuários com forte influência da maré têm altas concentrações de MPS. Além disso, estudos realizados pelo NUGEO/UEMA (2016) identificaram a região do CESM como de alta erosividade.

6. CONCLUSÃO

Durante a estação seca de 2017, foi possível observar no ponto de amostragem a presença de duas massas de água que variam de acordo com a forçante; Em maré enchente há um predomínio de AF e em maré vazante AR, corroborando a classificação observada no diagrama de estratificação-circulação (estuário bem misturado).

Foi possível identificar, com base em comparações com outros trabalhos realizados no CESM, um ligeiro aquecimento das águas, que poderia indicar alterações na temperatura média local. Esta colocação, entretanto, necessita de análises mais aprofundadas uma vez que a coleta de dados de temperatura pontual pode não refletir o comportamento padrão, porém se comprovada, esta elevação pode afetar negativamente a biota marinha.

No geral, as velocidades mais intensas foram encontradas em maré vazante, bem como o valor residual, com picos da maré ocorrem em torno de duas horas após a inversão da velocidade. Os valores encontrados para anomalia de energia potencial são ainda maiores que os encontrados anteriormente para a região na mesma época, reafirmando o potencial energético que o CESM possui. Cada vez mais se buscam novas fontes de energia e a energia maremotriz surge como uma alternativa possivelmente viável e amigável ao meio ambiente.

A observação de alta turbulência na coluna de água feita através do estudo do Ri_L apesar de pequenos momentos de fraca estabilidade vertical nos leva a sugerir que intensos processos de mistura e de turbulência ocorrem no CESM. A análise dos parâmetros de estratificação e circulação também contribui para esta observação. A intensa instabilidade vertical permite sugerir que ocorrem movimentos na coluna de água que ocasionam a ressuspensão de sedimentos e MPS na coluna de água. Além disso, a erosão das margens identificada em estudos anteriores pode ser um grande contribuidor para a quantidade de MPS encontrada. As parcelas predominantes do transporte de sal durante essa amostragem foram os transportes gerados pela descarga fluvial e pela deriva de Stokes, com predominância sentido estuário abaixo.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, R. F., ALFREDINI, P. **Modelação Hidrossedimentológica no Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão**. Diretoria da ABRN, v. 15, n. 2, p. 5. 2010.
- BERGAMO, A. L. **Características da Hidrografia, Circulação e Transporte de sal: Barra de Cananéia, sul do mar de Cananéia e Baía do Trapandé**. Universidade de São Paulo – USP, Pós-graduação do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Tese de Mestrado. p. 254. 2000.
- BINDOFF, N. L., ROSENBERG, M. A., WARNER, M. J. **On the circulation and water masses over the Antarctic continental slope and rise between 80 and 1501 E**. Deep-Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography 47777(12-13), p. 2299-2326. 2000.
- BOWDEN, K.F. Mixing processes in estuaries. In: Kjerfve, B. (ed.). **Estuarine Transport Processes**. W. Belle Baruch Institute Library in Marine Science, n. 7, University of South Carolina Press, Columbia, SC, p. 11-36, 1978.
- CORRÊA, M. C. **Hidrogeoquímica dos sólidos totais em suspensão no estuário do Rio Mearim**. Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Trabalho de Conclusão do Curso - Departamento de Oceanografia e Limnologia, Universidade Federal do Maranhão. 2016.
- CORRÊA, M.C. **Caracterização elementar, isotópica e biogeoquímica da matéria orgânica particulada e dissolvida no complexo estuarino da baía de São Marcos, São Luís – MA**. Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Pós-graduação em Oceanografia. Tese de Mestrado. 2017.
- DIAS, F. J. S.; LACERDA, L. D.; MARINS, R. V.; PALA, F. C. F. **Comparative analysis of rating curve and adp estimates of instantaneous water discharge through estuaries in two contrasting brazilian rivers**. *Hydrological Process.*, DOI:100.1002/hyp.7972. 25, n. 2, p. 2188-2201. 2011.
- DIAS F.J.S., CASTRO B.M., LACERDA L.D. **Continental shelf water masses off the Jaguaribe River (4S), northeastern Brazil**. *Continental Shelf Research*, Volume 66, 1 September 2013, p. 123-135. 2013.
- DYER, K.R. The salt balance in stratified estuaries. *Estuarine and Coastal Marine Science*, v. 2, n. 3, p. 273-281, 1974.
- DYER, K.R. **Estuaries: A physical introduction**. 2ª ed. John Wiley & Sons, N. Y. p.195. 1997.

EMERY, W. J; THOMPSON, R. E, 2001. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. **Elsevier Science**, Amsterdam, 2001, Pages XI-XII, ISBN 9780444507563. Disponível em: <<http://sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444507563500009>>.

EMILSON, I. **The shelf and coastal Waters off Southern Brazil**. Bulletin of Oceanography, Intute of São Paulo University 11(2), 44-54. 1961.

EPE – EMPRESA DE PESQUISAS ELÉTRICAS. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018 – ano base 2017**. Em (<http://www.epe.gov.br>) Acesso em 15 de novembro de 2018.

FEITOSA, A.C. **Evolução geomorfológica do litoral norte da Ilha do Maranhão**. Dissertação do Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 1989.

FISCHER, H. B. Mixing and dispersion in estuaries. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 8, p. 107-133, 1976.

HANSEN, D. V; RATTRAY, M. 1966. New dimensions in estuarine classification. **Limnol. Oceanogr.** (11): 319-326.

HUNKINS, K. Salt dispersion in the Hudson estuary. **Journal of Physical Oceanography**, v. 11, n. 5, p. 729-738, 1981.

INMET – INTISTUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Precipitações históricas para o Complexo Estuarino de São Marcos**. Em (<http://inmet.gov.br>) Acesso em 15 de junho de 2018.

IZUMI, V. M. **Comparação entre as desembocaduras do complexo estuarino do Cassurubá (BA): Características Hidrográficas e Hidrodinâmicas**. Universidade de São Paulo – USP, Pós-graduação do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Tese de Mestrado, p. 136.

JICKELLS, A.T.D.; ANDREWS, J.E.; PARKES, D.J. Direct and indirect effects os estuarine reclamation on nutriente and metal fluxes in the global coastal zone. **Aquatic Geochemistry**, v. 22, n. 4, p. 337-348, 2016.

KJERFVE, B. Velocity averanging in estuaries characterized by a large tidal range to depth ratio. **Estuarine and Coastal Marine Science**, (3): 311-323. 1975.

LEFÈVRE, N. et al. A source of CO₂ to the atmosphere throughout the year in the maranhense. **Continental Shelf Research**, v. 141, n. May, p. 38-50. 2017.

LOPES, E.K.A. **Variação das massas de água no Complexo Estuarino de São Marcos durante a estação de chuva de 2017**. Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Trabalho de Conclusão de Curso. 2018.

MAGALHÃES, A.C.R. **Marés e correntes na otimização de manobras de navios na baía de São Marcos, São Luís – MA**. Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Pós-graduação em Oceanografia. No prelo.

MASCARENHAS, J. A. S., MIRANDA, L. B., ROCK, N. J. **A study of the oceanographic conditions in the region of Cabo Frio**. In: Costlow JR., J. D (Ed.), *Fertility of the sea*, vol. 1. Gordon and Breach, New York, p. 285-308, 1971.

MILLIMAN, J.D. et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf. *Continental Shelf Research*, v.4, n. 1-2, p. 37-45, 1985.

MIRANDA, L.B. **Forma de correlação T-S de massas de água das regiões costeira e oceânica entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP), Brasil**. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1985.

MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: EDUSP, 2002.

MORAIS, J. O., Processos de sedimentação na Baía de São Marcos, Estado do Maranhão, Brasil. **ARQ. CIEN. MAR**, 17(2): 153-164. 1977.

NUNES, R.A., LENNON, G.W., SAMARASINGHE, J.R.S. The negative role of turbulence in estuarine mass transport. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 28, 361-377. 1989.

OKUNDA, T. **Physical and chemical oceanography over continental shelf between Cabo Frio and Vitoria (central Brazil)**. *Journal of the Oceanographical Society of Japan* 1,514-540. 1962.

PRITCHARD, D.W. **Estuarine circulation patterns**. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* 81(717),1-11. 1995

SANTOS, V.H.M. **Variação Sazonal do Material Particulado em Suspensão dos Igarapés Perizes e Sampaio: Baía do Arraial (MA)**. Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Trabalho de Conclusão de Curso. 2016.

SANTOS, V.H.M. **Caracterização das condições oceanográficas em estuários de macromaré: Complexo Estuarino Arraial-São José.** Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Pós-graduação em Oceanografia. Tese de Mestrado. 2018.

SIEGLE, E., SCHETTINI, C.A.F.; KLEIN, A.H.F., TOLDO JR., E.E. Hydrodynamics and suspended sediment transport in the Camboriú estuary – Brazil: Pre jetty conditions. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57, n. 2, p. 123-135, 2009.

SILVA, V. G. **Modelagem dos padrões de circulação local e transporte de sedimentos dragados no Complexo Estuarino de São Marcos, São Luís, MA.** Universidade Federal Fluminense – UFF, Pós-graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense. Tese de Mestrado. 2016.

SILVA JUNIOR, R.M. **Dinâmica hidrológica em um estuário de macromaré localizado na interface amazônica-semiárido: Complexo Estuarino de São Marcos.** Universidade Federal do Maranhão – UFMA, Trabalho de Conclusão de Curso. 2017.

SOUZA FILHO, P. W. M. Costa de manguezais de macromarés da Amazônia: Cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 427-435, 2005.

SPERB, R.M.; MODRO, N.R.; MARTINS, A.; PACHECO, R.C.S. **Classificação de massas de água: Um enfoque difuso.** Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção – PPGEP. 1999

STRICKLAND, J.D.H. & PARSONS, T.R. **A practical handbook of seawater analysis.** Bulletin Fisheries Research Board of Canada, v.167, p. 1-311. 1972.

TOMCZAK, M. Some historical, theoretical and applied aspects of quantitative water mass analysis. **Journal of Marine Research**, (57), 275-303. 1999.

UEMA. Universidade Estadual do Maranhão. 2016. **Bacias Hidrográficas e Climatologia do Maranhão.** Núcleo Geoambiental, 2016.

UNCLES, R.J.; STEPHENS, J.A.; LAW, D.J. Turbidity maximum in the macrotidal, highly turbid Humber Estuary, UK: Flocs, fluid, mud, stationary suspensions and tidal bores. Estuarine, **Coastal and Shelf Science**, v. 67, n. 1-2, p. 30-52, 2006.