



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO - UFMA
PRÓ-REITORA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA - PPG OCEANO
MESTRADO ACADÊMICO EM OCEANOGRAFIA

**CIRCULAÇÃO E TRANSPORTE DE MATERIAIS NA REGIÃO PORTUÁRIA DO
COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS (CESM) - MARANHÃO, BRASIL**

JULIANA MARQUES COELHO BORBA

SÃO LUÍS - MA

2020

JULIANA MARQUES COELHO BORBA

**CIRCULAÇÃO E TRANSPORTE DE MATERIAIS NA REGIÃO PORTUÁRIA DO
COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS (CESM) - MARANHÃO, BRASIL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À BANCA DE AVALIAÇÃO E SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA (PPGOCEANO) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO (UFMA), COMO REQUISITO NECESSÁRIO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM OCEANOGRAFIA.

ORIENTADOR: COORDENAÇÃO DO PPGOCEANO- PROF. DR. RICARDO LUVIZOTTO SANTOS

AGÊNCIA DE FOMENTO: FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA E DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO DO MARANHÃO (FAPEMA).

LINHA DE PESQUISA: DINÂMICA DE SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS

SÃO LUÍS - MA

2020

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

Borba, Juliana Coelho.

CIRCULAÇÃO E TRANSPORTE DE MATERIAIS NA REGIÃO
PORTUÁRIA DO COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS CISM -
MARANHÃO, BRASIL / Juliana Coelho Borba. - 2020.

134 p.

Orientador(a): Ricardo Luvizotto Santos.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Oceanografia/ccbs, Universidade Federal do Maranhão, São
Luis, 2020.

1. Correntes. 2. Espaço-temporal. 3. Estrutura
Termohalina. 4. Hidrodinâmica. 5. Material Particulado
em Suspensão. I. Santos, Ricardo Luvizotto. II. Título.

JULIANA MARQUES COELHO BORBA

**CIRCULAÇÃO E TRANSPORTE DE MATERIAIS NA REGIÃO PORTUÁRIA DO
COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS (CESM) - MARANHÃO, BRASIL**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM OCEANOGRAFIA-PPGOCEANO DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DO MARANHÃO-UFMA, COMO REQUISITO NECESSÁRIO PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM OCEANOGRAFIA.

JULGADA EM 09 DE NOVEMBRO DE 2020

COMISSÃO EXAMINADORA

PROF. DR. RICARDO LUVIZOTTO SANTOS (UFMA)

PROF. DR. AUDÁLIO REBELO TORRES JÚNIOR (UFMA)

PROF. DR. ALESSANDRO LUVIZON BERGAMO (UNIFEI)

SÃO LUÍS - MA

2020

“Não importa o que aconteça, continue a nadar.”
(WALTERS GRAHAM; **PROCURANDO NEMO**, 2003)

Ao meu grande mestre, meu avô, **Fernando Pessoa Borba** e a mulher que me inspira todos os dias, minha **Mãe**. Muito obrigada pelo apoio e amor incondicional. É por vocês.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Foram muitos os que contribuíram de algum modo para a conclusão deste trabalho. Sendo assim, dedico este trecho para expressar minha enorme gratidão para com elas.

Agradeço ao meu **Deus**, pelo dom da vida, por ter me dado saúde e renovado minha fé todos os dias, não deixando que eu desistisse. Graças por sua infinita bondade e misericórdia...

Sou grata ao Coordenador do PPGOceano Prof. Dr Ricardo Luvizotto Santos pelo direcionamento necessário para concluir o presente trabalho.

Ao coordenador do projeto Prof. Dr. **Francisco José da Silva Dias**, que me deu uma oportunidade de fazer parte do LHiCEAI. Agradeço pelas oportunidades oferecidas a mim, como: embarques oceanográficos, a recursos financeiros e a estrutura física do laboratório.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Maranhão (**FAPEMA**) pelo auxílio financeiro, através de bolsa de pesquisa a mim concedida e auxílio ao projeto: Circulação Hidrodinâmica, Massas de Água e Potencial Energético na Região Portuária do Complexo Estuarino de São Marcos (MA-Brasil) - BM QUOTA UFMA 2019, Número do Processo: BM-05424/19, concedidos ao Dr. Francisco José Da Silva Dias, Termo: 003048/2019.

Sou muito grata a equipe técnica do **Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores (LHiCEAI/UFMA)**: a **Vivian Salles** pela coleta e organização impecável dos dados que me foram repassados, a **Rômulo Soares** e **Vinicius Santos** pelo apoio técnico e ajuda com os softwares. Em especial, agradeço imensamente a **Eduardo Kayk**, **Hugo Lima**, **Pedro Serra**, **Rubens Júnior** e **Tainá Maia** pela amizade, por me ensinarem com paciência a tratar dados e por me auxiliarem com inúmeras dúvidas. Sou muito grata a ajuda de **Jeff** (Serejo, 2016), por todas as correções do meu texto e suas valiosas contribuições. Muito obrigada a **Kassandra Borges** e **Kerlem Luina** pelo companheirismo, amizade, ajuda e bate-papos nas tardes do "Tea-Science". Obrigada meninas, vocês foram essenciais nessa jornada.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia (**PPGOceano**) da UFMA, em especial aos meus professores, que me acompanharam desde a graduação: **Prof. Marco Valério**, Prof^a. **Claudia Klose**, Prof^a. **Mariana Jorge** e Prof. **Ricardo Luvizzoto**. Obrigada por seus ensinamentos e valiosas trocas de conhecimento durante as aulas. Agradeço também a **Oscar** e **Walesca** pelo trabalho na secretária do PPGOceano.

Aos membros da minha banca: Agradeço ao Prof. **Audálio Torres**, pelos ensinamentos durante a graduação e no mestrado, além de suas valiosas contribuições na defesa e qualificação desse trabalho e ao Prof. **Alessandro Bérnago** pela disponibilidade e por ter sido tão solícito desde o primeiro e-mail e por todas as contribuições na minha qualificação.

Gostaria de agradecer a minha turma de mestrado (2018.1), em especial: **Débora**, **Cadja**, **Milene**, **Walterly**, **Erlík** e **Marcos Eduardo**. Muito obrigada pessoal, pelos perrengues e momentos de descontração.

Quero agradecer por toda força, orações e alicerce que recebi da minha Família, aos **Marques** pelo carinho e cumplicidade, a minha Família **Coelho** pelo apoio e força e a minha família **Borba** por acreditarem em mim e me incentivar a colimar meus objetivos.

Aos meus queridos amigos: **Lis Maria**, **Dandan**, **Priscila Carvalho**, **Karoline Dias**, **Ivan Santana**, **Rayane Campos**, **Ana Patrícia**, **George**, eu sou muito grata pela ajuda de cada um de vocês. Obrigada por todas as palavras de apoio e momentos juntos. A **Matheus Santos** por ter sido meu ouvinte e confidente nas longas conversas motivadoras durante essa etapa, muito obrigada pelo teu suporte.

Ao meu psicólogo, **Felipe Fook**, obrigada por todo apoio e atendimento no período de pandemia. Todo cuidado e conselhos foram cruciais para que eu terminasse este trabalho.

RESUMO

O conhecimento do comportamento hidrossedimentológico em áreas costeiras é muito relevante para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, desenvolvimento, uso do solo e recursos hídricos. No conjunto dos ambientes costeiros e da logística portuária, encontra-se o Complexo Portuário de São Luís-CPSL, maior e mais importante complexo portuário da costa Norte-Nordeste (composto por 4 principais portos) e o segundo da América Latina, no que concerne ao fluxo de cargas. Com o objetivo de entender como a circulação hidrodinâmica e as massas d'água influenciam no transporte de materiais e constituintes no Complexo Estuarino de São Marcos (CESM), foi realizada uma caracterização a partir da análise de dados (conservativos e não conservativos, velocidade e direção das correntes) ao largo do CPSL. As duas campanhas (abordagem espacial e temporal) ocorreram em 2017, contemplando os diferentes períodos (sizígia e quadratura) e estágios (enchente e vazante) da maré e em regimes sazonais e condições de descarga fluvial distintas (chuva e fim da chuva). Os equipamentos utilizados para aquisição de dados foram o *ADCP*, *CTD* e uma garrafa de *van Dorn*. Por meio dos dados das estruturas térmicas e salinas observadas no CESM, observou-se águas mais frias e mais salinas ($S_a=30,8$) na estação de chuva, caracterizando uma Água Costeira (AC) e na estação de fim da chuva observou-se águas menos salinas e mais quentes, caracterizando uma Água Estuarina (AE) ($S_a=25,8$), o que ocasionou percentuais de água doce (31%) e tempo de residência (2 horas) maiores nesse período. As intensidades das correntes apresentaram máximo valor da ordem de $2,3 \text{ m s}^{-1}$ que ocorreu em ambas as marés e períodos sazonais. A componente longitudinal foi mais intensa na vazante ($1,56 \text{ m s}^{-1}$ Fundeio I e $1,13 \text{ m s}^{-1}$ no Fundeio II). As concentrações de MPS apresentaram-se elevadas ($>550 \text{ mg L}^{-1}$), com valores médios de aproximadamente 200 mg L^{-1} e maiores concentrações no período chuvoso. Mesmo assim, o ambiente mostrou altas concentrações de oxigênio dissolvido ($\text{OD} >200 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$). As maiores vazões ocorreram na estação de chuva ($33000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) e no fim da estação chuvosa foram mais baixas ($27400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), com 60% dos valores do balanço de carga mostrando um comportamento importador, em ambos os períodos sazonais. O volume de água total variou da ordem de 10^7 m^3 a 10^9 m^3 , sendo mais elevado no período de chuva. A variabilidade dos fluxos médios de sedimento em suspensão foi de $1243,99 \text{ Ton.h}^{-1}$ no período chuvoso e de $741,65 \text{ Ton.h}^{-1}$ no final do período chuvoso, ambos em maré vazante, com porcentagens acima de 80% deste material ficando retido nas radiais mais internas do CESM, próximas aos berços de atracação do Porto do Itaqui. De todo modo, é oportuno reforçar que os fluxos de MPS associado à variabilidade das condicionantes ambientais e mudanças climáticas modelam a região estuarina, sendo preciso um monitoramento contínuo devido a atividades potencialmente danosas, como possíveis acidentes náuticos ou a derramamentos de óleo ou qualquer contaminante na região que acarrete inutilização ao meio e a região costeira. Os resultados apresentados enfatizaram o quão complexo e dinâmico é o sistema estuarino de São Marcos, no que diz respeito ao entendimento das mudanças que ocorrem no transporte hidrodinâmico e de materiais em estuários regidos por macromaré situados na interface Amazônia Semiárido.

Palavras-chave: Correntes, espaço-temporal, estrutura termohalina, hidrodinâmica, material particulado em suspensão

ABSTRACT

Knowledge of hydrosedimentological behavior in coastal areas is very relevant for the maintenance of ecosystem services, development, land use and water resources. In the set of coastal environments and port logistics, there is the Port Complex of São Luís-CPSL, the largest and most important port complex on the North-Northeast coast (composed of 4 main ports) and the second in Latin America, with regard to the flow of loads. In order to understand how hydrodynamic circulation and water bodies influence the transport of materials and constituents in the São Marcos Estuarine Complex (CESM), a characterization was carried out based on data analysis (conservative and non-conservative, speed and direction of currents) off the CPSL. The two campaigns (spatial and temporal approach) took place in 2017, covering the different periods (spring tide and square tide) and stages (flood and ebb) of the tide and in different seasonal regimes and fluvial discharge conditions (rain and end of rain). The equipment used for data acquisition was the ADCP, CTD and a *van Dorn* bottle. Through the data on the thermal and saline structures observed at CESM, cooler and more saline waters ($Sa = 30.8$) were observed in the rainy season, characterizing a Coastal Water (CW) and in the end of the rainy season it was observed if less saline and warmer waters, featuring an Estuarine Water (EW) ($Sa=25.8$), which resulted in percentages of fresh water (31%) and residence time (2 hours) higher in this period. The current intensities showed a maximum value of around 2.3 m s^{-1} that occurred in both tides and seasonal periods. The longitudinal component was more intense in the ebb (1.56 m s^{-1} in Mooring I and 1.13 m s^{-1} in Mooring II). MPS concentrations were high ($> 550 \text{ mg L}^{-1}$), with average values of approximately 200 mg L^{-1} and higher concentrations in the rainy season. Even so, the environment showed high concentrations of dissolved oxygen ($OD > 200 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$). The highest flows occurred in the rainy season ($33000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) and at the end of the rainy season they were lower ($27400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), with 60% of the load balance values showing an import behavior, in both seasonal periods. The total water volume ranged from 10^7 m^3 to 10^9 m^3 , being higher during the rainy season. The variability of the average suspended sediment flows was $1243.99 \text{ Ton.h}^{-1}$ in the rainy season and $741.65 \text{ Ton.h}^{-1}$ at the end of the rainy season, both at low tide, with percentages above 80% of this material being retained in the innermost radials of CESM, close to the berths of the Port of Itaquí. In any case, it is worth emphasizing that the MPS flows associated with the variability of environmental conditions and climate changes shape the estuarine region, requiring continuous monitoring due to potentially harmful activities, such as possible nautical accidents or oil spills or any contaminants in the water. region that results in destruction of the environment and the coastal region. The results presented emphasized how complex and dynamic the São Marcos estuarine system is, with regard to understanding the changes that occur in hydrodynamic and material transport in estuaries governed by macro tides located at the Amazon Semi-Arid interface.

Keyword: Currents, space-time, thermohaline structure, hydrodynamics, suspended particulate material.

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AC - Água Costeira
ADCP - *Acoustic Doppler Current Profiler*
AE – Água Estuarina
AF – Água de Frente
APHA - *American Public Health Association*
AR - Água de Rio
AT - Água Tropical
BHRM-Bacia Hidrográfica do Rio Mearim
BSM - Baía de São Marcos
CESM - Complexo Estuarino de São Marcos
CEASJ – Complexo Estuarino Arraial São José
CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPSL - Complexo Portuário de São Luís
CPPM – Complexo Portuário da Ponta da Madeira
CTD – *Conductivity, Temperature and Depth*
DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação
dbar - decibar
EMAP - Empresa Maranhense de Administração Portuária
et al. - entre outros
FAPEMA - Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão
F-I – Fundeio I
F-II – Fundeio II
g - grama
g kg⁻¹ - gramas por quilograma
hab.km² - Habitantes por quilômetros quadrados
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
km³ ano⁻¹ – Quilômetros cúbicos por ano
km² - quilômetros quadrados
LHICEAI Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores
MA – Maranhão
mg L⁻¹ miligrama por litro
m - metros
m³ s⁻¹ - metros cúbicos por segundos
mS cm⁻¹ - milisiemens por centímetro
MPS - Material Particulado em Suspensão
m s⁻¹ – metros por segundo
N - Norte
NE - Nordeste
No - Noroeste
NUGEO - Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão
OD - Oxigênio Dissolvido
PAD – Percentual de Água Doce
Pc - Parâmetro de Circulação
PCA - Plataforma Continental Adjacente
Pe - Parâmetro de Estratificação

PM - Preamar
RiL - Número de Richardson por camada
S – Salinidade
Sv – Sverdrup ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)
T – Temperatura
TEOS-10 - *Termodinamic Equations of Sea Water*
TMPM - Terminal Marítimo de Ponta da Madeira
TPE – Terminal da Ponta da Espera
 T_R – Tempo de Residência
 T_S - Transporte de sal
 T_V – Transporte de Volume
 u - Componente Longitudinal do Vetor de Velocidade
 u_a - Velocidade residual de u
 u_f - Velocidade gerada pela descarga fluvial
UEMA – Universidade Estadual do Maranhão
UFMA - Universidade Federal do Maranhão
 v - Componente Transversal do Vetor de Velocidade
 V_{fw} - Volume de Água Doce
 V_T – Volume Total
 z – Profundidade local
Z - Profundidade adimensional
ZC – Zona Costeira
ZCIT – Zona de Convergência Intertropical
ZCM – Zona Costeira do Maranhão
ZMT – Zona de Máxima Turbidez
ZR - Zona Maré de Rio
 ρ - Densidade
 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ micro mol por quilograma

LISTA DE FIGURAS/IMAGENS

FIGURA 1. MAPA MOSTRANDO A LOCALIZAÇÃO DA ZONA COSTEIRA DO MARANHÃO E SUAS SUBDIVISÕES (LITORAL OCIDENTAL, LITORAL ORIENTAL E GOLFO MARANHENSE).	21
FIGURA 2. MAPA MOSTRANDO A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MEARIM E SEUS PRINCIPAIS AFLUENTES. 28	
FIGURA 3. MAPA MOSTRANDO A LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA PARTE INFERIOR DO COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS – CESM.	29
FIGURA 4. GRÁFICO MOSTRANDO A SOMA DAS DESCARGAS DE ACORDO COM A SAZONALIDADE DA REGIÃO, DOS TRÊS PRINCIPAIS RIOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO MEARIM, DURANTE A ESTAÇÃO CHUVOSA (EM AZUL) DE JANEIRO ATÉ JUNHO E DURANTE A ESTAÇÃO SECA (EM LARANJA) DE JUNHO ATÉ DEZEMBRO NOS ANOS DE 1972 A 2017 E AS VAZÕES DOS RIOS DURANTE O ANO DE COLETA (2017). AS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS ESTÃO DISTANTES DO CESM: 172 KM NO RIO MEARIM (#33290000 NA LAT. 4°13'9.84"S; LONG. 44°45'55.08"W), 146 KM NO RIO GRAJAÚ (#33380000 NA LAT. 3°46'19.92"S; LONG. 45°13'5.16"W) E 154 KM NO RIO PINDARÉ (#33190000 NA LAT. 3°39'36.00"S; LONG. 45°28'0.84"W). A LINHA TRACEJADA REPRESENTA O VALOR MÉDIO. FONTE: PORTAL HIDROWEB (HTTP://HIDROWEB.ANA.GOV.BR/) (ANA, 2020).	30
FIGURA 5. MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO COMPLEXO PORTUÁRIO DE SÃO LUÍS (CPSL), SITUADO NA COSTA OCIDENTAL DA ILHA DO MARANHÃO, NO COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS (CESM), ESTA ÁREA PORTUÁRIA ABRANGE O COMPLEXO PORTUÁRIO DE PONTA DA MADEIRA (CPPM); O PORTO DE ITAQUI; O PORTO DA ALUMAR, ALÉM DO TERMINAL DA PONTA DA ESPERA.	32
FIGURA 6. LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM PARA ANÁLISE DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, RADIAIS CORRETOGRÁFICAS E DAS VARÁVEIS DE ESTADO NA ÁREA DO COMPLEXO PORTUÁRIO DE SÃO LUÍS, SITUADO NO COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS.	38
FIGURA 7. EQUIPAMENTO UTILIZADO NESTE ESTUDO: A GARRAFA OCEANOGRÁFICA DO TIPO <i>VAN DORN</i> UTILIZADA PARA AQUISIÇÃO DO MPS NA ÁREA DE ESTUDO.	39
FIGURA 8. REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA MARÉ DURANTE AS AMOSTRAGENS REALIZADAS NA PRIMEIRA CAMPANHA (A), EM MARÉ DE SIZÍGIA, NOS DIAS 14 E 15 DE MARÇO DE 2017 (ESTAÇÃO DE CHUVA) E SEGUNDA CAMPANHA (B) REALIZADA NOS DIAS 01 E 02 DE AGOSTO (FINAL DA CHUVA), EM MARÉ DE QUADRATURA, AO LARGO DO COMPLEXO PORTUÁRIO DE SÃO LUÍS. AS LINHAS PONTILHADAS DE CORES AZUL E AMARELO REPRESENTAM O PERÍODO EM QUE AS AMOSTRAGENS FORAM REALIZADAS DURANTE ENCHENTE E VAZANTE.	40
FIGURA 9. EQUIPAMENTO UTILIZADO NESTE ESTUDO: O CTD (<i>CONDUCTIVITY, TEMPERATURE AND DEPTH</i>) EXO2, YSI, <i>OSHIO</i> , USA ACOPLADO A GRADE DE PROTEÇÃO.	41
FIGURA 10. EQUIPAMENTO UTILIZADO NESTE ESTUDO: O ADCP (<i>ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER</i>) ACOPLADO À PRANCHA E PRESO POR CORDAS NA POPA DA EMBARCAÇÃO.	42
FIGURA 11. (A) AS BARRAS EM AZUL MOSTRAM OS VALORES DE PRECIPITAÇÕES MÉDIAS HISTÓRICAS PARA SÃO LUÍS ENTRE OS ANOS DE 1971 A 2016; A LINHA REPRESENTA AS PRECIPITAÇÕES PARA O ANO DE COLETA, 2017 E AS BARRAS EM CINZA MOSTRAM A PRECIPITAÇÃO REFERENTE HÁ 15 DIAS ANTES DA AQUISIÇÃO DOS DADOS. (B) DADOS SOMADOS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA (MM) PARA OS DIAS DE AQUISIÇÃO DOS DADOS (2017) (INMET, 2017).	57

FIGURA 12. MÉDIA HISTÓRICA DAS VELOCIDADES DOS VENTOS ($m s^{-1}$), REGISTRADOS ENTRE OS ANOS DE 1973 E 2016 E PARA OS MESES DE COLETA DO ANO DE 2017. AS MEDIÇÕES DOS DADOS DE VENTO NAS ESTAÇÕES DO INMET SÃO FEITAS A 10 METROS DE ALTURA.	57
FIGURA 13. GRADIENTE HORIZONTAL DOS VALORES DE SALINIDADE ($g kg^{-1}$) OBSERVADOS NA SUPERFÍCIE E NO FUNDO DA COLUNA DE ÁGUA NO CPSL, DURANTE A 1ª CAMPANHA, PERÍODO CHUVOSO. PAINEL A: SUPERFÍCIE NA ENCHENTE; PAINEL B: SUPERFÍCIE NA VAZANTE; PAINEL C: FUNDO NA ENCHENTE E PAINEL D: FUNDO NA VAZANTE.	60
FIGURA 14. GRADIENTE HORIZONTAL DOS VALORES DE TEMPERATURA ($^{\circ}C$) OBSERVADOS NA SUPERFÍCIE E NO FUNDO DA COLUNA DE ÁGUA NO CPSL DURANTE A 1ª CAMPANHA, PERÍODO CHUVOSO. PAINEL A: SUPERFÍCIE NA ENCHENTE; PAINEL B: SUPERFÍCIE NA VAZANTE; PAINEL C: FUNDO NA ENCHENTE E PAINEL D: FUNDO NA VAZANTE.	61
FIGURA 15. GRADIENTE HORIZONTAL DOS VALORES DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD) ($\mu mol kg^{-1}$) OBSERVADOS NA SUPERFÍCIE E NO FUNDO DA COLUNA DE ÁGUA NO CPSL DURANTE A 1ª CAMPANHA, PERÍODO CHUVOSO. PAINEL A: SUPERFÍCIE NA ENCHENTE; PAINEL B: SUPERFÍCIE NA VAZANTE; PAINEL C: FUNDO NA ENCHENTE E PAINEL D: FUNDO NA VAZANTE.	63
FIGURA 16. GRADIENTE HORIZONTAL DOS VALORES DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS) ($MG L^{-1}$) OBSERVADOS NA SUPERFÍCIE E NO FUNDO DA COLUNA DE ÁGUA NO CPSL DURANTE A 1ª CAMPANHA, PERÍODO CHUVOSO. PAINEL A: SUPERFÍCIE NA ENCHENTE; PAINEL B: SUPERFÍCIE NA VAZANTE; PAINEL C: FUNDO NA ENCHENTE E PAINEL D: FUNDO NA VAZANTE.	64
FIGURA 17. ESTRUTURA VERTICAL E TEMPORAL DE SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B), OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD) (C) E MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS) (D), EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE ADIMENSIONAL Z E DO TEMPO (CICLO DE MARÉ) EM HORAS PARA O FUNDEIO – I DE 13 HORAS DURANTE PERÍODO CHUVOSO, LOCALIZADO AO LADO DA ÍLHA DO MEDO, EM 14 E 15/03/2017, EM CONDIÇÕES DE MARÉ DE SIZÍGIA. A OSCILAÇÃO DE NÍVEL FOI OBTIDA DO REGISTRO DA MARÉ PARA OS DIAS DE COLETA.....	66
FIGURA 18. (A): PERFIL MÉDIO DA SALINIDADE ($g kg^{-1}$) AO LONGO DE UM CICLO COMPLETO DE MARÉ SEMIDIURNA (13 HORAS) PARA O FUNDEIO I DURANTE A ESTAÇÃO CHUVOSA. $\langle S(Z) \rangle$ (LINHA CONTÍNUA) É O PERFIL DA MÉDIA TEMPORAL DA SALINIDADE. (B): PERFIL MÉDIO DA TEMPERATURA ($^{\circ}C$) AO LONGO DE UM CICLO COMPLETO DE MARÉ SEMIDIURNA (13 HORAS), PARA O FUNDEIO I DURANTE A ESTAÇÃO DE CHUVA. $\langle T(Z) \rangle$ (LINHA CONTÍNUA) É O PERFIL DA MÉDIA TEMPORAL DA TEMPERATURA.	67
FIGURA 19. GRADIENTE HORIZONTAL DOS VALORES DE SALINIDADE ($g kg^{-1}$), OBSERVADOS NA SUPERFÍCIE E NO FUNDO DA COLUNA DE ÁGUA NO CPSL DURANTE A 2ª CAMPANHA, FINAL DO PERÍODO CHUVOSO. PAINEL A: SUPERFÍCIE NA ENCHENTE; PAINEL B: SUPERFÍCIE NA VAZANTE; PAINEL C: FUNDO NA ENCHENTE E PAINEL D: FUNDO NA VAZANTE.	70
FIGURA 20. GRADIENTE HORIZONTAL DOS VALORES DE TEMPERATURA ($^{\circ}C$), OBSERVADOS NA SUPERFÍCIE E NO FUNDO DA COLUNA DE ÁGUA NO CPSL DURANTE A 2ª CAMPANHA, FINAL DO PERÍODO CHUVOSO. PAINEL A: SUPERFÍCIE NA ENCHENTE; PAINEL B: SUPERFÍCIE NA VAZANTE; PAINEL C: FUNDO NA ENCHENTE E PAINEL D: FUNDO NA VAZANTE.	71
FIGURA 21. GRADIENTE HORIZONTAL DOS VALORES DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD) ($\mu mol kg^{-1}$), OBSERVADOS NA SUPERFÍCIE E NO FUNDO DA COLUNA DE ÁGUA NO CPSL DURANTE A 2ª CAMPANHA, FINAL	

DO PERÍODO CHUVOSO. PAINEL A: SUPERFÍCIE NA ENCHENTE; PAINEL B: SUPERFÍCIE NA VAZANTE; PAINEL C: FUNDO NA ENCHENTE E PAINEL D: FUNDO NA VAZANTE.	73
FIGURA 22. GRADIENTE HORIZONTAL DOS VALORES DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS) (MG L ⁻¹), OBSERVADOS NA SUPERFÍCIE E NO FUNDO DA COLUNA DE ÁGUA NO CPSL DURANTE A 2ª CAMPANHA, FINAL DO PERÍODO CHUVOSO. PAINEL A: SUPERFÍCIE NA ENCHENTE; PAINEL B: SUPERFÍCIE NA VAZANTE; PAINEL C: FUNDO NA ENCHENTE E PAINEL D: FUNDO NA VAZANTE.	74
FIGURA 23. ESTRUTURA VERTICAL E TEMPORAL DE SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B), OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD) (C) E MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS) (D), EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE ADIMENSIONAL Z E DO TEMPO (HORAS) PARA O FUNDEIO – II DE 26 HORAS, REALIZADO NO FINAL DO PERÍODO CHUVOSO, LOCALIZADA AO LADO ILHA DO MEDO, EM 04 E 05/07/2017, EM CONDIÇÃO DE MARÉ DE QUADRATURA.	76
FIGURA 24. (A): PERFIL MÉDIO DA SALINIDADE (g kg ⁻¹) AO LONGO DE DOIS CICLOS COMPLETOS DE MARÉ SEMIDIURNA (26 HORAS) PARA O FUNDEIO II DURANTE A ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA <S(Z)> (LINHA CONTÍNUA) É O PERFIL DA MÉDIA TEMPORAL DA SALINIDADE. (B): PERFIL MÉDIO DA TEMPERATURA (°C) AO LONGO DE DOIS CICLOS COMPLETOS DE MARÉ SEMIDIURNA (26 HORAS), PARA O FUNDEIO II DURANTE A ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA <T(Z)> (LINHA CONTÍNUA) É O PERFIL DA MÉDIA TEMPORAL DA TEMPERATURA.	77
FIGURA 25. VARIAÇÃO TEMPORAL DA SALINIDADE MÉDIA [s(t)] (LINHA TRACEJADA) NA COLUNA DE ÁGUA E DA SUPERFÍCIE LIVRE [h(t)] (LINHA CONTÍNUA). FIGURA (A) FUNDEIO I DE 13 HORAS; FIGURA (B) FUNDEIO II DE 26 HORAS.	78
FIGURA 26. DIAGRAMA T-S ESPALHADO REFERENTE ÀS DUAS CAMPANHAS AMOSTRAIS AO LARGO DO CPSL. AS ISOPICNAIS REPRESENTAM A DENSIDADE CONVENCIONAL (σ _T). A FORMA DE ESFERA É REFERENTE A ESTAÇÃO DE CHUVA E A FORMA DE TRIÂNGULO É REFERENTE A ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA. COR AZUL – MARÉ ENCHENTE; COR VERMELHA – MARÉ VAZANTE.	80
FIGURA 27. DIAGRAMA T-S ESPALHADO OBTIDO A PARTIR DAS COLETAS DE PERFIS HORÁRIOS DURANTE CICLOS DE MARÉ SEMIDIURNA REALIZADOS AO LARGO DO CPSL. AS ISOPICNAIS REPRESENTAM A DENSIDADE CONVENCIONAL (σ _T). A FORMA DE ESFERA (O) É REFERENTE AO FUNDEIO I – ESTAÇÃO DE CHUVA, MARÉ DE SIZÍGIA (~13 HORAS) E A FORMA DE TRIÂNGULO (Δ) É REFERENTE AO FUNDEIO II – ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA, MARÉ DE QUADRATURA (~26 HORAS).	81
FIGURA 28. REPRESENTAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CAMPO DE CORRENTES (m s ⁻¹), DURANTE A ESTAÇÃO DE CHUVA, EM MARÉ ENCHENTE. PAINEL A: SUPERFÍCIE; PAINEL B: FUNDO.	85
FIGURA 29. REPRESENTAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CAMPO DE CORRENTES (m s ⁻¹), DURANTE A ESTAÇÃO DE CHUVA, EM MARÉ VAZANTE. PAINEL A: SUPERFÍCIE; PAINEL B: FUNDO.	86
FIGURA 30. REPRESENTAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CAMPO DE CORRENTES (m s ⁻¹), DURANTE A SEGUNDA CAMPANHA, ESTAÇÃO DE CHUVA, EM MARÉ ENCHENTE. PAINEL A: SUPERFÍCIE; PAINEL B: FUNDO.	89
FIGURA 31. REPRESENTAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CAMPO DE CORRENTES (m s ⁻¹) DURANTE A SEGUNDA CAMPANHA, ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA, EM MARÉ VAZANTE. PAINEL A: SUPERFÍCIE; PAINEL B: FUNDO.	90

FIGURA 32. ESTRUTURA VERTICAL E TEMPORAL DE (A) VELOCIDADE (INTENSIDADES), (B) COMPONENTE LONGITUDINAL E (C) COMPONENTE TRANSVERSAL, EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE ADIMENSIONAL Z E DO TEMPO (CICLO DE MARÉ) EM HORAS DO FUNDEIO – I DE 13 HORAS DURANTE O PERÍODO CHUVOSO, LOCALIZADO AO LADO DA ILHA DO MEDO, EM 14 E 15/03/2017, EM CONDIÇÃO DE MARÉ DE SIZÍGIA.	92
FIGURA 33. PERFIL MÉDIO DO COMPORTAMENTO LONGITUDINAL DA VELOCIDADE AO LONGO DE UM CICLO COMPLETO DE MARÉ SEMIDIURNA DE 13 HORAS (FUNDEIO I). O $\langle u(Z) \rangle$ (LINHA CONTÍNUA) É O PERFIL DA MÉDIA TEMPORAL DA VELOCIDADE E u_A (LINHA TRACEJADA) É A VELOCIDADE RESIDUAL.....	93
FIGURA 34. VARIAÇÃO TEMPORAL DA VELOCIDADE MÉDIA $[u(T)]$ (LINHA TRACEJADA) NA COLUNA DE ÁGUA E DA SUPERFÍCIE LIVRE $[h(T)]$ (LINHA CONTÍNUA) EM (C) FUNDEIO I E (D) FUNDEIO II.....	94
FIGURA 35. ESTRUTURA VERTICAL E TEMPORAL DE (A) VELOCIDADE LONGITUDINAL, (B) COMPONENTE LONGITUDINAL E (C) COMPONENTE TRANSVERSAL, EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE ADIMENSIONAL Z E DO TEMPO (HORAS) PARA O FUNDEIO – II DE 26 HORAS NO FINAL DO PERÍODO CHUVOSO, LOCALIZADA AO LADO DA ILHA DO MEDO EM 04 E 05/07/2017 EM CONDIÇÃO DE MARÉ DE QUADRATURA.....	96
FIGURA 36. PERFIL MÉDIO DO COMPORTAMENTO LONGITUDINAL DA VELOCIDADE AO LONGO DE UM CICLO COMPLETO DE MARÉ SEMIDIURNA DE 26 HORAS. O $\langle u(Z) \rangle$ (LINHA CONTÍNUA) É O PERFIL DA MÉDIA TEMPORAL DA VELOCIDADE E u_a (LINHA TRACEJADA) É A VELOCIDADE RESIDUAL.	97
FIGURA 37. VARIAÇÃO TEMPORAL DO NÚMERO DE RICHARDSON POR CAMADA (RiL) PARA O FUNDEIO I (13 HORAS) REALIZADO AO LARGO DO CPSL. AS LINHAS TRACEJADAS DELIMITAM $RiL > 20$ MOSTRA UMA CONDIÇÃO DE ALTA ESTABILIDADE; $2 < RiL < 20$ DELIMITA QUE AS CONDIÇÕES SÃO DE FRACA ESTABILIDADE VERTICAL E $RiL < 2$ MOSTRA UMA INSTABILIDADE VERTICAL.	98
FIGURA 38. VARIAÇÃO TEMPORAL DO NÚMERO DE RICHARDSON POR CAMADA (RiL) PARA O FUNDEIO II (26 HORAS), REALIZADOS AO LARGO DO CPSL. AS LINHAS TRACEJADAS DELIMITAM $RiL > 20$ MOSTRA UMA CONDIÇÃO DE ALTA ESTABILIDADE; $2 < RiL < 20$ DELIMITA QUE AS CONDIÇÕES SÃO DE FRACA ESTABILIDADE VERTICAL E $RiL < 2$ MOSTRA UMA INSTABILIDADE VERTICAL.	99
FIGURA 39. DIAGRAMA DE ESTRATIFICAÇÃO-CIRCULAÇÃO PARA CLASSIFICAÇÃO DO ESTUÁRIO (HANSEN & RATTRAY JR., 1966), COM ISOLINHAS DO PARÂMETRO Ni , PROPORÇÃO RELATIVA ($0 < Ni \leq 1$) ENTRE DISPERSIVO E ADVECTIVO PARA O FUNDEIO I (13 HORAS), REALIZADO NA ESTAÇÃO DE CHUVA, EM MARÉ DE SIZÍGIA.....	100
FIGURA 40. DIAGRAMA DE ESTRATIFICAÇÃO-CIRCULAÇÃO PARA CLASSIFICAÇÃO DO ESTUÁRIO (HANSEN & RATTRAY JR., 1966), COM ISOLINHAS DO PARÂMETRO Ni , PROPORÇÃO RELATIVA ($0 < Ni \leq 1$) ENTRE DISPERSIVO E ADVECTIVO, PARA O FUNDEIO II (26 HORAS), REALIZADO NA ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA, EM MARÉ DE QUADRATURA.....	101
FIGURA 41. COMPONENTES DO TRANSPORTE ADVECTIVO DE SAL PARA O FUNDEIO I (13 HORAS). 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 TOTAL DE SAL INTEGRADO DIRETAMENTE AO LONGO DO CICLO DE MARÉ EM (10).....	102
FIGURA 42. COMPONENTES DO TRANSPORTE ADVECTIVO DE SAL PARA O FUNDEIO II (26 HORAS). 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 TOTAL DE SAL INTEGRADO DIRETAMENTE AO LONGO DO CICLO DE MARÉ EM (10).....	103
FIGURA 43. VALORES DO BALANÇO DE CARGAS NAS ESTAÇÕES DE CHUVA E FIM DA CHUVA. VALORES MÉDIOS PARA CADA RADIAL NA ESTAÇÃO DE CHUVA (AZUL) E ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA (AMARELO).	106
FIGURA 44. GRÁFICO DE DISPERSÃO MOSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE O TEMPO DE RESIDÊNCIA (<i>TR</i>) E O PERCENTUAL DE ÁGUA DOCE (<i>Pad</i>) PARA AS CINCO RADIAIS AO LARGO DO CPSL, DURANTE A ESTAÇÃO DE CHUVA (1ª CAMPANHA) E ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA (2ª CAMPANHA), EM MARÉ ENCHENTE (AZUL) E VAZANTE (AMARELO).	107
FIGURA 45. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO PERCENTUAL DE ÁGUA DOCE (%) EM MARÉ ENCHENTE (A) E MARÉ VAZANTE (C) E TEMPO DE RESIDÊNCIA (<i>TR</i>) EM MARÉ ENCHENTE (B) E MARÉ VAZANTE (D) DURANTE A ESTAÇÃO DE CHUVA (1ª CAMPANHA), AO LARGO DO CPSL.	109
FIGURA 46. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO PERCENTUAL DE ÁGUA DOCE (%) EM MARÉ ENCHENTE (A) E MARÉ VAZANTE (C) E TEMPO DE RESIDÊNCIA (<i>TR</i>) EM MARÉ ENCHENTE (B) E MARÉ VAZANTE (D) DURANTE A ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA (2ª CAMPANHA), AO LARGO DO CPSL.....	110
FIGURA 47. EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS FLUXOS INTEGRAIS DE MPS (Ton.h ⁻¹) PARA CADA RADIAL AO LARGO DO CPSL, DURANTE A ESTAÇÃO CHUVOSA – SOB MARÉ DE SIZÍGIA, EM MARÉ ENCHENTE (PRETO) E VAZANTE (AMARELO).	111
FIGURA 48. EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS FLUXOS INTEGRAIS DE MPS (Ton.h ⁻¹) PARA CADA RADIAL AO LARGO DO CPSL, DURANTE A ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA – SOB MARÉ DE QUADRATURA, EM MARÉ ENCHENTE (PRETO) E VAZANTE (AMARELO).....	112

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. PERÍODOS DAS CAMPANHAS ESPACIAIS E TEMPORAIS NO CPSL, PARA CONDIÇÕES DE MARÉ DE SIZÍGIA E QUADRATURA, DURANTE O ANO DE 2017, EM DIFERENTES MARÉS E REGIMES SAZONAIS.	37
TABELA 2. VARIAÇÃO DA SALINIDADE, TEMPERATURA, OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD) E MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS) DURANTE A ESTAÇÃO DE CHUVA. SENDO: MÍN. CORRESPONDE AOS VALORES MÍNIMOS; MÁX. AOS VALORES MÁXIMOS; MÉDIA AOS VALORES MÉDIOS E DESV. P AO DESVIO PADRÃO.	58
TABELA 3. VARIAÇÃO DA SALINIDADE, TEMPERATURA, OXIGÊNIO DISSOLVIDO (OD) E MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS) DURANTE A ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA. MÍN. CORRESPONDE AOS VALORES MÍNIMOS; MÁX. VALORES MÁXIMOS; MÉDIA AOS VALORES MÉDIOS E DESV. P AO DESVIO PADRÃO.	68
TABELA 4. VALORES DE TEMPERATURA (°C) E SALINIDADE (g kg ⁻¹) CARACTERÍSTICOS DAS RESPECTIVAS MASSAS DE ÁGUA OBSERVADAS NA ÁREA DE ESTUDO.	80
TABELA 5. VALORES DAS SUAS RESPECTIVAS VELOCIDADES (INTENSIDADE, LONGITUDINAL E TRANSVERSAL) PARA AS CINCO RADIAIS DA PRIMEIRA CAMPANHA, REALIZADA DURANTE A ESTAÇÃO CHUVOSA. MÍN. - VALORES MÍNIMOS; MÁX. - VALORES MÁXIMOS E MÉD. -VALORES MÉDIOS DAS VELOCIDADES.	82
TABELA 6. VALORES DAS SUAS RESPECTIVAS VELOCIDADES (INTENSIDADES, LONGITUDINAL E TRANSVERSAL) PARA AS CINCO RADIAIS DA SEGUNDA CAMPANHA, REALIZADA DURANTE A ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA. MÍN. CORRESPONDE AOS VALORES MÍNIMOS; MÁX. CORRESPONDE AOS VALORES MÁXIMOS; MÉD. CORRESPONDE AOS VALORES MÉDIOS DAS VELOCIDADES.	87
TABELA 7. TABELA MOSTRANDO OS VALORES DE VAZÃO (TRANSPORTE DE VOLUME) E VOLUME TOTAL DE ÁGUA COM SUAS RESPECTIVAS ORDENS DE GRANDEZA DURANTE A ESTAÇÃO DE CHUVA.	104
TABELA 8. TABELA MOSTRANDO OS VALORES DE VAZÃO (TRANSPORTE DE VOLUME) E VOLUME TOTAL DE ÁGUA COM SUAS RESPECTIVAS ORDENS DE GRANDEZA DURANTE A ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA.	105
TABELA 9. QUANTIFICAÇÃO DE MPS EM VÁRIOS SISTEMAS A NÍVEL GLOBAL.	117

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. HIPÓTESE CIENTÍFICA DO TRABALHO	26
3. OBJETIVOS	26
3.1 OBJETIVO GERAL	26
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
4. ÁREA DE ESTUDO	27
4.1 COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS (CESM)	27
4.2 COMPLEXO PORTUÁRIO DE SÃO LUÍS (CPSL)	31
4.3 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS	33
4.4 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS	35
5. MATERIAIS E MÉTODOS	36
5.1 ETAPA PRÉ-CAMPO	36
5.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS	36
5.3 MARÉ	39
5.4 CLIMA	40
5.5 CTD	40
5.6 ADCP	41
5.7 VARIÁVEIS DE ESTADO, OD E CAMPO DE MASSA	42
5.8 AMOSTRAGEM ESPACIAL	43
5.8.1 REMOÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS	43
5.8.2 EQUI-ESPAÇAMENTO VERTICAL	43
5.8.3 FILTRAGEM POR JANELA MÓVEL	43
5.8.4 GRADEAMENTO HORIZONTAL DAS PROPRIEDADES	44
5.9 ÍNDICES TERMOHALINOS	44
5.10 AMOSTRAGEM TEMPORAL	45
5.10.1 REMOÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS	45
5.10.2 EQUI-ESPAÇAMENTO VERTICAL	46
5.11 CORRENTES	46
5.11.1 DECOMPOSIÇÃO DA VELOCIDADE	46
5.11.2 REMOÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS	47
5.12 CÁLCULO DOS VALORES MÉDIOS NO ESPAÇO E NO TEMPO	48

5.13 INTERAÇÕES CONTINENTE-OCEANO.....	49
5.13.1 TRANSPORTE DE VOLUME (<i>TV</i>)	49
5.13.2 CÁLCULOS DOS VOLUMES E TEMPO DE RESIDÊNCIA.....	49
5.13.2.1 VOLUME DE ÁGUA TOTAL (<i>VT</i>)	49
5.13.2.2 VOLUME DE ÁGUA DOCE (<i>Vfw</i>)	50
5.13.2.3 TEMPO DE RESIDÊNCIA (<i>TR</i>).....	50
5.13.2.4 BALANÇO DE CARGAS.....	50
5.13.3 TRANSPORTE ADVECTIVO DE SAL (<i>TS</i>)	51
5.13.4 ESTABILIDADE DA COLUNA DE ÁGUA	52
5.13.4.1 NÚMERO DE RICHARDSON POR CAMADA (<i>RiL</i>).....	52
5.13.5 DIAGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO DE HANSEN & RATTRAY	53
5.13.6 MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS)	54
5.13.7 FLUXOS DE MPS	55
6. RESULTADOS	56
6.1 PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E VENTOS LOCAIS.....	56
6.2 ESTRUTURA TERMOHALINA, OD E MPS.....	58
6.2.1 ESTAÇÃO DE CHUVA.....	58
6.2.1.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL	58
6.2.1.2 DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL	65
6.2.2 ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA.....	67
6.2.2.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL	67
6.2.2.2 DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL	75
6.3 MASSAS DE ÁGUA.....	79
6.3.1 VARIAÇÃO ESPACIAL	79
6.3.2 VARIAÇÃO TEMPORAL	80
6.4 CORRENTES	82
6.4.1 VARIAÇÃO ESPACIAL	82
6.4.1.1 ESTAÇÃO DE CHUVA.....	82
6.4.1.2 ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA.....	87
6.4.2 VARIAÇÃO TEMPORAL	91
6.4.2.1 ESTAÇÃO DE CHUVA	91
6.4.2.2 ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA	94

6.5 ESTABILIDADE E CLASSIFICAÇÃO ESTUARINA.....	97
6.6 TRANSPORTE ADVECTIVO DE SAL.....	101
6.7 INTERAÇÕES CONTINENTE-OCEANO.....	103
6.7.1 TRANSPORTE DE VOLUME (TV) E VOLUME TOTAL (VT)	103
6.7.2 BALANÇO DE CARGAS.....	105
6.7.3 PERCENTUAL DE ÁGUA-DOCE E TEMPO DE RESIDÊNCIA (Pad%).....	106
6.8 FLUXOS DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO	111
6.8.1 ESTAÇÃO DE CHUVA.....	111
6.8.2 ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA.....	112
7. DISCUSSÕES.....	113
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	125
9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS NO CESM	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui um litoral que se estende por aproximadamente 8,5 mil km e a Plataforma Continental Brasileira é considerada uma margem continental passiva, com 820.000 km² variando consideravelmente na sua forma e largura. Esta alcança sua máxima extensão na foz do Rio Amazonas com 330 km, depois diminui no sentido leste e ao largo da Bahia com 10 km (ZEMBRUSKI, 1979; MARTINS & COUTINHO 1981; LANA et al., 1996; DOMINGUEZ, 2002).

A Plataforma Continental do Maranhão (PCM) com uma superfície de 55,70 km², é apenas ligeiramente inclinada e bastante extensa, apresenta uma largura média de 150 km, cujas profundidades são inferiores a 45 m, enquanto que na quebra da Plataforma Continental a profundidade chega a 75 m, atingindo rapidamente 2.000 m na base do Talude Continental (SILVA & ALVARENGA, 1994; STRIDE, 1992). A PCM está compartimentada entre a foz dos rios Gurupi (Pará) e Parnaíba (Piauí), limitada "offshore" pela isóbata de 100m. Esta área pode ser classificada como uma região altamente energética devido à combinação da influência das correntes de contorno oeste, ventos alísios, variações de maré e descarga de águas continentais provenientes de vários rios (GUALBERTO & EL-ROBRINI 2005; PONTES & EL-ROBRINI, 2008).

A variabilidade sazonal das massas d'água da PCM estão associadas principalmente à descarga hídrica dos rios genuinamente maranhenses. Entre o limite da costa até a fronteira do mar territorial na PCM, pode-se observar desde águas com características estuarinas próximas a costa, até águas de características tropicais no limite do mar territorial. Pontes & El-Robrini (2008), relataram que durante o período seco, encontraram na PCM índices termohalinos típicos de água oceânica, classificada como Água Tropical (AT) (que apresenta temperaturas entre 26,60 e 28,70 °C e salinidades entre 36,20 e 37,27 g kg⁻¹) e no período chuvoso, a Água Costeira (AC) (26,00 a 28,87 °C de temperatura e valores \leq 34,00 g kg⁻¹ de salinidade). Neste mesmo estudo, o autor relata uma característica observada tanto na borda da plataforma quanto dentro do CESM, uma constância das massas de água em sua feição vertical, ou seja, um ambiente bem misturado. Santos (2018) e Cavalcanti (2018), usando índices termohalinos descritos por Dias et al., (2013) ao largo da área portuária de São Luís, observaram a presença de duas massas de água: Água Estuarina (AE) e Água Costeira (AC), durante o período de chuva e seca, respectivamente, mostrando um comportamento de caráter sazonal.

A Zona Costeira do Maranhão (ZCM) pode ser subdividida em litoral ocidental (Reentrâncias Maranhenses); litoral oriental (Lençóis Maranhenses) e entre essas duas macrorregiões localiza-se o Golfão Maranhense, o qual é formado pelo Complexo Estuarino Arraial São José (CEASJ) (deságue do Rio Itapecuru, Munim, Tibiri e Paciência) e Complexo

Estuarino de São Marcos (CESM) (sistemas Mearim, Pindaré, Grajaú, Turiaçu, Gurupi, Maracaçumé) que são separados pela Ilha de São Luís (Figura 1). No Golfão Maranhense são observadas características comuns aos dos litorais ocidentais e orientais do estado do Maranhão (presença de manguezais e macromaré semidiurna). Quase toda essa rede de drenagem maranhense se faz no sentido: Sul–Norte, através dos referidos rios independentes que se dirigem para a PCM. Os dois complexos são considerados os mais importantes da ZCM, tanto pelos aspectos fisiográficos, por serem desaguadouros de rios e apresentarem intensa dinâmica da paisagem, quanto pela densidade das atividades humanas e comerciais (FEITOSA, 2006).

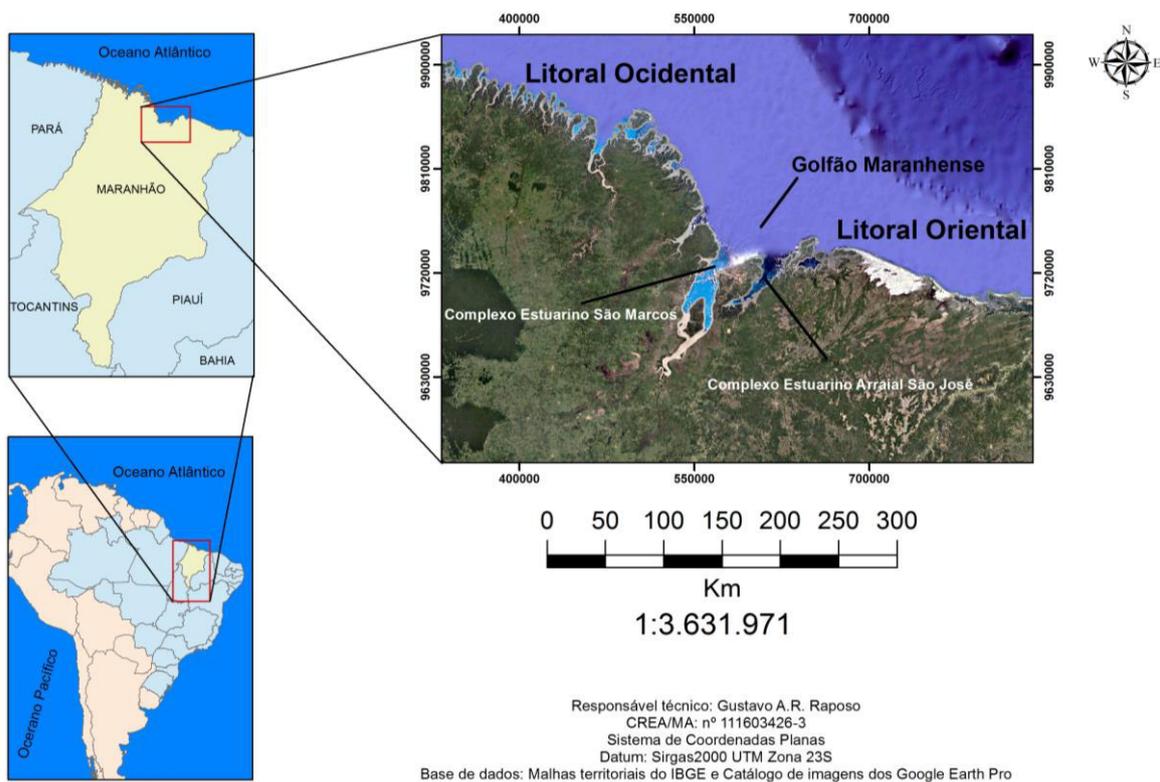


Figura 1. Mapa mostrando a localização da Zona Costeira do Maranhão e suas subdivisões (Litoral Ocidental, Litoral Oriental e Golfão Maranhense).

Como a região do Golfão Maranhense possui dupla penetração da onda de maré, pelo CESM e CEASJ, os processos hidrodinâmicos e de mistura (advecção e difusão) estão relacionados com as correntes de marés provenientes desses complexos. As correntes da região imprimem movimentos de intensa turbulência na coluna d'água, ocasionando em decorrência dos processos de mistura vertical, grandes concentrações de material em suspensão, enquanto há uma quase homogeneidade das estruturas térmicas e halinas, caracterizadas por pequenos gradientes verticais de salinidade e temperatura (PEREIRA FILHO, 1983; FERREIRA & OLIVEIRA, 1985; FERREIRA, 1986).

O Rio Mearim, genuinamente maranhense, corta o estado do Maranhão de sul para o norte e sua bacia compreende uma extensa área na região central, esse rio ocupa posição de destaque, tornando-se a maior Bacia Hidrográfica do Maranhão, com 98.289,05 km², ocupando 29,6% da área total do estado, com 37 postos pluviométricos em operação (UEMA, 2016). Esta bacia compreende 84 municípios, sendo que 50 estão totalmente inseridos no vale e os demais se situam parcialmente na bacia. A população total da Bacia Hidrográfica do Rio Mearim (BHRM) em 2017, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), corresponde a 2.257.268 habitantes, o que representa 32,24% da população maranhense. A BHRM apresenta vazão média de 567,18 m³.s⁻¹, superior às demais bacias da região e escoamento total, superficial e subterrâneo nos valores de 17.570 km³ /ano, 14.140 km³ /ano e 3.430 km³ /ano, respectivamente (SEMATUR, 1991).

Os principais tributários do rio Mearim pela margem direita são o rio Corda e o rio Flores, pela margem esquerda destacam-se os rios Pindaré, o mais extenso afluente da bacia e o rio Grajaú (CODEVASF, 2017). O Mearim possui um regime hidrológico simples, com duas estações bem definidas: a das águas máximas (cheias) que vai de fevereiro a maio e a das mínimas (estiagens) que se prolonga de agosto a novembro (CODEVASF, 2019). A magnitude do aporte de água doce para a PCM varia em função do regime de precipitação, o qual é governado pela posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (COLES et al., 2013). A BHRM apresenta extensão navegável de 1.100 km e conta com sistema de sinalização por meio de placas de margens para orientação do canal navegável nos pontos críticos, estando, atualmente, voltada à movimentação de mercadorias de subsistência. Sua navegabilidade é beneficiada pela amplitude da maré, sendo feita por embarcações regionais, que mantêm irregular comércio de produtos regionais para o mercado de São Luís (MA) e de cidades ribeirinhas (CORREIA et al., 2006).

Em relação as atividades desenvolvidas ao longo da BHRM, de acordo com o PLANO NASCENTE MEARIM, observou-se que em grande parte da bacia a ocupação é irregular; há o avanço do desmatamento em importantes áreas de recarga de aquíferos, inclusive pelas áreas de nascentes, matas ciliares, uso e manejo inadequado dos solos, principalmente em função das práticas agropecuárias inadequadas, que acarretam processos erosivos, salinização e em alguns casos, formação de áreas desertificadas (CODEVASF, 2019).

Estuário é um ambiente costeiro, caracterizado por se localizar na transição da interface continente-oceano, onde recebe materiais provenientes da drenagem continental carreados por rios, atuando como filtro para o transporte de materiais (matéria orgânica particulada, sais, sedimentos, nutrientes, poluentes) no fluxo com sentido ao mar, desempenhando assim um papel fundamental no transporte e distribuição de propriedades nas regiões costeiras. Geologicamente, estuários são ambientes sensíveis, atuando como depósitos efetivos dos sedimentos fluviais e

marinhos, dependendo diretamente das condições hidrodinâmicas reinantes (SCHUBEL & CARTER, 1984; DYER, 1995).

Esses ambientes prestam uma série de serviços ecossistêmicos considerados chave para a gestão costeira, como berçário para a vida; proteção costeira; purificação da água, sequestro de carbono etc. Os estuários são as principais vias de transferência de água, sedimento, nutrientes e poluentes dos continentes para os oceanos, dessa forma, suas características hidrodinâmicas (circulação e processos de mistura), morfológicas, biológicas e sedimentares são influenciadas fortemente, tanto pela descarga de água doce, proveniente da drenagem da bacia hidrográfica, como por forçantes oceanográficas como ondas, marés e forçantes meteorológicas como os ventos, que atuam localmente ou remotamente sobre a superfície e da circulação da plataforma continental adjacente (PRITCHARD, 1967; CLARK, 1996; MIRANDA et al., 2002). As águas do CESM possuem uma alta concentração material em suspensão, que atinge uma média de 250 mg L⁻¹ (MALHEIROS DA SILVA, 2011), o que resulta numa elevada turbidez causada pelo aporte fluvial dos principais rios que são Mearim, Grajaú e Pindaré, além disso, a região do CESM é ocupada por extensas áreas de manguezais (COSTA et al., 1997; PONTES et al., 2008).

O Material Particulado em Suspensão (MPS) encontrado nos estuários possui importantes funções como: controle da reatividade, transporte e impacto biológico de substâncias no ambiente aquático, agindo como ligante fundamental para os constituintes químicos presentes na coluna d'água, no sedimento de fundo e na cadeia alimentar. Quando presentes em excesso na coluna d'água, podem causar a morte de animais, pois prejudicam a respiração, obstruem as estruturas de alimentação e reduzem a fotossíntese por diminuir a penetração da luz. Sufocam também os organismos bentônicos e modificam a natureza de fundo ao se depositarem nos sedimentos (CLARK, 2001).

O transporte dos sedimentos através do estuário até que alcancem a região costeira é controlado pelo aporte fluvial de sedimentos oriundos da bacia de drenagem, devido ao *runoff* superficial e pelo padrão de circulação estuarino (COUCEIRO & SCHETTINI, 2010). Essa circulação é gerada por variações do nível do mar, pela descarga de água doce, por forças de gradiente de pressão barotrópicas e baroclínicas, pela hidrodinâmica costeira ao largo destes ambientes (plataforma continental) e devido a transferência de *momentum* ao fluído (ação do vento na superfície livre) (MIRANDA et al., 2002). O conhecimento do comportamento do MPS na interface continente-oceano é de fundamental importância para estimativas acerca das descargas de sedimentos dos rios para os estuários e conseqüentemente para a plataforma continental adjacente, já que os rios contribuem com cerca de 70% do aporte total mundial de sedimentos para o oceano (MILLIMAN, 1991). As estimativas dos fluxos globais de sedimentos, através dos rios,

estão na ordem de 18×10^9 ton.ano⁻¹ e englobam extrapolações das descargas específicas de água e sedimento (SOUZA & KNOPPERS, 2003).

Embora a circulação represente um papel primordial na dinâmica sedimentar, as características dinâmicas dos sedimentos podem desempenhar um papel igualmente importante. Grande parte do material sedimentar estuarino é proveniente da erosão da bacia de drenagem, cujos principais constituintes são silte e argila (MEHTA & PARTHENIADES, 1975; KRONE, 1978). O processo de floculação dos sedimentos finos aumenta potencialmente a sua velocidade de decantação e por consequência a sua retenção no estuário (SCHUBEL & CARTER, 1984). Uma vez formados, os flocos permanecem em suspensão se as flutuações das forças da velocidade vertical (difusão turbulenta) forem maiores que a velocidade de decantação (DÖBEREINER, 1982). Conhecer e compreender a dinâmica de sedimentos das bacias hidrográficas e consequentemente nos estuários, tem grande importância nas análises, por exemplo, de alterações de uso da terra, da pressão humana sobre o desenvolvimento econômico e dos impactos das mudanças climáticas.

Uma das principais feições hidrodinâmicas dentro de um estuário é a Zona de Turbidez Máxima (ZTM), que se caracteriza pela alta concentração de sedimentos em suspensão, cerca de 100 vezes maior quando comparadas às zonas localizadas a montante e a jusante do estuário (DAVIS, 1985; GRABEMANN et. al., 1989; DYER, 1995). Essa área apresenta capacidade de reter grande volume de sedimentos no corpo estuarino e passar por várias etapas antes da deposição final. Durante o ciclo de maré semidiurna a ZMT migra longitudinalmente, isso acontece porque existem condições ótimas para a floculação à medida que a descarga fluvial encontra a cunha de intrusão salina, o que aumenta o fluxo de deposição, podendo também ocorrer a ressuspensão dos sedimentos quando a corrente salina se arrasta junto ao fundo, inserindo-os novamente na coluna de água, possivelmente desagregados, repetindo o processo (FERNANDES, 2001). A ZTM pode ser encontrada em estuários de variados tamanhos, formas, profundidades e alturas de marés (macro, meso e micromaré). Os principais mecanismos que influenciam na sua formação são: circulação residual no fundo e a assimetria da velocidade de corrente de maré, resultado da circulação gravitacional e bombeamento da maré, respectivamente, floculação do material particulado em suspensão e padrões de mistura estuarina, do tipo cunha salina, parcialmente estratificado e bem misturado (GEYER, et al., 2002; BURCHARD & BAUMERT, 1998; DYER, 1995).

A maior parte das cidades desenvolvidas do mundo está em torno de estuários, isso se deve a facilidade na de instalação de portos, que conduzam o acesso para o interior do continente. Aproximadamente 15% das regiões costeiras do planeta estão localizadas em ambientes estuarinos. Devido a importância da atividade portuária para o desenvolvimento e crescimento

econômico de um país, é necessário ter em mente que tipos de processos ocorrem no período de instalação e manutenção de um porto, a título de exemplos cita-se o processo de dragagem (BARRETO, 2011). De acordo com a IADC - *International Association of Dredging Companies*, um dos principais problemas da atividade de dragagem é o tratamento dos sedimentos da dragagem, que na maioria das vezes, são dispersados no próprio sistema estuário, com intuito de minimizar os custos operacionais. Isso significa que o material permanece no sistema, o que afeta a taxa de transporte de sedimentos, que por sua vez afeta os processos morfológicos que ocorrem no estuário. Ao escolher um local de despejo, deve-se levar em consideração os padrões hidrológicos e a proteção e manutenção do ecossistema. O entendimento da dinâmica e morfodinâmica de ambientes estuarinos e o conhecimento de suas relações com os parâmetros de qualidade da água são, portanto, um pré-requisito científico essencial para a gestão otimizada das áreas a serem dragadas (CASTIGLIA, 2006)

Inserido na região do CESM, junto à costa ocidental de São Luís, encontra-se o Complexo Portuário de São Luís (CPSL), seu respectivo canal de acesso constitui-se como mais longo, largo e profundo canal de acesso balizado das áreas portuárias brasileiras, desenvolvendo-se em sua maior extensão na PCM, sendo o restante situado no próprio Complexo Estuarino de São Marcos (AMARAL & ALFREDINI, 2010).

Na região do CPSL, Santos (2018) observou fortes correntes de vazante, de até $3,76 \text{ m s}^{-1}$ com direção predominante N-NE. Este trabalho foi realizado durante uma atividade de dragagem ao largo do CPSL, sendo observadas concentrações de MPS entre 40 e 852 mg L^{-1} , que foram controladas pela ação da maré (ressuspensão de sedimentos de fundo e/ou erosão das margens) e pela denudação dos solos da bacia de drenagem. Apesar das elevadas concentrações de MPS e da atividade de aprofundamento/manutenção do canal de acesso à região portuária, as concentrações do oxigênio dissolvido (OD) estiveram acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA (357/2005) para a preservação da vida aquática ($\text{OD} > 152,4 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1} = 5,0 \text{ mg L}^{-1}$), caracterizando a região como um ambiente natural apesar da intensa atividade portuária.

Na região portuária do CESM são realizadas dragagens para aprofundar alguns canais internos, além de realizar serviços de manutenção. Esta atividade realizada no CPSL, assim como nos demais portos, potencializa as operações, tornando os portos mais competitivos e viabilizando o recebimento de navios de grande porte com maior segurança, o que possibilita projetos relevantes para o estado do Maranhão. Muito embora as atividades de dragagem sejam de fundamental importância para a vida útil de um porto, em especial portos localizados em regiões com elevada descarga fluvial, como é o caso dos portos encontrados no CESM, é necessário que sejam fiscalizadas e regulamentadas, a fim de minimizar os impactos negativos resultantes (SILVA, 2016).

Logo, é crescente a necessidade de se estabelecer, como os estuários localizados na interface Amazônia-Semiárido respondem às mudanças no uso e ocupação dos solos na bacia de drenagem e ao desenvolvimento das diversas atividades, tais como; agricultura e fruticultura irrigadas e a carcinicultura. O avanço de águas marinhas face a períodos mais curtos da estação chuvosa, modifica de forma considerável o campo de massa, ocasionando uma maior penetração da maré rio acima. O avanço atípico da intrusão salina perturba a biota dulcícola e a cobertura vegetal, promove o assoreamento de canais de navegação, impede o desenvolvimento de atividades agrícolas e o abastecimento público (WRI, 2003; Medeiros, 2016; Sebastian, et al., 2016; Xu, et al., 2019). Por isso, é uma ameaça para todas as pessoas que vivem nos estuários e suas proximidades (Gisen et al., 2015b). Além disso, esse processo atua como uma barreira geoquímica que impede o transporte de efluentes e causa seu acúmulo nos sedimentos (Civita, 2012).

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. Portanto, 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 macromaré.

2. HIPÓTESE CIENTÍFICA DO TRABALHO

O déficit hídrico, provocado por mudanças climáticas globais e regionais e o conseqüente avanço da intrusão salina devido a diminuição dos fluxos fluviais no gradiente continente-oceano, associados aos impactos decorrentes da atividade portuária, tem aumentado o fluxo de material particulado em suspensão no Complexo Portuário de São Luís (CPSL), localizado em um estuário de macro maré situado na interface Amazônia-Semiárido.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Compreender como a circulação hidrodinâmica e as massas d'água podem influenciar o transporte de Material Particulado em Suspensão (MPS) no CPSL, sob diferentes condições de maré e em regimes sazonais distintos (chuva e fim da chuva) para o ano de 2017.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar a variação espaço-temporal das propriedades hidrográficas (temperatura °C e salinidade g kg^{-1}), Oxigênio Dissolvido (OD) ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) e MPS (mg L^{-1}) na estação de chuva e fim da chuva, em maré enchente e maré vazante;
- ✓ Caracterizar a variação espaço-temporal do campo de corrente em maré enchente, vazante e em diferentes regimes sazonais;
- ✓ Definir os índices termohalinos utilizando o diagrama T-S espalhado em diferentes regimes sazonais;
- ✓ Quantificar o número de Richardson por camada e classificar o sistema estuarino de acordo com o diagrama de estratificação-circulação de Hansen e Rattray (1966);
- ✓ Quantificar o transporte de volume (vazões) em maré enchente e vazante e em diferentes regimes sazonais;
- ✓ Calcular o transporte advectivo de sal em diferentes regimes sazonais;
- ✓ Calcular os fluxos de MPS em maré enchente e vazante e em diferentes regimes sazonais;
- ✓ Quantificar as interações continente-oceano (volume de água total, percentual de água doce, tempo de residência) em maré enchente e vazante e em diferentes regimes sazonais.

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1 COMPLEXO ESTUARINO DE SÃO MARCOS (CESM)

A área de estudo está situada no Complexo Estuarino de São Marcos (CESM), denominado comumente por Baía de São Marcos (BSM), o qual faz parte de uma vasta zona estuarina (com mais de 5.000 km^2 de manguezais), possui uma alta dinâmica e está situada no litoral setentrional brasileiro, mais especificamente na parte central da costa do Estado do Maranhão, limitado a oeste pelo continente, a leste pela Ilha do Maranhão (São Luís) e ao sul pela foz do Rio Mearim (SOUZA FILHO, 2005).

Este sistema estuarino é o maior da costa nordeste do Brasil, com aproximadamente 23.600 km^2 de extensão e apresenta uma largura de 55 km no seu limite norte em direção a Plataforma Continental Adjacente (PCA), que é reduzida para 13 km na sua meia extensão, aumentando para 25 km no seu limite sul ao iniciar-se a Ilha dos Caranguejos (Figura 3). O CESM possui aproximadamente 64 km de comprimento e é a continuação do estuário do Rio Mearim que se bifurca na Ilha dos Caranguejos, além de ser a principal via de acesso ao CPSL (MORAIS, 1977; RIOS, 2001). A profundidade média da região é de 10 metros, podendo variar até profundidades maiores que 50 metros (SOARES, 2015).

Os principais afluentes que compõe a BHRM, é o próprio rio Mearim, Pindaré, Grajaú, das Flores e Corda (SECID, 2014) como mostra a figura 2.

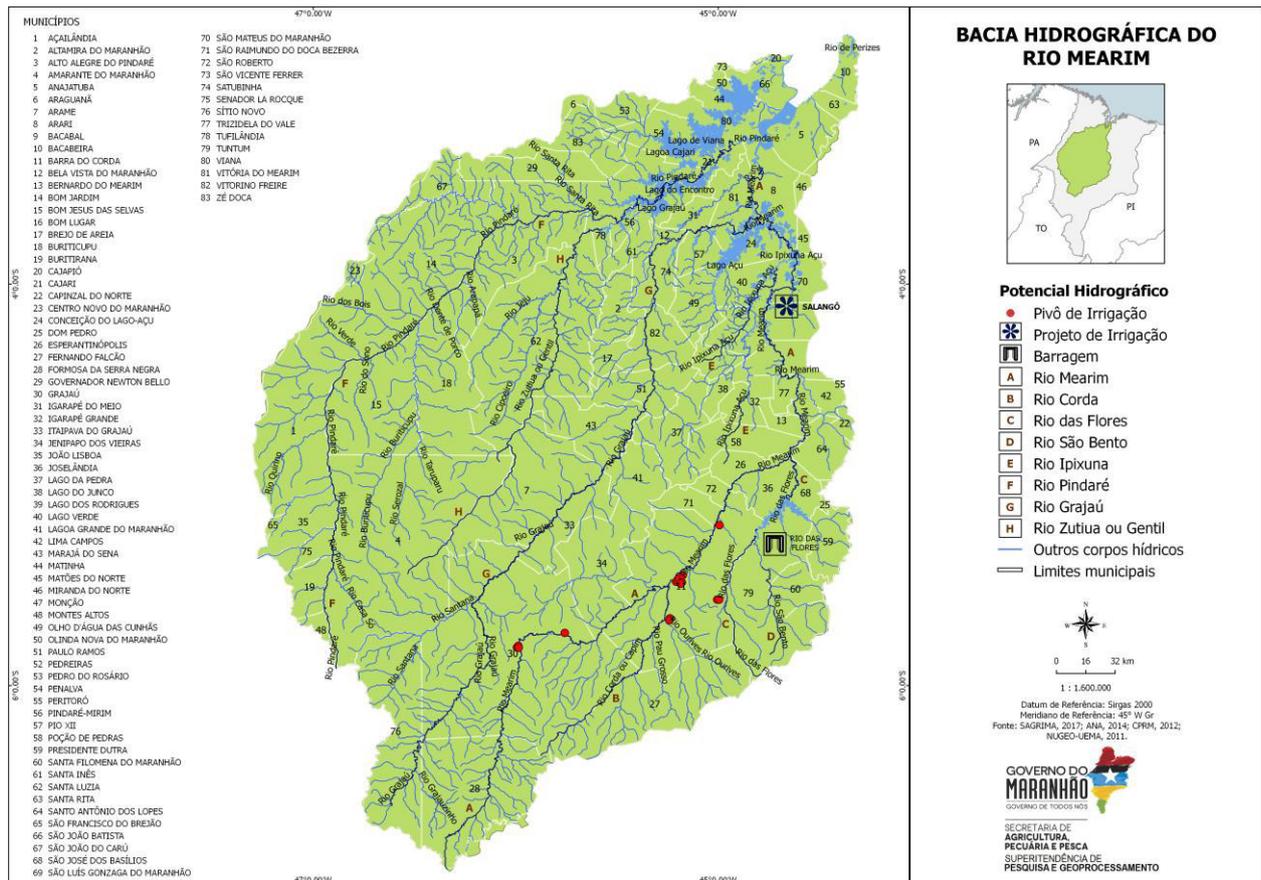


Figura 2. Mapa mostrando a Bacia Hidrográfica do Rio Mearim e seus principais afluentes.

Segundo Jennearjhan et al., (2010), os valores estimados para a vazão na região do CESM, são na ordem de $10 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ provenientes das descargas dos Rios Pindaré, Grajaú e Mearim, com as descargas máximas ocorrendo durante os meses de março-abril-maio, no pico da estação chuvosa da região, que ocorre de janeiro a julho. O CESM ainda recebe o aporte dos Rios Aurá e Salgado na margem oeste e dos Rios Cachorros, Bacanga e Anil situados na margem leste (Figura 3).

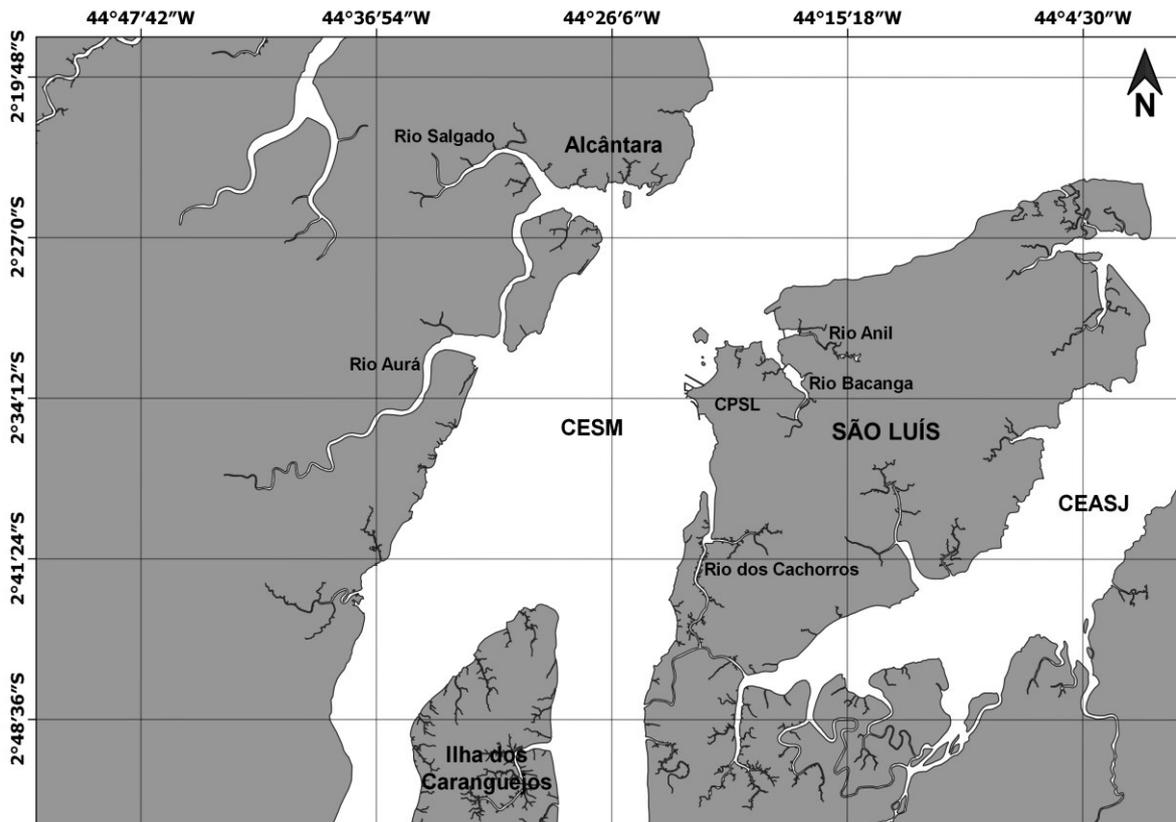


Figura 3. Mapa mostrando a localização da área de estudo na parte inferior do Complexo Estuarino de São Marcos – CESM.

De acordo com os dados de vazão provenientes das estações fluviométricas dos principais rios da BHRM (Mearim, Grajaú e Pindaré) (Figura 3), monitoradas *in locu* sob responsabilidade da ANA (Agência Nacional de Águas), observa-se que há uma diminuição em suas descargas e essa redução é mais evidente ao longo dos últimos 17 anos de dados. Os fatores que possam estar levando a este cenário, provavelmente estão associados às mudanças climáticas e ao aumento das diversas atividades de uso e ocupação dos solos na referida bacia de drenagem. Além desses fatores, essas descargas são controladas/moderadas de acordo com sazonalidade climática da região, que exerce uma influência acentuada nos rios que deságuam no CESM (Carvalho et al., 2017), afetando o sistema como um todo, com uma redução de 66%, 85% e 91% na vazão dos Rios Mearim, Pindaré e Grajaú, respectivamente, em relação a estação seca quando comparada à estação de chuva da região (Figura 4).

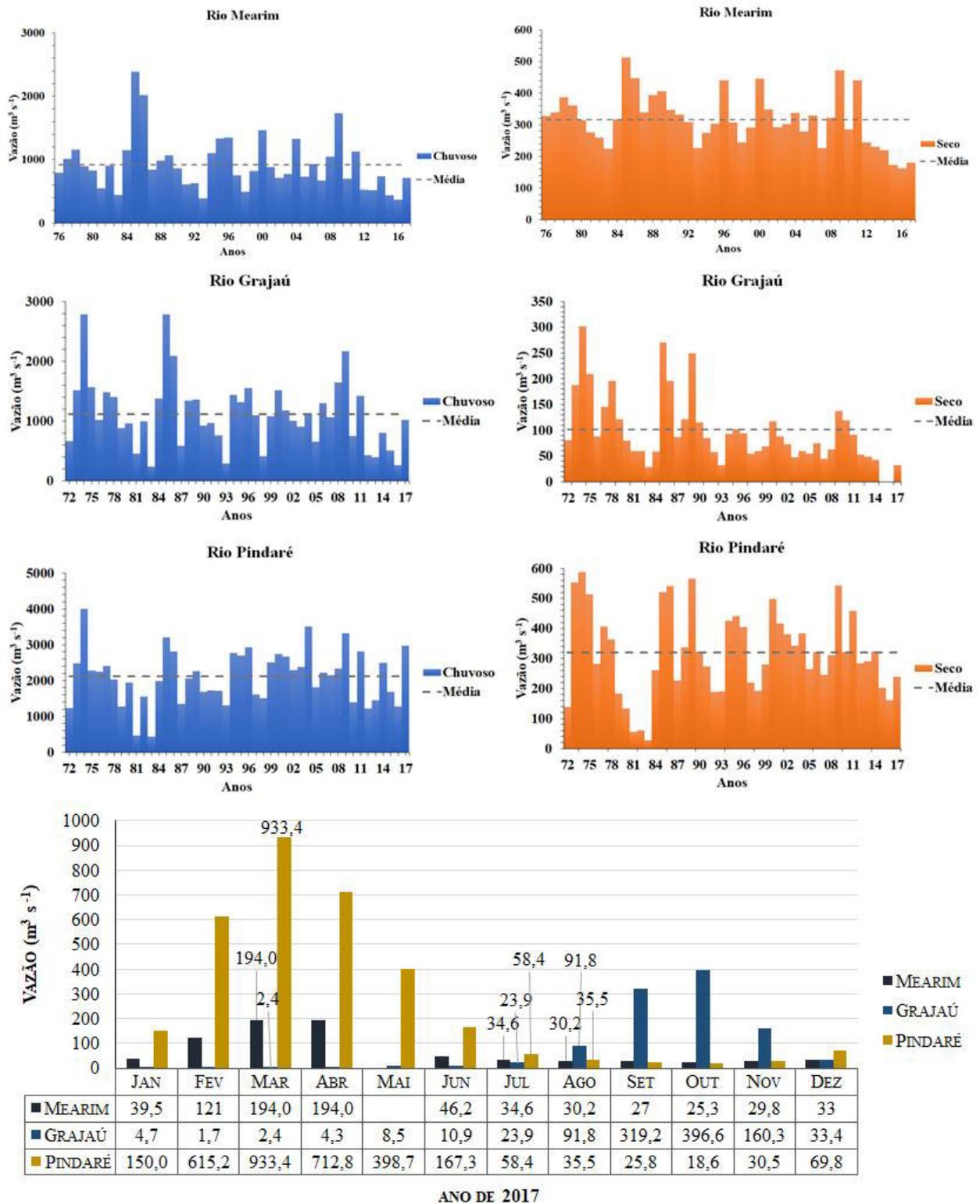


Figura 4. Gráfico mostrando a soma das descargas de acordo com a sazonalidade da região, dos três principais rios da Bacia Hidrográfica do Mearim, durante a estação chuvosa (em azul) de janeiro até junho e durante a estação seca (em laranja) de junho até dezembro nos anos de 1972 a 2017 e as vazões dos rios durante o ano de coleta (2017). As estações fluviométricas estão distantes do CESM: 172 km no rio Mearim (#33290000 na lat. 4°13'9.84"S; long. 44°45'55.08"W), 146 km no rio Grajaú (#33380000 na lat. 3°46'19.92"S; long. 45°13'5.16"W) e 154 km no rio Pindaré (#33190000 na lat. 3°39'36.00"S; long. 45°28'0.84"W). A linha tracejada representa o valor médio. Fonte: Portal Hidroweb (<http://hidroweb.ana.gov.br/>) (ANA, 2020).

O CESM apresenta um canal de acesso hidroviário do CPSL bem definido, que devido a suas elevadas profundidades naturais de acesso, com média de 24 metros e à largura do canal, que

em quase toda extensão, é de mil metros, as condições de navegabilidade apresentam-se excelentes para que a atividade portuária seja a principal via econômica da região (AMARAL & ALFREDINI, 2010).

Em termos de potencial logístico do transporte aquaviário brasileiro, a região do CPSL constitui-se em um dos principais polos portuários em termos de movimentação de cargas e possui uma localização estratégica, em relação às principais rotas marítimas de navegação, próximo aos grandes mercados consumidores, como: América do Norte (redução de 7 dias), Canal de Suez, Europa (redução de 5 dias) e Ásia através do Canal do Panamá (redução de 6 dias). A Capital São Luís possui uma variedade de atividades econômicas, como uma grande indústria de alumínio (ALUMAR), uma produtora mundial de pelotas de ferro (VALE) e um sistema de terminais portuários (Itaqui, Ponta da Madeira, Ponta da Espera), que é capaz de receber os maiores navios cargueiros do mundo, da classe *Valemax*. A diversidade de atividade econômica na região é marcada por concentrações de serviços financeiro e industrial de São Luís, de atividades agrícolas e de mineração nos municípios adjacentes (AMARAL; ALFREDINI, 2010; PORTO DO ITAQUI, 2012).

4.2 COMPLEXO PORTUÁRIO DE SÃO LUÍS (CPSL)

Considerado um dos maiores do mundo em termos de movimentação de carga, o CPSL dinamizou mais de 77 milhões de toneladas durante o ano de 2004, correspondendo a mais de 12% da movimentação portuária anual do Brasil. Em relação a extensão, o CPSL ocupa o segundo lugar no *ranking* dos maiores complexos portuários da América (AMARAL; ALFREDINI, 2010; DINIZ et al., 2014) e está situado na costa nordeste do Brasil, mais precisamente na parte ocidental do CESM (Figura 5) que deságua na Margem Equatorial Brasileira (MEB).

O canal de acesso ao CPSL é considerado o mais longo, largo e profundo canal de acesso balizado das áreas portuárias brasileiras, com profundidades variando entre 9,5 e 28 m, dependendo da maré, proporcionando manobrabilidade a diversas embarcações de calado profundo (DINIZ et al., 2014). Devido às melhorias realizadas pelos terminais estatais e privados, o tráfego marítimo no complexo portuário cresceu consideravelmente nos últimos anos, atingindo uma média de 1.295 navios / ano (PORTO DO ITAQUI, 2018).

Esta área, pela sua potencialidade, abrange três importantes estruturas de portos: Complexo Portuário da Ponta da Madeira (CPPM) que pertence a Empresa VALE/SA, o Porto do Itaqui, administrado pela Empresa Maranhense de Administração Portuária-EMAP e o Terminal de Uso Privado (TUP) Alumar – Consorcio de Alumínio do Maranhão. Ainda existem os terminais de transporte aquaviário intermunicipais de passageiros, cargas e veículos: o Terminal da Ponta da Espera, Porto Grande e o Porto de Cujupe, que também são administrados pela EMAP (GARCIA,

2007). Estes portos recebem navios graneleiros que transportam minério de ferro, carvão, coque, piche, soda cáustica, alumina, bauxita, soja e outros (MILEN et al., 2006).

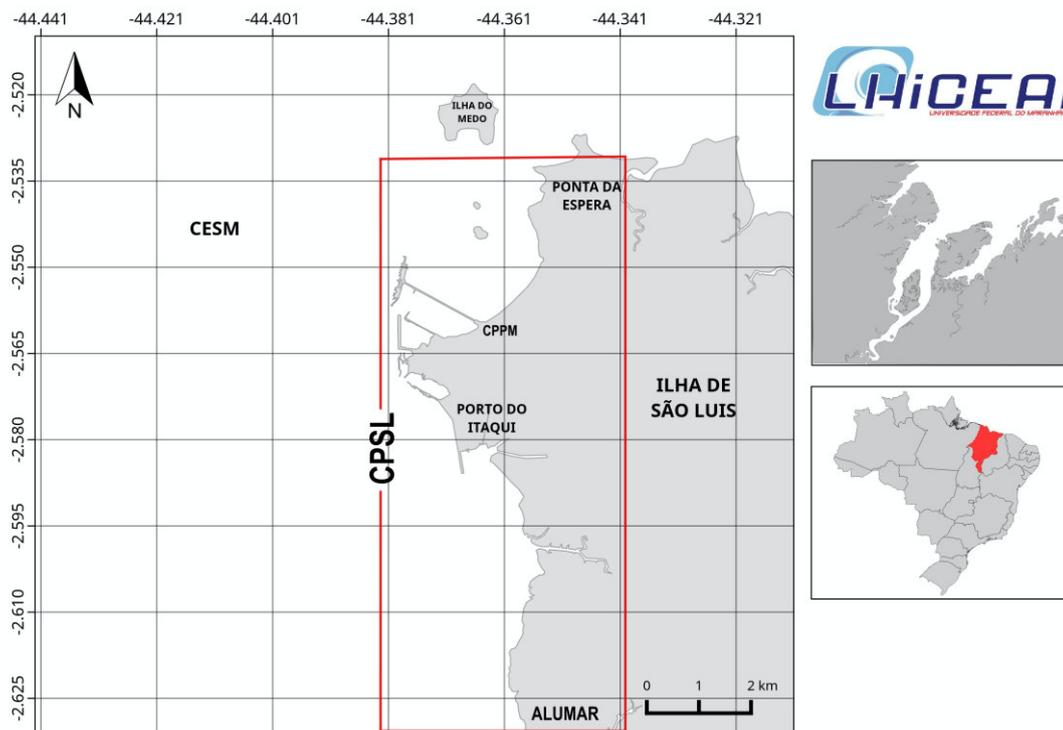


Figura 5. Mapa de localização do Complexo Portuário de São Luís (CPSL), situado na costa ocidental da Ilha do Maranhão, no Complexo Estuarino de São Marcos (CESM), esta área portuária abrange o Complexo Portuário de Ponta da Madeira (CPPM); o Porto de Itaqui; o Porto da ALUMAR, além do Terminal da Ponta da Espera.

O Porto do Itaqui representa o porto marítimo de carga geral de São Luís, está situado a 11 km distante da capital São Luís, exerce influência em uma vasta região, abrangendo os estados do Maranhão e Tocantins, além das regiões sudoeste do Pará, norte de Goiás e nordeste do Mato Grosso (ARAÚJO, 2009). Neste, aportam consecutivamente inúmeros navios de grande calado, transportando diversificados produtos industrializados, predominam as movimentações de derivados de petróleo e do complexo de grãos (soja, milho e farelo de soja), além de menores volumes de fertilizantes, celulose, carvão mineral, ferro gusa, concentrado de cobre, clínquer, entre outros. O Porto dispõe de 2.235 metros de área acostável, com profundidades variando de 12 a 19 metros, contém 28 tanques para depósito de combustível com uma capacidade total de 81.000 toneladas (ALCÂNTARA, 2005). De acordo com o Plano Mestre do Porto do Itaqui (2015), o ano de 2015 apresentou maior volume de exportação (21.824.776 Ton), seguidos dos anos de 2016 (18.029.144 Ton), 2017 (19.113.977 Ton) e na soma do biênio 2018/2019 foram mais de 47 milhões de toneladas de cargas movimentadas (EMAP, 2019).

O Complexo Portuário da Ponta da Madeira (CPPM), é um terminal de uso privado de propriedade da empresa VALE, localizado junto ao Porto do Itaqui. Em 2014, segundo dados da

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários, o CPPM se apresentou como o maior porto em volume embarcado do Brasil (ANNTAQ, 2014), dedicado à exportação de minério de ferro para a Ásia, Europa e outros lugares do mundo. O terminal movimenta minério de ferro, manganês, concentrado de cobre e ferro-gusa e grão de soja de terceiros. Durante os anos de 1985 a 2016 houve uma grande evolução da movimentação de minério de ferro pelo CPPM, saindo de 0,6 milhões de Ton em sua fase de início de operação, ultrapassando mais de 100 milhões de Ton em 2011 até 134 milhões de Ton em 2016.

O Terminal de Uso Privado (TUP) da Alumar que está localizado 10 km ao sul do Porto do Itaqui, recebe anualmente cerca de 300 navios graneleiros, com capacidade máxima de 76.000 toneladas de porte bruto, onde atracam em um cais de 252 metros de comprimento (FONTES, 2009). Neste porto acontece os desembarques das diversas matérias-primas e insumos usados na produção do Alumínio (bauxita, alumina, carvão mineral, soda cáustica, óleo combustível, coque de petróleo e piche). Durante o ano de 2017, o Porto da Alumar movimentou cerca de 15 milhões de toneladas entre importações e exportações (ANTAQ, 2020).

Além disso, o CPSL é conhecido por estar localizado em uma grande floresta de mangue da Ilha de São Luís, que constitui, junto com a costa nordeste do Pará, o maior sistema de mangue contínuo do mundo. Este sistema é conhecido como a Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia - CMMA), um bosque de acreção predominantemente composto pelas três principais espécies de mangue, um fator muito importante sob o ponto de vista ambiental (ALCÂNTARA 2005; DINIZ et al., 2014).

4.3 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

Um fator condicionante do clima no Maranhão é a sua posição geográfica situada numa zona de transição, a qual recebe influências do complexo amazônico, ao norte e noroeste, onde o clima tende a apresentar características equatoriais (quente e úmido) e recebe influência da região semiárida (seco) ao nordeste, dando assim, características peculiares ao estado onde o CESM está inserido e apresenta as mesmas características, com dois períodos estacionais bem distintos, marcados por precipitações pluviométricas, um período chuvoso, de águas abundantes, com valores que variam entre 1.000 mm a 2.000 mm distribuídos principalmente durante os meses de janeiro a junho, sendo que o quadrimestre fevereiro, março, abril e maio apresentam as frequências mais altas. Já nos meses de julho a dezembro, os níveis de precipitação diminuem e as menores médias pluviométricas mensais ocorrem durante o trimestre setembro, outubro e novembro, caracterizando o período de estiagem, (período de águas escassas) (NIMER & BRANDÃO, 1989; MMA, 2006; AZEVEDO-CUTRIM, 2007; ARAUJO, 2017; TEIXEIRA & SOUZA FILHO, 2009).

A média anual da temperatura oscila entre 26° e 32 °C, onde os maiores valores são observados entre os meses de setembro e outubro, com valores em torno de 35 °C. De maneira geral são as estações do ano que atuam sobre as variações das temperaturas médias do litoral maranhense, de modo que os valores de umidade relativa do ar, insolação e grau de nebulosidade influenciam diretamente na taxa de evapotranspiração do litoral, sendo menor no período chuvoso e maior no período seco (BRASIL, 1977; PONTES, 2007).

A grande extensão territorial do Maranhão, no sentido latitudinal contribui anualmente para a atuação de diferentes sistemas meteorológicos, contando ainda com a influência das condições dos Oceanos Atlântico e Pacífico Tropical. Os sistemas atuantes no estado são: A ZCIT que é uma região onde ocorre a confluência dos ventos alísios de nordeste, oriundos do sistema de alta pressão ou anticiclone subtropical do Hemisfério Norte (H.N) e dos ventos alísios de sudeste, oriundos da alta subtropical do Hemisfério Sul (H.S), maior indutora de chuva na região, uma vez que, dependendo da sua posição, pode haver maior ou menor precipitação no estado. Durante o primeiro semestre do ano, ocorre o período chuvoso, quando a ZCIT está posicionada ao sul da linha do Equador, com ventos alísios de nordeste, que trazem umidade dos oceanos para o continente, resultando em elevadas pluviosidades na região. Durante o segundo semestre, ocorre o período seco com a ZCIT se deslocando para o hemisfério norte, resultando em menores pluviosidades neste período; as “linhas” de Instabilidade Tropical (IT), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANS), os Distúrbios Ondulatórios de Leste que são responsáveis pelas chuvas nessa região durante o verão e outono austral (MOLION; BERNARDO, 2002; FONSECA et al., 2004; NASCIMENTO et al., 2014; LUZ et al., 2005).

Nas regiões tropicais e subtropicais o regime de pluviosidade é um dos principais fatores controladores da dinâmica em ambientes estuarinos. A pluviosidade e a velocidade média dos ventos na região do CESM apresentaram um comportamento sazonal, devido ao fenômeno atmosférico-oceânico do *El Niño* (ENOS), caracterizado por um aquecimento anormal das águas superficiais, com alteração das chuvas e dos padrões de ventos e que tem como consequências a mudança do clima a nível regional e global (OLIVEIRA, 2001; DINIZ et al., 2014; VILA-CONCEJO; SHORT, 2016).

Vale ressaltar que os ventos alísios na direção NE são característicos da região, com intensidade média de 2.4 m s⁻¹ com máximas de velocidades nos meses de outubro e novembro, o que é ligada a migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), quando se verifica a presença dos ventos alísios de NE. No período de julho a novembro a referida zona desloca-se para o norte, afastando-se do Equador, quando os alísios de sudeste se tornam mais efetivos (CARVALHO et al., 2006; INMET 2018).

4.4 CARACTERÍSTICAS HIDRODINÂMICAS

A hidrodinâmica das águas do CESM apresenta uma característica marcante e configura essa região como sendo um local de alta energia, com a presença de um regime de maré com periodicidade semidiurna (duas marés altas e duas marés baixas) por dia lunar com intervalos proporcionais de aproximadamente 6 horas e 12,6 min, onde a componente harmônica M_2 é a dominante e mais energética das constituintes de maré. Seguindo a classificação de Davies (1964) para alturas de marés, a região é classificada como macromaré entre 4 e 6 metros e amplitude média de 2,9 m, contudo, pode chegar a alturas de até 6,5 metros nas grandes marés de sizíguas, sob à ação constante de ventos alísios, classificando o CESM como um ambiente de macromaré/hipermaré (PEREIRA; HARARI, 1995; DILLENBURG et al., 2009). Sua dinâmica é influenciada pela ocorrência de múltiplos fenômenos, sendo possível destacar: o escoamento fluvial; ventos; além da morfologia local. O CESM apresenta intensas correntes de maré que atingem velocidades máximas de até $2,75 \text{ m s}^{-1}$, sendo observadas as maiores intensidades em áreas adjacentes ao Complexo Portuário Ponta da Madeira (PEREIRA; HARARI, 1995; MORAIS, 1977; SAMARITANO et al., 2013).

MORAES (1977), em uma caracterização pioneira físico-geomorfológica nas águas do CESM, mostrou que há intensa mistura de águas marinhas, bem como as águas oriundas da drenagem continental, característica de sistemas estuarinos, onde ao sul da Ilha dos Caranguejos foi observada a isohalina limítrofe entre água doce e estuarina (5 g kg^{-1}) em maré enchente, propagando-se até a metade da Ilha dos Caranguejos, em maré vazante. Durante o estudo, o transporte de MPS indicava a deposição de sedimentos finos em um banco localizado a frente da Ilha dos Caranguejos, com concentrações variando de 160 a 300 mg L^{-1} e atribuiu a este processo deposicional a turbulência do escoamento, por ação da intensa mistura de águas na região.

Usando derivadores lagrangeanos MORAES (1977), observou que nas proximidades da região Portuária existia uma divisão do escoamento (Canal Principal e Canal do Boqueirão), em decorrência da Ilha do Medo. No Canal do Boqueirão as velocidades médias foram de $2,5 \text{ ms}^{-1}$, enquanto que no canal principal do CESM, as correntes variaram de $8,47 \text{ ms}^{-1}$ em maré enchente, a $8,07 \text{ ms}^{-1}$ em vazante, na maré de sizígia. Para maré de quadratura os valores foram 35% e 20% menores em maré enchente e vazante, respectivamente. Vale ressaltar que valores tão elevados de correntes para o CESM, se deve ao tipo de derivador utilizado, onde grande parte da velocidade de deslocamento do mesmo se deve à ação direta do vento.

Estudando a formação de Ondas de Areia (“*Sand Waves*”) no CESM, Chagas (2013), utilizou um modelo hidrodinâmico no modo barotrópico e o resultado da modelagem das correntes mostrou que as maiores velocidades foram observadas no canal principal do Complexo estuarino e no canal do Boqueirão, onde existe a presença de uma formação rochosa ao sul da Ilha do Medo

(Cabeço do Mearim) que divide o escoamento entre os dois respectivos canais, essa observação corrobora com os resultados de MORAES (1977). A presença do Cabeço do Mearim favorece a formação de vórtices (células de circulação, via teoria dos vórtices de *Von Kármán*) ao sul da Ilha do Medo, com sentido horário em maré vazante e sentido anti-horário, em maré enchente. Este comportamento também foi evidenciado nos trabalhos de Amaral (2006) e GARCIA (2007), ambos próximo à Área Portuária de São Luís.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 ETAPA PRÉ-CAMPO

A partir do estudo realizado no biênio 2014/2015 por Santos, (2018) nas águas estuarinas do CPSL, tornou-se evidente a necessidade de um levantamento mais detalhado de dados de correntes e das propriedades conservativas e não conservativas da água, baseado em uma melhor distribuição das estações amostrais e com a realização de fundeios, foi determinada uma malha amostral com intuito de contribuir para o melhor entendimento da circulação hidrodinâmica e das massas de água que atuam na região do CPSL em diferentes cenários.

Em laboratório, todos os materiais (frascos de polietileno, kit de filtração) usados na determinação de MPS foram previamente tratados com uma solução de HCl 10% e lavados com água deionizada para fins de descontaminação (MELO et al., 2003). Além disso os equipamentos CTD (*Conductivity, Temperature and Depth - pressure*) e ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) foram previamente calibrados para posterior uso em campo. Todos esses procedimentos foram feitos no Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores (LHiCEAI) e no Laboratório de Modelagem Equatorial Litorânea (MEL) localizados na Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

5.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Durante o ano de 2017, foram realizadas duas campanhas (com amostragens espaciais e temporais), sendo na estação chuvosa (março/17) e final da estação chuvosa (julho e agosto/17), sob condição de maré de sizígia e quadratura, respectivamente e com amostragens feitas em maré enchente e vazante na região ao largo do CPSL.

Nas coletas da amostragem espacial, as medidas de direção e velocidade de correntes, transporte de volume, dados de salinidade, temperatura da água, oxigênio dissolvido (OD) e material particulado em suspensão (MPS) foram adquiridos em 25 pontos dispostos em 5 perfis perpendiculares ao escoamento do fluido, com uma distância média entre as radiais de aproximadamente 2,5 km. A radial 1 engloba os pontos P1 ao P5, a radial 2 do P6 ao P10, radial 3 do P11-P15, a radial 4 do P16-P20 e a radial 5 do P21 ao P25 (Tabela 1 Figura 5). Os perfilamentos correntográficos nas radiais tiveram duração de 60 minutos cada (radiais 1, 2, 3) até

2h (radiais 4 e 5) em maré enchente e de 2h (radiais 1, 2 e 3) a 2h40min (radiais 4 e 5) em maré vazante.

Na amostragem temporal, a variação do MPS, variáveis de estado (salinidade e temperatura), OD e correntes foram adquiridas em dois fundeios, sendo o Fundeio I com duração de 13 horas, o que corresponde a um tempo de medição ligeiramente maior do que o período de um ciclo de maré semidiurna (12 h 25 min) e o Fundeio II com duração de 26 horas (24 h 50 min) (Tabela 1), ambos com amostragens realizadas a cada hora. A localização geográfica dos fundeios foi (lat. 2° 31' 40.570" S; long. 44° 21' 24.523" W), localizado ao lado da ilha do Medo (Figura 6).

Tabela 1. Períodos das campanhas espaciais e temporais no CPSL, para condições de maré de sizígia e quadratura, durante o ano de 2017, em diferentes marés e regimes sazonais.

A M O S T R A G E M E S P A C I A L					
CAMPANHA	PERÍODO SAZONAL	MARÉ	INÍCIO	FINAL	
1ª	ESTAÇÃO DE CHUVA	SIZÍGIA	14/03/17	15/03/17	
2ª	ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA	QUADRATURA	01/08/17	02/08/17	
A M O S T R A G E M T E M P O R A L					
FUNDEIO	PERÍODO SAZONAL	DURAÇÃO	MARÉ	INÍCIO	FINAL
I	CHUVA	~13 HORAS	SIZÍGIA	14/03/17-20H00	15/03/17 – 8H00
II	FIM DA CHUVA	~26 HORAS	QUADRATURA	04/07/17 – 10H00	05/07/17 – 12H00

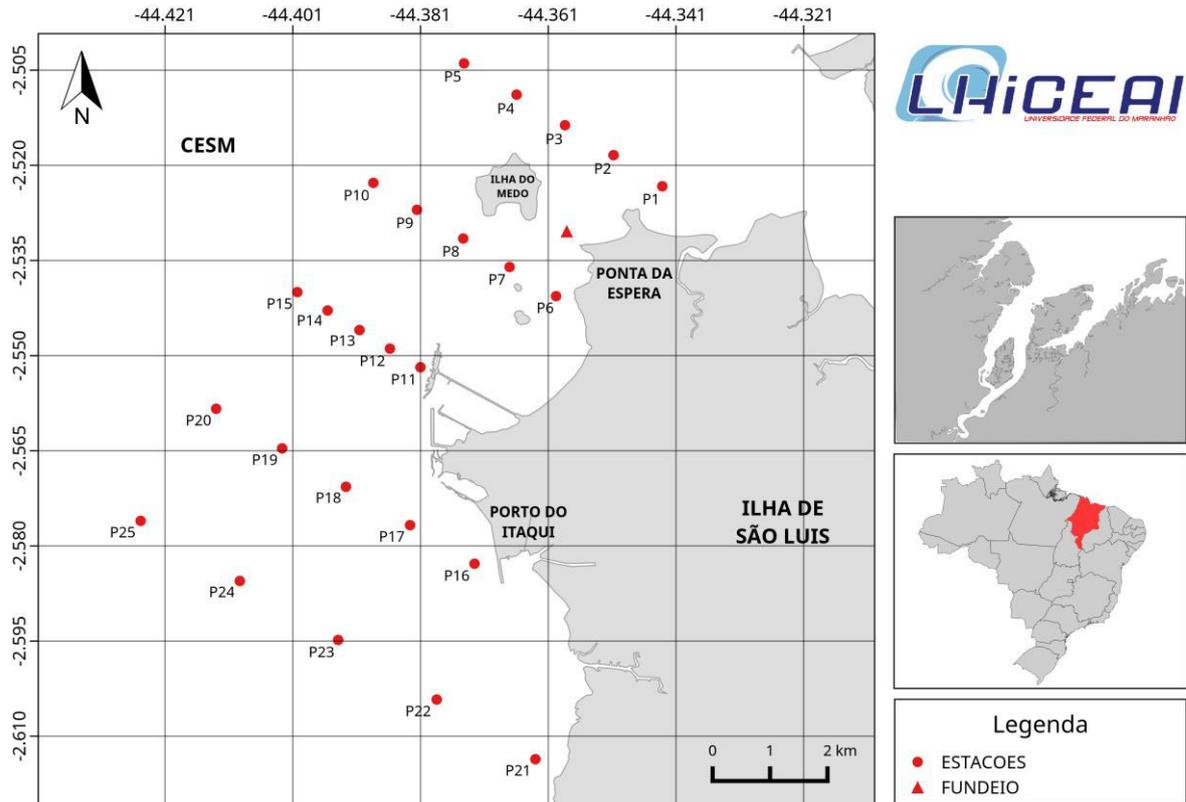


Figura 6. Localização dos pontos de amostragem para análise do transporte de sedimentos, radiais correntográficas e das variáveis de estado na área do Complexo Portuário de São Luís, situado no Complexo Estuarino de São Marcos.

Com a garrafa do tipo *van Dorn* (Figura 7) de 5 L foram coletadas duplicatas de amostras de águas na camada superficial (0,5 m abaixo da superfície da água) e na camada inferior (1,0 m do fundo) em frascos de polietileno com volume de 500 mL para a determinação do MPS nos 25 pontos da amostragem espacial e a cada hora durante a amostragem temporal (fundeios). Os frascos foram conservados refrigerados em isopor com gelo até a chegada ao laboratório para posterior análise do MPS.



Figura 7. Equipamento utilizado neste estudo: A garrafa oceanográfica do tipo *van Dorn* utilizada para aquisição do MPS na área de estudo.

5.3 MARÉ

As informações sobre os horários e altura de maré, foram obtidas pelo marégrafo localizado na estação do Terminal da Ponta da Madeira ($02^{\circ} 33'.9 S$ $044^{\circ} 22'.7 W$) e fornecidas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), da Marinha do Brasil, sendo estas, previsões de máxima e mínima da maré diária do ano de 2017 para os dias de coleta.

As estações de amostragem foram realizadas em intervalos de maré enchente e vazante, onde os valores medidos de maré oscilaram entre 0,5 a 5,8 metros, durante as coletas feitas na primeira campanha, referente ao mês de março (Figura 8-A) e de 0,7 a 5,7 metros, durante a segunda campanha, referente ao mês de agosto (Figura 8-B). A estação de chuva e fim da chuva foram realizadas em maré de sizígia e quadratura, respectivamente. As linhas tracejadas referem-se aos intervalos de amostragem para cada campanha e os horários de início e término as coletas, durante a maré vazante, em azul e maré enchente, em amarelo.

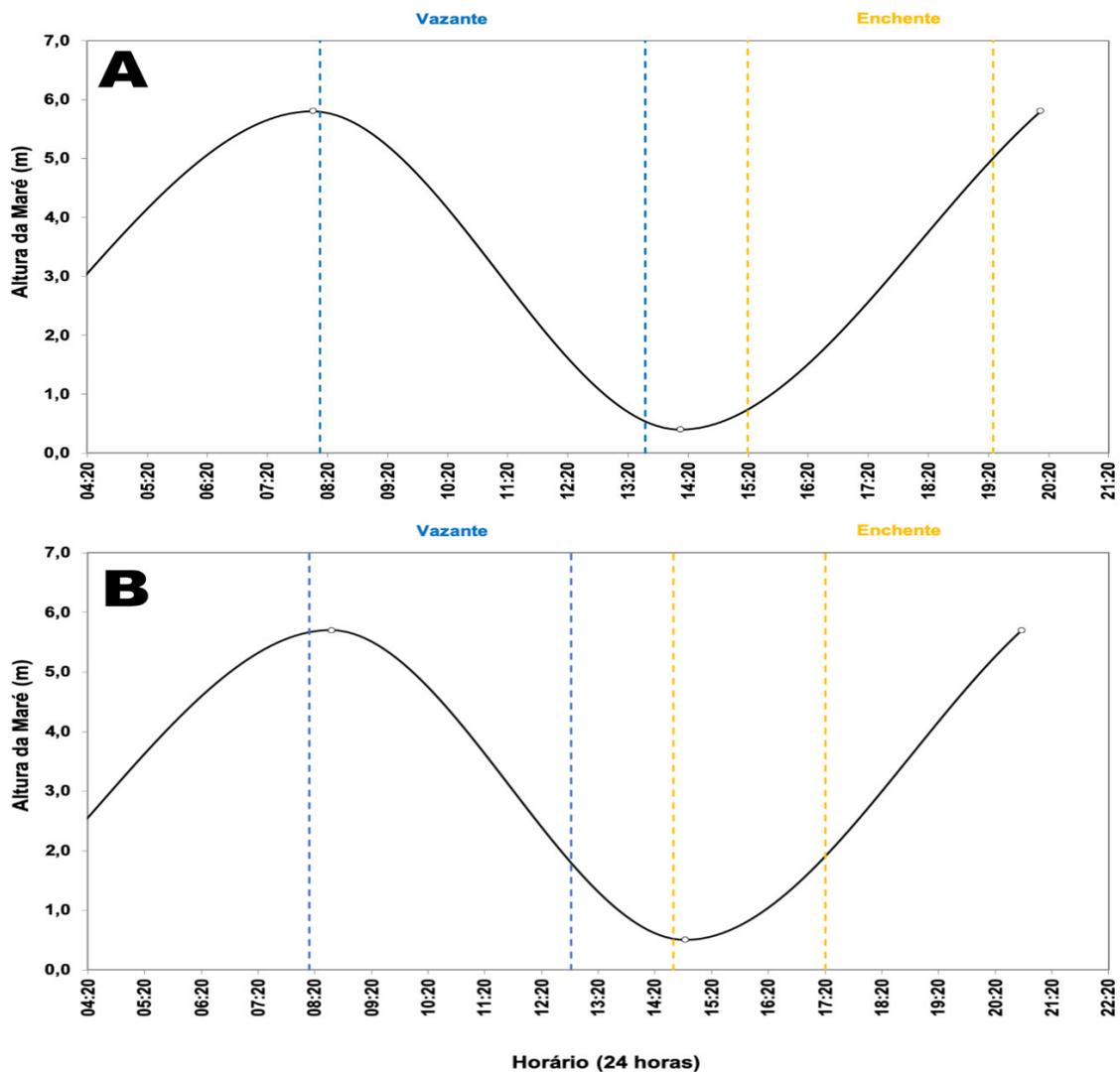


Figura 8. Representação do comportamento da maré durante as amostragens realizadas na primeira campanha (A), em maré de sizígia, nos dias 14 e 15 de março de 2017 (estação de chuva) e segunda campanha (B) realizada nos dias 01 e 02 de agosto (final da chuva), em maré de quadratura, ao largo do Complexo Portuário de São Luís. As linhas pontilhadas de cores azul e amarelo representam o período em que as amostragens foram realizadas durante enchente e vazante.

5.4 CLIMA

Os dados de precipitação pluviométrica (mm) e ventos ($m\ s^{-1}$) usados nesta pesquisa foram obtidos por meio de informações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da estação meteorológica de São Luís - MA, com a codificação 82280. Para a análise climatológica das médias mensais e variabilidades interanuais foi considerado o período de 1971 a 2016 (45 anos de dados) e precipitações do ano de 2017 e dos dias de aquisição de dados do estudo (Seção 6.1).

5.5 CTD

Em cada estação hidrográfica (espacial) e durante os fundeios (temporal), foi feito um perfil da superfície ao fundo da coluna d'água, para aquisição de dados contínuos de condutividade, temperatura, pressão (profundidade) e oxigênio dissolvido com auxílio de um CTD (EXO2, YSI, Ohio, USA) (Figura 9), segundo a metodologia proposta por Dias et al., (2016). O CTD possui

sensores de temperatura com amplitude de medida que variam de -5° e 40°C ; condutividade com amplitude de medição entre 0 e 90 mS cm^{-1} , pressão com amplitude de medição entre 0 e 2000 dbar e oxigênio dissolvido com amplitude de medição $\pm 0,1\text{ mg L}^{-1}$, a frequência de aquisição dos dados pelo CTD é de 4,0 Hz e o equipamento foi mergulhado na água a uma velocidade de descida de 1 m s^{-1} . No campo, simultaneamente, foram realizadas coletas de água para determinação do material particulado em suspensão, em duas profundidades (1 metro abaixo da superfície e 1 metro acima do fundo), acompanhadas por medidas correntográficas da superfície ao fundo.

O CTD foi utilizado como uma unidade autônoma, com os registros obtidos das coletas armazenados na memória do equipamento e quando retirado da água, os dados foram transferidos para um computador, passando por um controle de qualidade inicial. Dados improcedentes, oriundos de erros sistemáticos e aleatórios foram eliminados e essas respectivas interrupções (lacunas) foram preenchidas através do uso de uma interpolação linear, com apenas os perfis que passaram por uma interpolação menor ou igual a 5%, foram considerados na análise.

Como os sensores do CTD ficam localizados na base, apenas os dados obtidos durante a descida do equipamento no momento da coleta foram considerados, pois o processo de subida do aparelho é considerado mais turbulento que o processo de descida, gerando perturbações na estratificação original da coluna de água.



Figura 9. Equipamento utilizado neste estudo: o CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) EXO2, YSI, Ohio, USA acoplado a grade de proteção.

5.6 ADCP

Os registros da intensidade e direção das correntes (espacial e temporal) e o transporte de volume no CPSL foram estimados com o sensor de movimento de fluidos baseado em acústica submarina conhecido como ADCP (Figura 10), fabricado pela *Sontek/YSI*, rebocado em uma prancha e preso por cordas na popa da embarcação para eliminar interferências indesejáveis nos

transdutores durante a emissão, propagação e recepção dos sinais acústicos. A velocidade da embarcação durante os perfilamentos nas radiais foi reduzida para 1-2 nós e durante a variação temporal o equipamento ficou fundeado no local de amostragem dos fundeios I e II, para registrar as velocidades instantâneas em cada hora. O equipamento foi configurado com frequência de medição de 500 kHz e programado para realizar a aquisição de dados (*Burst Interval*) a cada 120 segundos. A extensão vertical de cada célula foi fixada em 100 cm, a distância de branco foi de 100 cm e alcance máximo de 100 m. Os dados de correntes foram adquiridos e acompanhados em tempo real. A técnica de sensoriamento do ADCP é baseada na propagação do som em fluidos, além de técnicas de processamento digital de sinais para obtenção de estimativas do movimento dos mesmos. O equipamento foi configurado ao uso do sistema *Bottom Tracking*, que rastreia a profundidade e a usa como referencial para o fundo do canal. Em laboratório, os registros obtidos pelo ADCP foram inicialmente pré-processados com os programas do equipamento (*View ADP*) para posterior filtragem dos dados, edição para cálculos e confecção de gráficos, imagens e análises.



Figura 10. Equipamento utilizado neste estudo: o ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) acoplado à prancha e preso por cordas na popa da embarcação.

5.7 VARIÁVEIS DE ESTADO, OD E CAMPO DE MASSA

As variáveis de estado (salinidade - g kg^{-1} , temperatura - $^{\circ}\text{C}$) e os dados de Oxigênio Dissolvido ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) foram calculadas segundo a TEOS-10 - *Thermodynamic Equation Of Seawater-2010* (Equação Termodinâmica da Água do Mar). Essa descrição termodinâmica das propriedades da água do mar, foi aprovada pelo *Scientific Committee on Oceanic Research* (SCOR), pela *International Association for the Physical Sciences of the Ocean* (IAPSO) e adotada pela *Intergovernmental Oceanographic Commission* (IOC) em junho de 2009, para substituir a EOS-80 como descrição oficial das propriedades da água do mar e do gelo nas ciências marinhas. Foi baseada em uma formulação a partir da qual todas as propriedades termodinâmicas da água do mar, tais como densidade e entalpia, são expressas como funções da salinidade absoluta (g kg^{-1}), em vez de serem funções da condutividade da água do mar (IOC, 2010). Neste estudo, as

concentrações do parâmetro não conservativo Oxigênio Dissolvido (OD), mensuradas pelo CTD na unidade de mg L^{-1} , foram recalculadas e expressas em $\mu\text{mol kg}^{-1}$ de acordo com a TEOS 10.

A densidade convencional Sigma-t (σ_t), obtida com a Equação Internacional de Estado – EIE – 1980 (UNESCO, 1981), foi calculada de acordo com a equação 1:

$$\sigma_t = [\rho(S, T, P_{atm}) - 1.000] \quad (1)$$

Onde: ρ é a densidade da água do mar com salinidade S, temperatura T e P_{atm} é a pressão atmosférica.

5.8 AMOSTRAGEM ESPACIAL

5.8.1 REMOÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS

Em decorrência da alta taxa de amostragem, devido à aquisição de dados na forma digital, fez-se necessário um pré-processamento e filtragem dos dados brutos de salinidade, temperatura e oxigênio dissolvido exportados do CTD. Deste modo, foram detectados e eliminados os dados espúrios (provenientes de erros aleatórios e sistemáticos), através do uso de uma taxa de máxima variação de cada propriedade, eliminando assim quaisquer valores que excederam a este limite. Desta foram, os perfis hidrográficos realizados com o CTD, foram divididos em blocos de 0,5 metros de espessura, desde a superfície até o fundo da coluna d'água. Em cada bloco, os dados que se mostraram diferentes da média ± 3 vezes o desvio padrão do bloco, foram eliminados (EMERY; THOMPSON, 1998). Posteriormente foi utilizada um tratamento estatístico, como uma janela móvel para preenchimento das lacunas deixadas pela remoção dos dados inconsistentes nos perfis.

5.8.2 EQUI-ESPAÇAMENTO VERTICAL

A utilização do CTD a uma velocidade de decida de 1 m s^{-1} na coluna d'água e a uma frequência de aquisição de dados de 4 Hz, permitiu a aquisição de 4 valores de temperatura, salinidade e OD por metro de coluna d'água. Porém, devido ao balanço da embarcação, não foi possível garantir um equi-espaçamento vertical entre as amostras do momento da amostragem. Assim, foi calculada uma média vertical para cada 0,5 metro de coluna de água, resultando em perfis equi-espaçados verticalmente.

5.8.3 FILTRAGEM POR JANELA MÓVEL

Após a realização da remoção dos valores espúrios e do equi-espaçamento vertical, os espaços deixados pelos dados de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido em cada intervalo de 1 m foram recalculados e preenchidos utilizando um procedimento conhecido na literatura

como *filtragem por janela móvel*. Com esses valores substituídos por uma média ponderada entre eles mesmos e os valores adjacentes. A quantidade de valores adjacentes incluídos nesta média corresponde ao tamanho da janela utilizada e a distribuição dos valores corrigidos em relação ao valor central, será determinado pelo tipo de janela utilizada. Neste estudo, foi utilizada a janela móvel do tipo *Hann/Hanning*, que promove uma distribuição de pesos de caráter *gaussiano*, que privilegia a medida central. É necessário a realização desta etapa, pois os dados coletados com o CTD são extremamente ruidosos. Entretanto, esse processo deve ser usado com o cuidado necessário para que os gradientes importantes das propriedades não sejam atenuados. (DIAS et al., 2016).

5.8.4 GRADEAMENTO HORIZONTAL DAS PROPRIEDADES

Para a obtenção da variação horizontal das propriedades conservativas e não conservativas, foi construída uma grade curvilínea, de forma a compor as características encontradas na região estudada do CPSL. A área que representa cada ponto amostral de salinidade, temperatura, oxigênio dissolvido e MPS foi determinada através da área da atuação de cada uma delas, utilizando os Polígonos de *Voronoi* (AURENHAMMER; KLEIN, 1989).

5.9 ÍNDICES TERMOHALINOS

Neste estudo foi empregado o Diagrama T-S espalhado, uma importante ferramenta de análise e identificação dos índices termohalinos das massas de água de regiões costeiras e oceânicas, que apresentam uma estratificação vertical na coluna d'água envolvendo processos de mistura e circulação (MIRANDA & CASTRO, 1979; MIRANDA, 1985). Esse diagrama consiste na plotagem bidimensional das propriedades de Temperatura e Salinidade em um campo de isopícnais comprovando uma relação destes índices (MAMAYEV, 1975), postas na ordenada e na abcissa do diagrama cartesiano, respectivamente (MIRANDA et al., 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 deste estudo. A distância vertical para cada par TS foi definida de acordo com a seguinte equação:

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

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); di representa a distância vertical de influência da i -ésima observação na coluna de água; $hi \geq 0$ é a profundidade da i -ésima observação; Z é a profundidade local de cada estação da amostragem (MIRANDA & CASTRO, 1979). Depois de linearizar os índices termohalinos para cada tipo de massa d'água na distribuição dos pares TS no diagrama TS, será utilizado o método de triangulação de massas d'água descrito inicialmente por Mamayev (1975), utilizando a porcentagem de massa d'água presente em cada amostragem de mistura para diferenciação e caracterização presente nas estações observadas. Para calcular a influência de mistura de duas massas d'água, requer primeiro identificar os índices termohalinos T1S1 e T2S2 descritas na equação:

$$\begin{aligned} m1T1 + m2T2 &= mT \\ m1S1 + m2S2 &= mS \\ m1 + m2 &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

Onde: 1 representa 100% do volume e os termos m, T e S estão relacionados a mistura de duas massas d'água no triângulo de mistura e significam massa, temperatura e salinidade, respectivamente. Com base na análise do diagrama T-S é possível identificar as massas de água de acordo com os valores observados por Dias et al., (2013) para a PC da Margem Equatorial como: Água do Rio (AR) ($T \geq 29^\circ\text{C}$; $S \leq 30 \text{ g kg}^{-1}$), Água Costeira (AC) ($T \geq 28^\circ \leq 29^\circ\text{C}$; $S 34,5 \leq 36 \text{ g kg}^{-1}$) e Água Tropical (AT) ($T \geq 18^\circ\text{C}$; $S \geq 36 \text{ g kg}^{-1}$).

5.10 AMOSTRAGEM TEMPORAL

Os procedimentos nesta seção foram utilizados somente para os perfis Eulerianos feitos no CPSL, os Fundeios I (13 horas) e II (26 horas).

5.10.1 REMOÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS

Durante a etapa de pré-processamento dos dados da estrutura termohalina, os valores espúrios foram detectados e excluídos baseados numa taxa de variação máxima de cada variável, segundo a metodologia de THOMSON & EMERY, 2001. A janela utilizada foi 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 corresponde 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.

5.10.2 EQUI-ESPAÇAMENTO VERTICAL

Com objetivo de minimizar o efeito da variação da profundidade da coluna de água nos perfis realizados durante o ciclo completo de maré, devido à oscilação da superfície livre $[\eta]$, a profundidade de amostragem (z) foi normalizada, ou seja, reduzida à profundidade adimensional (Z), de acordo com a equação de Kjerfve (1975) :

$$Z = \frac{z}{h(x,y,t)} \quad (4)$$

Onde: $h(t)$ é a profundidade da coluna de água no momento da amostragem (instante t); Z é a profundidade adimensional (normalizada).

As propriedades hidrográficas (S - Salinidade e T - Temperatura), Oxigênio Dissolvido e as componentes das velocidades (u e v) foram interpoladas na coluna d'água em intervalos $\Delta Z = -0,1$, ou seja, desde a superfície ($Z=0$) até o fundo ($Z = -1$), em um regime de maré vazante e maré enchente (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002; BERGAMO; MIRANDA; CORRÊA, 2002). Os pares T, S foram extrapolados até o fundo e a extrapolação da velocidade foi feita assumindo a condição de contorno de não deslizamento, assumindo-se para a velocidade de fundo o valor zero.

5.11 CORRENTES

5.11.1 DECOMPOSIÇÃO DA VELOCIDADE

Para a área de estudo na amostragem espacial e temporal foi utilizado o referencial O_{xyz} , onde O_x é orientado para leste, O_y é orientado para o norte e O_z em sentido oposto à gravidade. O vetor velocidade (\vec{V}) de corrente foi decomposto em componentes longitudinal (*along channel* - u) e transversal/cruzando o canal (*cross channel* - v), em relação ao referencial O_{xy} , a decomposição do vetor velocidade em componente longitudinal (u) e transversal (v) foi feita através de relações trigonométricas de seno e cosseno (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002), como mostram as equações 5 e 6:

$$u = |\vec{V}| \cdot \cos \theta \quad (5)$$

$$v = |\vec{V}| \cdot \sin \theta \quad (6)$$

Onde:

u : velocidade longitudinal [$m s^{-1}$]; v : velocidade transversal [$m s^{-1}$]; V : módulo da velocidade [$m s^{-1}$]; θ : ângulo ajustado [$^\circ$].

Como o ADCP se orienta em relação ao Norte Magnético, o ângulo trigonométrico (θ) foi corrigido/ajustado por:

$$\theta = 90^\circ - (dd - D) - \gamma \quad (7)$$

Onde: \vec{V} é correspondente ao vetor velocidade, D é a correção pela declinação magnética local, que é um desvio angular em relação ao norte verdadeiro para leste ou oeste (o sinal negativo indica declinação para oeste), dd é o ângulo/direção vetorial mensurado pelo ADCP (entre o eixo norte magnético e o vetor velocidade) e o γ (rotação do canal) corresponde ao ângulo do eixo longitudinal do estuário (o sinal negativo indicando o sentido anti-horário). A subtração dos demais ângulos pelo ângulo de 90° indica a mudança de referencial, do eixo das abscissas para o eixo das ordenadas.

A decomposição foi efetuada levando-se em consideração a declinação magnética local (D), fornecida pela carta náutica nº 411 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) do Ministério da Marinha (MM), o valor de $23^\circ W$ no ano de 2017. Para o alinhamento do eixo Oxy com o canal foi utilizado o ângulo de 45° . Detalhes sobre o procedimento para a correção e decomposição das velocidades de correntes foram descritas por Miranda; Castro; Kjerfve (2002).

5.11.2 REMOÇÃO DE DADOS ESPÚRIOS

Os mesmos fatores que podem ocasionar erros no momento de aquisição de dados de correntes com o uso de um ADCP rebocado por uma embarcação, também podem atuar nos fundeios, ou seja, na variação temporal. Para remoção dos dados inconsistentes armazenados pelo equipamento durante o tempo dos fundeios de 13 e 26 horas, utilizamos o filtro Gaussiano, um método estatístico que elimina os registros que excederam a média mais ou menos 3 vezes o valor do desvio padrão a partir da aplicação de uma janela móvel retangular com 0,5 horas.

As lacunas deixadas na série de dados originais, geradas pela remoção dos dados espúrios, foram preenchidas com o uso de interpolação linear. O percentual de preenchimento de lacunas através da interpolação linear não excedeu 1% (entre 0,5 e 0,8%) do número total de dados da série original. Os dados de correntes foram interpolados ao longo da coluna de água seguindo a forma adimensional descrita na equação 4.

Nesse trabalho, foi adotada a convenção de ($u > 0$) (valores positivos) para expressar velocidades longitudinais de maré vazante, sentido montante para foz e ($u < 0$) (valores negativos), para expressar velocidades longitudinais de maré enchente, sentido foz pra montante. Para a variação do campo de correntes nos fundeios, foi utilizada a condição de não escorregamento junto ao fundo, onde assumimos velocidades iguais a zero no fundo ($u = 0$).

5.12 CÁLCULO DOS VALORES MÉDIOS NO ESPAÇO E NO TEMPO

A integração numérica para as médias no espaço e no tempo foi realizada de acordo com os métodos propostos por Miranda, Castro e Kjerfve (2002) e Bergamo, Miranda e Corrêa (2002), onde o espaço equivale à profundidade. Para os perfis verticais de propriedades escalares denotados genericamente por $P = P(Z_j, t)$, amostradas em profundidades adimensionais discretas ($Z_j = 0; -0.1; -0.2, \dots -1.0$), as médias desses perfis no tempo e no espaço foram calculadas por integração numérica, conforme as equações a seguir:

$$\langle P(Z_j, t) \rangle = P(Z_j) = \frac{1}{M} \int_{t_0}^{t_n} P(Z_j, t) dt \quad (8)$$

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

$$\overline{P(Z_j, t)} = \overline{P(t)} = \int_{-1}^0 P(Z_j, t) dZ \quad (9)$$

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 (M) e ao longo da coluna d'água. Para estimar o efeito barotrópico da maré, foi calculado o valor médio da propriedade escalar $P = P(Z, t)$ na coluna d'água, por integração numérica:

$$\langle \overline{P(Z_j, t)} \rangle = P = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_n} \left[\int_{-1}^0 P(Z_j, t) dZ \right] dt \quad (10)$$

Nas equações (8) (9) e (10), $P(Z_j)$ é a média temporal, $P(t)$ é a média espacial e P é a média no espaço e tempo, aplicada ao perfil vertical observado de uma propriedade escalar qualquer $P(Z, t)$, que neste caso são representadas pela salinidade [$S=S(Z, t)$], temperatura [$T=T(Z, t)$] e componente longitudinal da velocidade [$u=u(Z, t)$] interpolados em intervalos de profundidade adimensional $\Delta Z = -0,1$.

Em relação ao período (M) de amostragem, equivalente ao ciclo completo de maré, a interpolação é feita com $M = n\Delta t = t_n - t_0$, (com: $\Delta t = 1$ hora e $n = 13$ horas). As integrações foram feitas numericamente aplicadas aos valores discretos no tempo e/ou espaço, pelas seguintes equações (KJERFVE, 1979; MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002):

$$\langle P(Z_j, t) \rangle = P(Z_j) = \frac{1}{13} \left[\frac{P(Z_j, t_0)}{2} + \sum_k P(Z_j, t_k) + \frac{P(Z_j, t_n)}{2} \right] \quad (11)$$

$$\overline{P(Z_j, t)} = \overline{P(t)} = \frac{1}{10} \left[\frac{P(Z_0, t)}{2} + \sum_j P(Z_j, t) + \frac{P(Z_{-1}, t_j)}{2} \right] \quad (12)$$

$$\langle \overline{P(Z_j, t)} \rangle = P = \frac{1}{13} \left[\frac{P(t_0)}{2} + \sum_k P(t_k) + \frac{P(t_n)}{2} \right] \quad (13)$$

Através deste método, foram obtidos os perfis Eulerianos (fundeios), os quase-estacionários da salinidade, temperatura e da componente longitudinal da velocidade, bem como seus valores residuais u_a , S_a e T_a para os dois fundeios oceanográficos (Miranda, Castro e Kjerfve, 2002).

5.13 INTERAÇÕES CONTINENTE-OCEANO

5.13.1 TRANSPORTE DE VOLUME (T_V)

O transporte de volume de um corpo hídrico é o volume de água que passa através de uma seção transversal por unidade de tempo, em $m^3 s^{-1}$. Com base nesse princípio físico, o Transporte de volume (T_V) nas seções transversais ao fluxo médio de área $A = A(y, Z)$ ao largo do CPSL, foi calculado por integração numérica da seguinte equação, segundo Miranda, Castro e Kjerfve (2002):

$$T_{v=} = \iint_A \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad (14)$$

Em que $\vec{v} = \vec{v}(x, Z, t)$ é o vetor velocidade ($m s^{-1}$); \vec{n} é o vetor ortogonal à seção de medição do ADCP (m^2) e o produto escalar $\vec{v} \cdot \vec{n} = v(x, Z, t)$ é o componente longitudinal de velocidade, t é o intervalo de tempo do instante amostrado; x é a distância horizontal da seção e Z é a profundidade normalizada/adimensional. Essa quantidade física foi calculada em unidades do Sistema Internacional (SI) (T_V em $m^3 s^{-1}$).

5.13.2 CÁLCULOS DOS VOLUMES E TEMPO DE RESIDÊNCIA

5.13.2.1 VOLUME DE ÁGUA TOTAL (V_T)

O volume de água total (V_T) foi calculado em cada radial de amostragem (espacial), em m^3 , a partir dos valores de T_V , como mostra a equação (15) (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2012):

$$V_T = |T_V| \cdot T \quad (15)$$

Onde: T_V corresponde a vazão, em $m^3 s^{-1}$ e T é o intervalo de meio ciclo de maré (~6,2h).

5.13.2.2 VOLUME DE ÁGUA DOCE (V_{fw})

O volume de água doce existente na massa de água total estuarina, V_{fw} , foi calculado conforme a equação (16) em m^3 . A partir desse valor, considerando-se o volume de água total (V_T), será determinado o percentual de água doce ($P_{ad}\%$) existente na massa de água total (Equação 17) para os dois períodos estudados, em maré enchente e maré vazante.

$$V_{fw} = \left(\left(1 - \left(\frac{S}{S_0} \right) \right) \cdot V_T \right) \quad (16)$$

$$P_{ad}(\%) = \frac{V_{fw} \cdot 100}{V_T} \quad (17)$$

Na equação (16), S_0 representa a salinidade observada regionalmente para a água do mar, não diluída, característica da massa de água da região adjacente sem influência da pluma estuarina e S representa a média aritmética da salinidade medida *in situ*, para cada seção durante o período de amostragem no CPSL (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2002).

5.13.2.3 TEMPO DE RESIDÊNCIA (T_R)

O Tempo de Residência (T_R), foi calculado a partir do modelo proposto por (PRITCHARD, 1960). Neste estudo, os valores de tempo de residência foram expressos em horas.

$$T_R = \frac{V_{fw}}{T_V} \quad (18)$$

Sendo T_V e V_{fw} para cada radial do estudo, ao largo do CPSL para maré enchente e vazante.

5.13.2.4 BALANÇO DE CARGAS

Para o cálculo do balanço de cargas, foram calculados os volumes de entrada (enchente) (V_{flood}) e saída (vazante) (V_{ebb}). Esse cálculo foi definido de acordo com Jonge (1992), a partir das vazões, conforme mostra a equação 19:

$$\text{Balanço de cargas} = \text{Vazão}_{flood} - \text{Vazão}_{ebb} \quad (19)$$

5.13.3 TRANSPORTE ADVECTIVO DE SAL (T_s)

O transporte médio de sal (T_s) longitudinal durante um ou mais ciclos completos de maré é dado pela equação 20 e foi aplicada somente para os fundeios feitos no CPSL. O transporte total dado pela equação (20) pode ser dividido em componentes, os quais são influenciados pelas seguintes forçantes dinâmicas: descarga fluvial, deriva de Stokes, difusão de maré, circulação gravitacional, difusão residual, cisalhamento da maré e efeito não estacionário do vento, calculado como:

$$T_s = \frac{1}{M} \int_0^M \int_0^h [\rho u S dz] dt = \langle \overline{\rho u S h} \rangle \quad (20)$$

Onde $\rho = \rho(S, T)$ é a densidade da água do mar, u a componente longitudinal da velocidade, S a salinidade, M é o intervalo de tempo e h é a espessura da coluna de água. O símbolo ($\langle \rangle$) denota média temporal e a barra sobre as variáveis ($\overline{\quad}$) indica o valor médio ao longo da coluna d'água.

O segundo membro da equação (20) envolve o cálculo de médias no espaço e no tempo das propriedades que foram calculadas numericamente por meio das equações (11) (12) e (13). No SI o T_s é dado em $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$. Detalhes acerca da metodologia empregada podem ser adquiridos em Bergamo, Miranda e Corrêa (2002) e Miranda, Castro e Kjerfve (2002).

Para calcular a contribuição dos mecanismos físicos responsáveis pelo transporte advectivo de sal, visto que somente uma parte referente ao transporte de sal foi calculada pela equação (18), foi utilizado um procedimento análogo ao empregado na pesquisa estuarina, desenvolvido por vários pesquisadores (BOWDEN, 1963; DYER, 1974; FISCHER, 1976; HUNKINS, 1981 e KJERFVE, 1986), no qual é necessário decompor em parcelas o componente longitudinal de velocidade (quatro parcelas), a salinidade (quatro parcelas) e a espessura da coluna de água (duas parcelas). Para um canal estuarino lateralmente homogêneo, essa decomposição é expressa por:

$$\mathbf{u}(x, Z, t) = \mathbf{u}_a(x) + \mathbf{u}_t(x, t) + \mathbf{u}_s(x, Z) + \mathbf{u}'(x, Z, t), \quad (21)$$

$$S(x, Z, t) = S_a(x) + S_t(x, t) + S_s(x, Z) + S'(x, Z, t), \quad (22)$$

Como a espessura da coluna d'água varia com a maré, ela também deve ser separada nos seguintes componentes,

$$h(x, t) = h_a + h_t(x, t), \quad (23)$$

Onde: $h_a = \langle h \rangle = H_0$ é a média no tempo da profundidade local e $h_t(x, t) = \eta(x, t)$ é a variação no tempo da altura da maré.

Onde: $u_a(x)$ e $S_a(x)$ são os valores médios no espaço e no tempo da componente longitudinal da velocidade e da salinidade. As primeiras parcelas do segundo membro das equações (21) e (22) representam o efeito advectivo gerado pela descarga fluvial ($u_a(x)$) na redistribuição advectiva da salinidade ($S_a(x)$). 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 barotrópicos e baroclínicos da força de gradiente de pressão, respectivamente. Os últimos termos $u'(x, Z, t)$ e $S'(x, Z, t)$ correspondem as parcelas residuais, resultantes de processos físicos de pequena escala. O $h_a = \langle h \rangle$ é a média no tempo da profundidade local e $h(x, t)$ é a variação no tempo da altura da maré.

Substituindo as equações (21) (22) e (23) na equação (20), o transporte resultante de sal fica decomposto em 32 parcelas. Desprezando-se os termos muito pequenos e aqueles os quais não há uma correlação com significado físico definido, resultam em sete parcelas para o transporte total médio de sal durante um ou mais ciclos completos de maré.

$$T_S = \bar{\rho} (u_a \cdot h_a \cdot S_a + u_t \cdot h_t \cdot S_a + \langle u_t \cdot S_t \rangle h_a + \overline{u_s S_s} h_a + \langle \overline{u' s'} \rangle h_a + \langle u_t S_t h_t \rangle + u_a \langle S_t h_t \rangle), \quad (24)$$

As parcelas de (1) a (7) da equação (24) estão relacionadas, respectivamente, aos seguintes processos físicos que ocorrem no estuário: transporte gerado pela descarga fluvial ou velocidade residual (1), transporte de massa gerado pela propagação da onda de maré no estuário (Deriva de Stokes) (2), correntes de maré (3), circulação gravitacional (4), flutuações turbulentas (5), correlação tríplice (6) e corrente residual, associada à correlação entre salinidade e maré (7). Essas parcelas são apresentadas graficamente na forma de histograma. Detalhes em relação a metodologia empregada podem ser adquiridos em Bérghamo, Miranda e Corrêa (2002) e Miranda, Castro e Kjerfve (2002).

5.13.4 ESTABILIDADE DA COLUNA DE ÁGUA

5.13.4.1 NÚMERO DE RICHARDSON POR CAMADA (Ri_L)

No estuário, a turbulência é produzida pela influência dos limites geométricos imposta ao movimento, cisalhamento vertical da velocidade, tensão de cisalhamento do vento e ondas de

superfície e internas. A intensidade da turbulência controla a distribuição vertical da concentração das propriedades da massa de água estuarina. Assim o número de Richardson por camada surge como uma alternativa para medir a estabilidade na coluna de água ao longo do ciclo de maré.

Neste trabalho, utilizamos o número de Richardson por camada (Ri_L) definido por Bowden (1978), para avaliar a estabilidade da coluna d'água, pois esse método mostra a evolução da mistura/estratificação para a região do CPSL durante os ciclos de maré e foi calculado como mostra a equação 25:

$$Ri_L = \frac{gh}{(\bar{u})^2} \cdot \frac{\Delta\rho_v}{\bar{\rho}} \quad (25)$$

Onde: $h = h(t)$ é a profundidade local (m), g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$), $\Delta\rho_v$ é a diferença entre a densidade do fundo ρ_f e na superfície ρ_s ($\rho_f - \rho_s = \Delta\rho_v$) (kg m^{-3}), u é o valor médio da velocidade na coluna d'água e $\bar{\rho}$ é a densidade média da coluna de água (kg m^{-3}).

O número de Richardson por camada é um indicativo do processo dominante de mistura, o qual indica a estabilidade do fluxo. Na apresentação da variação temporal de Ri_L o eixo da ordenada foi separado, de acordo com Dyer (1986), em três partes. Os limites inferiores e superiores ($Ri_L = 2$ e $Ri_L = 20$) estabelecem as condições de instabilidade e alta estabilidade vertical na coluna de água, respectivamente, denotando assim:

- Para valores de $Ri_L < 2$, implica que os processos de mistura dominam, indicando uma condição de instabilidade na coluna d'água, caracterizando os estuários bem misturados;
- Valores de Ri_L entre 2 e 20, há formação de estratificação relativamente moderada e a coluna d'água é pouco estável/fraca estabilidade;
- Valores de $Ri_L > 20$, os mecanismos de mistura não foram suficientes para quebrar a estratificação da coluna d'água, apresentando uma alta estabilidade vertical (DYER, 1986).

5.13.5 DIAGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO DE HANSEN & RATTRAY

Para classificação do estuário nos perfis *Eulerianos* realizados neste estudo, foi utilizado o Diagrama Estratificação-circulação de Hansen & Ratray, (1966), sendo um diagrama baseado primeiramente no modelo bidimensional estacionário, lateralmente homogêneo e com seção retangular, que simula perfis teóricos da velocidade longitudinal e da salinidade. Sendo estes perfis médios do componente longitudinal da velocidade (u) e da salinidade (S) usados para o cálculo teórico dos parâmetros estratificação (P_e) e circulação (P_c) definidos da seguinte forma:

$$P_e = \frac{\delta S}{\bar{S}} = \frac{S_f - S_s}{\bar{S}} \quad (26)$$

(27)

$$P_c = \frac{u_s}{u_f} \approx \frac{u_s}{\bar{u}}$$

$\delta S = S_f - S_s$ é a diferença entre os valores de Salinidade no fundo (S_f) e de superfície (S_s), \bar{S} é o valor médio da Salinidade na coluna de água; A u_s é o valor médio do componente longitudinal de velocidade na superfície e u_f é a velocidade da descarga fluvial ($u_f = T_v/\text{área}$). Quando a descarga fluvial não é conhecida, em vez de usar u_f , utiliza-se \bar{u} que é o valor médio da velocidade na coluna d'água. O cálculo destes parâmetros na prática, foram realizados com médias no tempo e no espaço utilizando as equações (11) a (13).

Os parâmetros de estratificação e circulação estão teoricamente relacionados com uma grandeza N_i , que representa a proporção relativa do transporte de sal estuário acima, resultante do processo de mistura advectivo e difusivo (BÉRGAMO; MIRANDA; CORRÊA, 2002).

Segundo Hansen e Rattray (1966), os estuários podem ser classificados de acordo com o diagrama em:

- 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 advectivos e dispersivos são importantes 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.

O parâmetro v representa a fração de sal advectada estuário abaixo pela descarga fluvial e que está em balanço com o sal transportado estuário acima por difusão turbulenta, gerada pela maré. A parcela restante é o transporte advectivo de sal estuário acima devido a circulação gravitacional. Quando $v = 1$ não há circulação gravitacional e o transporte de sal estuário acima é inteiramente por difusão turbulenta; quando $v \rightarrow 0$, a difusão turbulenta torna-se menos importante e o transporte de sal estuário acima é totalmente por advecção (Hansen & Rattray, 1966; Hamilton & Rattray, 1978).

5.13.6 MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS)

Para a quantificação do MPS presente nas águas estuarinas do CPSL, amostras de água foram coletadas em duplicata, a partir de uma amostra de 5 litros de água, coletada com garrafa oceanográfica do tipo *van Dorn*, lastreada com chumbo de 10 kg para controlar a estabilidade e o direcionamento vertical no momento da coleta. Durante o estudo, as amostras de água foram

coletadas na camada superficial (0,5 m abaixo da superfície da água) e na camada inferior (1 m acima do fundo), em todas as estações hidrográficas de coleta e durante os dois fundeios, a cada hora. Após a coleta, as amostras de água foram acondicionadas em frascos de polietileno de 500 ml (duplicata) e mantidas resfriadas a 4°C, até a chegada em laboratório. A determinação da concentração de MPS foi feita por medida gravimétrica, segundo as metodologias descritas em Strickland e Parsons (1972) e APHA (2001), através da diferença entre os pesos antes e após o processo de filtragem em filtros de fibra de vidro (Millipore AP 040) de 47 mm de diâmetro, para um exato volume filtrado, com resultados em mg L^{-1} , conforme descrito na equação (28). Nos perfis Eulerianos, as concentrações de MPS foram interpoladas na coluna de água, através de uma interpolação linear para a confecção das figuras de variação temporal (isopletras).

$$MPS (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = \frac{(B - A) \cdot 10^3}{\text{volume da amostra filtrada (ml)}} \quad (28)$$

Onde: A = Peso do filtro (mg) e B = Peso do filtro + resíduo seco (mg).

5.13.7 FLUXOS DE MPS

A quantificação do volume de água que passa em uma seção do CPSL (vazões) é importante para que seja possível estimar a competência do fluido no transporte de um determinado material na coluna d'água. Esta estimativa é dada pelos dados coletados com o ADCP que estima a velocidade das correntes de acordo com a velocidade do deslocamento das partículas no fluido. De posse dos dados das concentrações de MPS, foram calculadas as descargas desse material, utilizando a equação de transporte de massa, segundo MIRANDA, CASTRO E KJERFVE (2002):

$$T_{mps} = \iint_A \boldsymbol{\varphi} \vec{v} \cdot \vec{n} dA = \iint_A \boldsymbol{\varphi} u dA = \overline{\boldsymbol{\varphi} u} A \quad (29)$$

Onde: o T_{mps} representa o transporte de MPS (kg s^{-1}), A = representa a área média da seção transversal à direção longitudinal do fluxo (m^2), (\cdot) denota o produto escalar, \bar{u} é o valor médio do componente de velocidade normal a área A e $\bar{\boldsymbol{\varphi}}$ indica a concentração média de MPS (mg L^{-1}) na seção transversal A .

6. RESULTADOS

6.1 PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E VENTOS LOCAIS

O período de maiores precipitações historicamente ocorre entre os meses de janeiro a junho, sendo o quadrimestre fevereiro-março-abril-maio os mais chuvosos, correspondendo a média de 1.519 mm da série histórica para os quatro meses. Para o ano de 2017, esse quadrimestre apresentou valor de 1.490 mm. O mês com maior volume de chuva em 2017 foi março, com 442,80 mm (Figura 11A). As amostragens representativas para a estação de chuva foram realizadas de 14 a 15 de março/2017, com precipitação acumulada de 88,2 mm e na quinzena anterior aos dias da aquisição de dados choveu 174,50 mm (Figura 11B).

Durante o segundo semestre de 2017 (período mais seco) representado por agosto-setembro-outubro-novembro, quando somados, mostram menos de 7 mm de precipitação acumulada, com os quatro meses abaixo da média histórica. As precipitações pluviométricas mensais registradas para a estação de fim da chuva realizadas em julho e agosto/2017, foram de 201,40 e 4,80 mm, respectivamente (Figura 11A). Durante a quinzena anterior as coletas de julho e agosto, choveu cerca de 189,30 e 3,30 mm, respectivamente. A precipitação acumulada nos dias de aquisição dos dados foi de 73,2 mm (julho) e 62,9 mm (agosto) (Figura 11B).

Em relação ao comportamento dos ventos, os dados do INMET de 1973 a 2017 mostram que a época de mais ventos no ano dura cinco meses, de agosto a janeiro, com velocidades médias acima de $2,0 \text{ m s}^{-1}$ e de março a julho os ventos diminuem, com média de $1,0 \text{ m s}^{-1}$ (Figura 12). O ano de 2017 mostrou que os meses de março ($1,21 \text{ m s}^{-1}$), julho ($1,18 \text{ m s}^{-1}$) e agosto ($2,21 \text{ m s}^{-1}$), apresentaram percentuais de 28,29%, 34,88% e 9,51%, respectivamente, todos abaixo da média histórica de ventos (Figura 12).

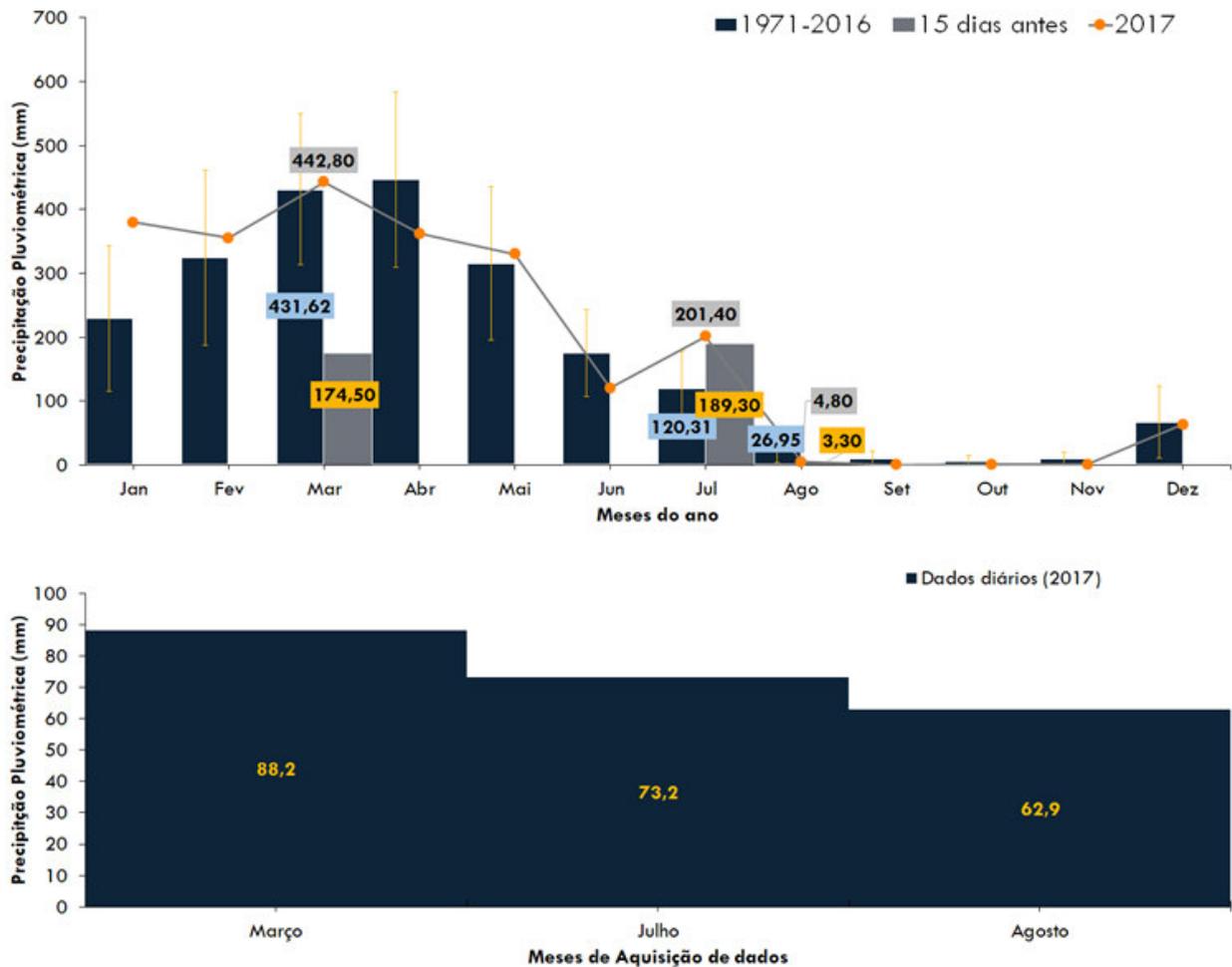


Figura 11. (A) As barras em azul mostram os valores de precipitações médias históricas para São Luís entre os anos de 1971 a 2016; a linha representa as precipitações para o ano de coleta, 2017 e as barras em cinza mostram a precipitação referente há 15 dias antes da aquisição dos dados. (B) Dados somados de precipitação pluviométrica (mm) para os dias de aquisição dos dados (2017) (INMET, 2017).

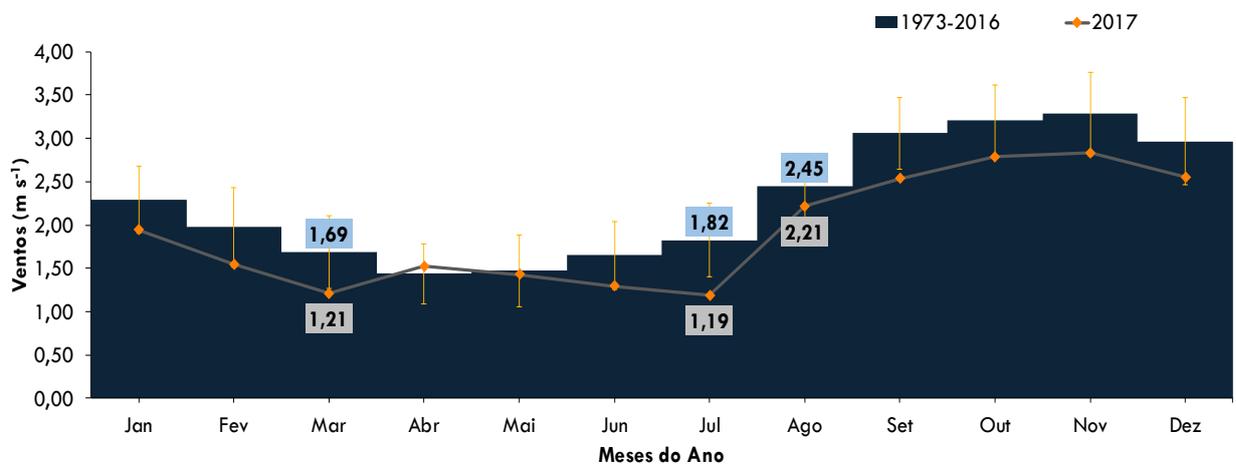


Figura 12. Média histórica das velocidades dos ventos (m s^{-1}), registrados entre os anos de 1973 e 2016 e para os meses de coleta do ano de 2017. As medições dos dados de vento nas estações do INMET são feitas a 10 metros de altura.

6.2 ESTRUTURA TERMOHALINA, OD E MPS

A Tabela 2 mostra os valores mínimos, máximos e as médias das variáveis de estado, OD e MPS obtidos em diferentes profundidades em maré enchente e vazante, durante a estação chuvosa do ano de 2017 sob condições de maré de sizígia.

6.2.1 ESTAÇÃO DE CHUVA

6.2.1.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL

Tabela 2. Variação da Salinidade, Temperatura, Oxigênio Dissolvido (OD) e Material Particulado em Suspensão (MPS) durante a estação de chuva. Sendo: Mín. corresponde aos valores mínimos; Máx. aos valores máximos; média aos valores médios e Desv. P ao desvio padrão.

		ESTAÇÃO DE CHUVA				
		MARÉ	ENCHENTE		VAZANTE	
		PROFUND.	SUPERFÍCIE	FUNDO	SUPERFÍCIE	FUNDO
SALINIDADE (g kg ⁻¹)	MÍN.		27,13	27,78	27,69	26,15
	MÁX.		31,47	31,48	31,69	31,71
	MÉDIA		29,36	29,60	29,94	30,11
	DESV. P		1,31	1,19	1,01	1,32
			MARÉ	ENCHENTE		VAZANTE
TEMPERATURA (°C)		PROFUND.	SUPERFÍCIE	FUNDO	SUPERFÍCIE	FUNDO
	MÍN.		28,02	28,01	28,82	28,85
	MÁX.		29,22	29,14	29,95	29,10
	MÉDIA		28,98	28,99	29,95	30,12
	DESV. P		0,22	0,21	0,28	1,28
OD (μmol kg ⁻¹)		MARÉ	ENCHENTE		VAZANTE	
		PROFUND.	SUPERFÍCIE	FUNDO	SUPERFÍCIE	FUNDO
	MÍN.		200,62	197,57	199,09	198,79
	MÁX.		223,49	206,72	209,16	224,70
	MÉDIA		205,58	200,59	205,46	200,24
		DESV. P	2,68	1,78	1,68	4,36
MPS (mg L ⁻¹)		MARÉ	ENCHENTE		VAZANTE	
		PROFUND.	SUPERFÍCIE	FUNDO	SUPERFÍCIE	FUNDO
	MÍN.		92,60	67,00	13,30	76,60
	MÁX.		546,75	556,20	264,70	421,70
	MÉDIA		167,76	290,70	147,69	244,26
		DESV. P	72,48	116,56	56,71	109,41

A distribuição da salinidade ao largo do CPSL durante a estação de chuva, apresentou pouca variação entre marés quanto aos valores médios, porém na maré vazante ($u < 0$) as concentrações de salinidade foram maiores, com média de 29,94 g kg⁻¹ e 30,11 g kg⁻¹ na superfície e junto ao fundo, respectivamente. Houve uma variação perceptível em relação ao comportamento da salinidade entre a superfície e o fundo na coluna d'água, em ambas as marés. Durante a enchente ($u < 0$), os mínimo e máximos de salinidade encontrados em superfície foram de 27,13 g kg⁻¹ (radial 4) e 31,47 g kg⁻¹ (radial 1), respectivamente (Figura 13A), mostrando um gradiente de 0,57 g kg⁻¹.km⁻¹, levando em consideração que a distância entre as radiais é de ~2,5 km. Junto ao fundo em maré enchente, a salinidade foi um pouco maior, com mínima de 27,78 g kg⁻¹ (radial 5) e

máxima de $31,48 \text{ g kg}^{-1}$ (radial 1) (Figura 13C), com um gradiente de $0,37 \text{ g kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Na maré vazante, a salinidade em superfície variou entre $27,69$ e $31,69 \text{ g kg}^{-1}$ nas radiais 2 e 1 respectivamente (Figura 13B), demonstrando um gradiente de $1,6 \text{ g kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Na camada de fundo o gradiente de salinidade foi menor, com $0,7 \text{ g kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, variando entre $26,15$ (radial 4) a $31,71 \text{ g kg}^{-1}$ (radial 1) (Figura 13D).

Observando o comportamento horizontal de salinidade durante a estação chuvosa, os menores valores de todo estudo foram encontrados nas radiais 4 e 5, que compreendem a porção mais interna do estuário, que recebem maior influência da drenagem continental e quanto aos maiores valores, da ordem de 31 g kg^{-1} , estes foram encontrados nas radiais 1 e 2, que estão localizadas na porção mais inferior do CESM e conseqüentemente recebem maior influência de águas oriundas do oceano adjacente.

Quanto as variações na estrutura térmica da coluna d'água durante a estação de chuva, nota-se que os valores de temperatura foram praticamente homogêneos em ambas as marés, cuja amplitude foi de $1,2^\circ\text{C}$ na superfície, variando entre $28,02^\circ\text{C}$ (radial 4) a $29,22^\circ\text{C}$ (radial 2) em maré enchente (Figura 14A) e junto ao fundo apresentou amplitude de $1,13^\circ\text{C}$, com valor mínimo de $28,01^\circ\text{C}$ (radial 2) e máximo de $29,14^\circ\text{C}$ (radial 3) (Figura 14C). Em maré vazante, as temperaturas superficiais e de fundo se mostraram mais elevadas, com amplitudes térmicas de $1,13^\circ\text{C}$ e 1°C , variando entre $28,82^\circ\text{C}$ (radial 1) a $29,95^\circ\text{C}$ (radial 2) e de $28,86^\circ\text{C}$ (radial 4) a $29,11^\circ\text{C}$ (radial 2), respectivamente (Figura 14B-D).

Considerando que o volume total de precipitação pluviométrica (dados INMET), para o período em questão, foi de $442,80 \text{ mm}$ durante o mês da coleta (sendo o mês mais chuvoso, com $2,59\%$ acima da média histórica para o mesmo mês), o gradiente de salinidade demonstrou uma variação mais expressiva em relação ao gradiente de temperatura. A estrutura termohalina ao longo da coluna d'água evidenciou uma baixa amplitude térmica com águas mais quentes e a influência marinha no ambiente em ambas as marés, com concentrações de salinidade características de águas salobras e salinas de acordo com a resolução CONAMA/257, mostrando um gradiente que aumenta em direção a radial 1 e diminuindo em direção a radial 5, no sentido continente-oceano (montante-jusante), com menores valores ocorrendo na parte mais interna do CESM.

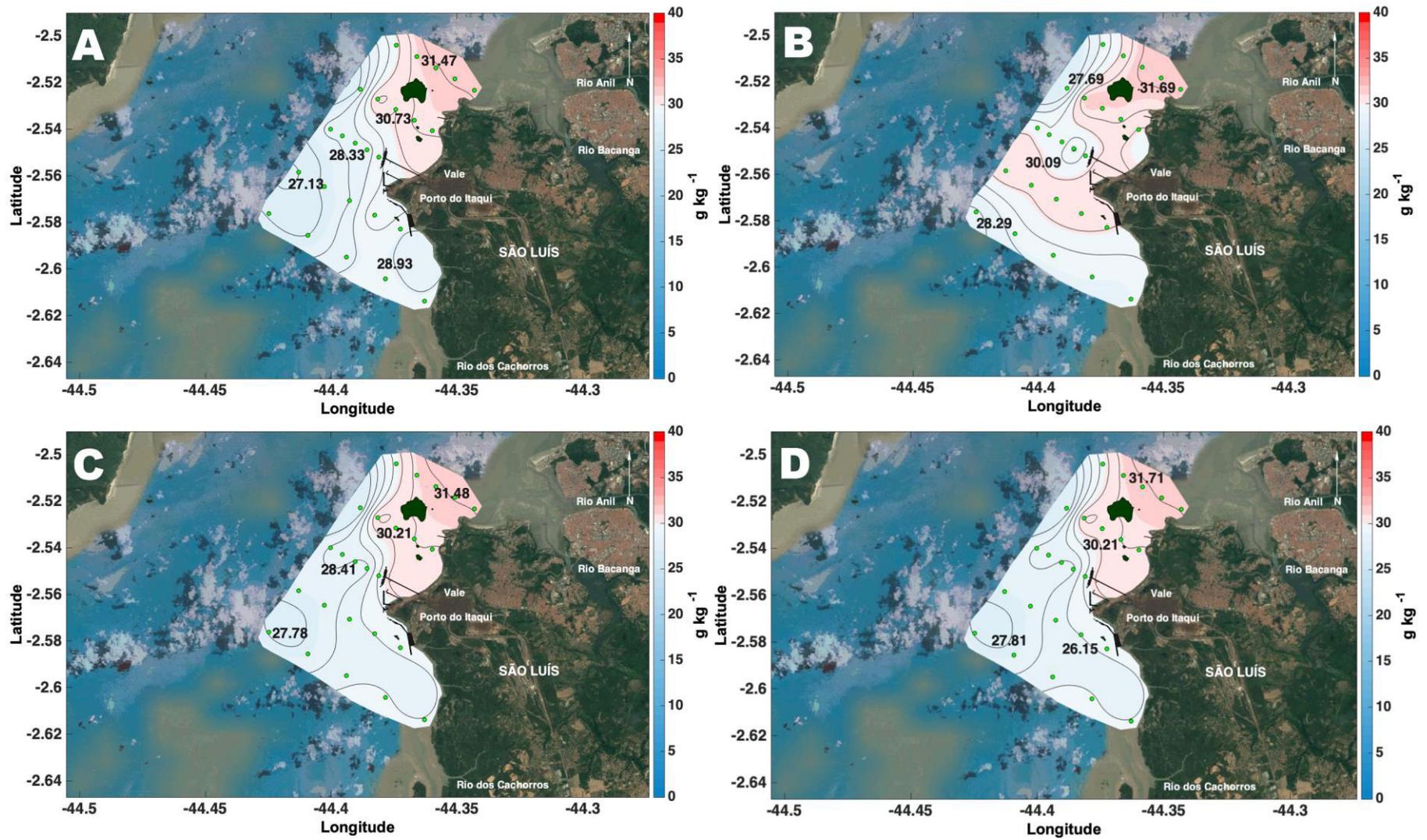


Figura 13. Gradiente horizontal dos valores de salinidade (g kg^{-1}) observados na superfície e no fundo da coluna de água no CPSL, durante a 1ª campanha, período chuvoso. Painel A: superfície na enchente; Painel B: superfície na vazante; Painel C: fundo na enchente e Painel D: fundo na vazante.

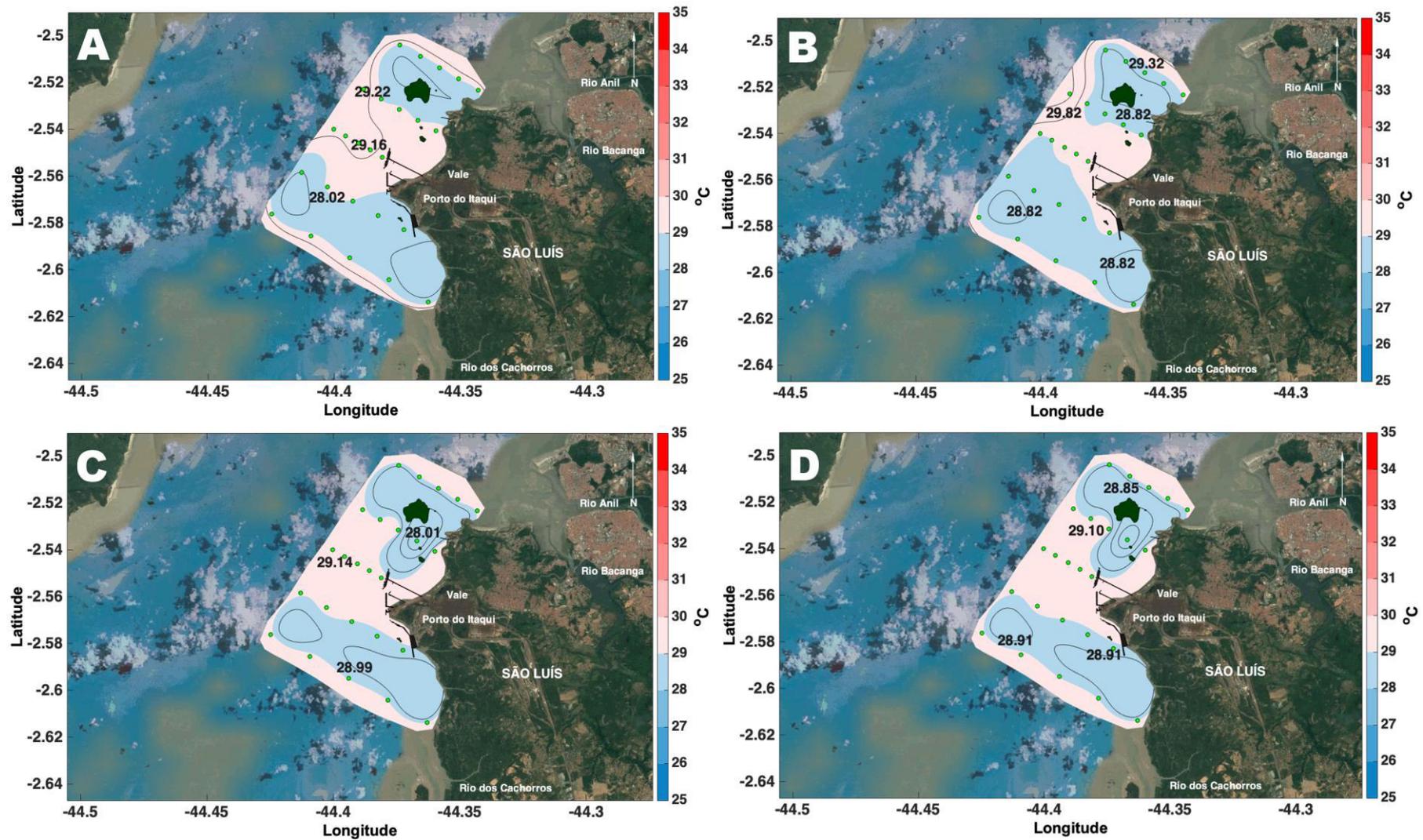


Figura 14. Gradiente horizontal dos valores de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) observados na superfície e no fundo da coluna de água no CPSL durante a 1^a campanha, período chuvoso. Painel A: superfície na enchente; Painel B: superfície na vazante; Painel C: fundo na enchente e Painel D: fundo na vazante.

Quanto a variação do Oxigênio Dissolvido (OD) na coluna d'água, os valores médios em superfície e fundo na maré enchente, foram de 205,55 e 200,59 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, respectivamente. Em maré enchente foram encontradas maiores concentrações na superfície, com valores variando entre 200,62 a 223,49 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ nas radiais 3 e 4, respectivamente (Figura 15A) e na camada de fundo variou entre 197,57 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ na radial 5 a 206,62 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ na radial 4 (Figura 15C). Em maré vazante, os valores obtidos na superfície foram de 199,09 a 209,16 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ nas radiais 3 e 5, com média de $205,46 \pm 1,68$ (Figura 15B) e de 149,40 a 224,70 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ junto ao fundo, nas radiais 2 e 5, com média de $200,24 \pm 4,36$ (Figura 15D). Foi observado que durante a estação chuvosa, os menores valores situaram-se junto ao fundo e os maiores em superfície nas duas marés. Os valores máximos de superfície e fundo em ambas as marés foram encontrados nas radiais 4 e 5 e esse mesmo comportamento corrobora com os dados de salinidade. Os valores de OD na estação chuvosa estiveram de acordo com as normas estabelecidas pela Resolução CONAMA (357/2005) para a preservação da vida aquática ($\text{OD} > 152,4 \mu\text{mol kg}^{-1}$), o que mostra um ambiente bastante dinâmico e que proporciona águas oxigenadas.

A distribuição horizontal do MPS apresentou concentrações elevadas durante o período chuvoso, em decorrência do maior aporte fluvial, fato que evidencia como os estuários são ambientes sensíveis. Durante maré enchente o MPS em superfície teve média de $167,76 \pm 104,30$ e variou entre 92,6 a 546,8 mg L^{-1} , nas radiais 2 e 5, respectivamente, diminuindo as concentrações no sentido continente-oceano (Figura 16A). No fundo, os valores variaram de 67,0 mg L^{-1} (radial 1) a 556,2 mg L^{-1} (radial 3), com média de $290,7 \pm 146,18$ (Figura 16C). Na maré vazante as concentrações de MPS foram menores, com média de $147,1 \pm 73,99$, variando de 13,30 a 264,70 mg L^{-1} nas radiais 4 e 5, respectivamente (Figura 16B). Na camada de fundo, apresentou mínima de 76,0 mg L^{-1} na radial 1 e máxima de 421,70 mg L^{-1} na radial 2, com média de $244,3 \pm 120,87$ (Figura 16D). Observou-se que as maiores médias nas concentrações de mps, foram encontradas junto ao fundo em ambas as marés, porém em maré enchente houve um aumento de 32% em relação a maré vazante.

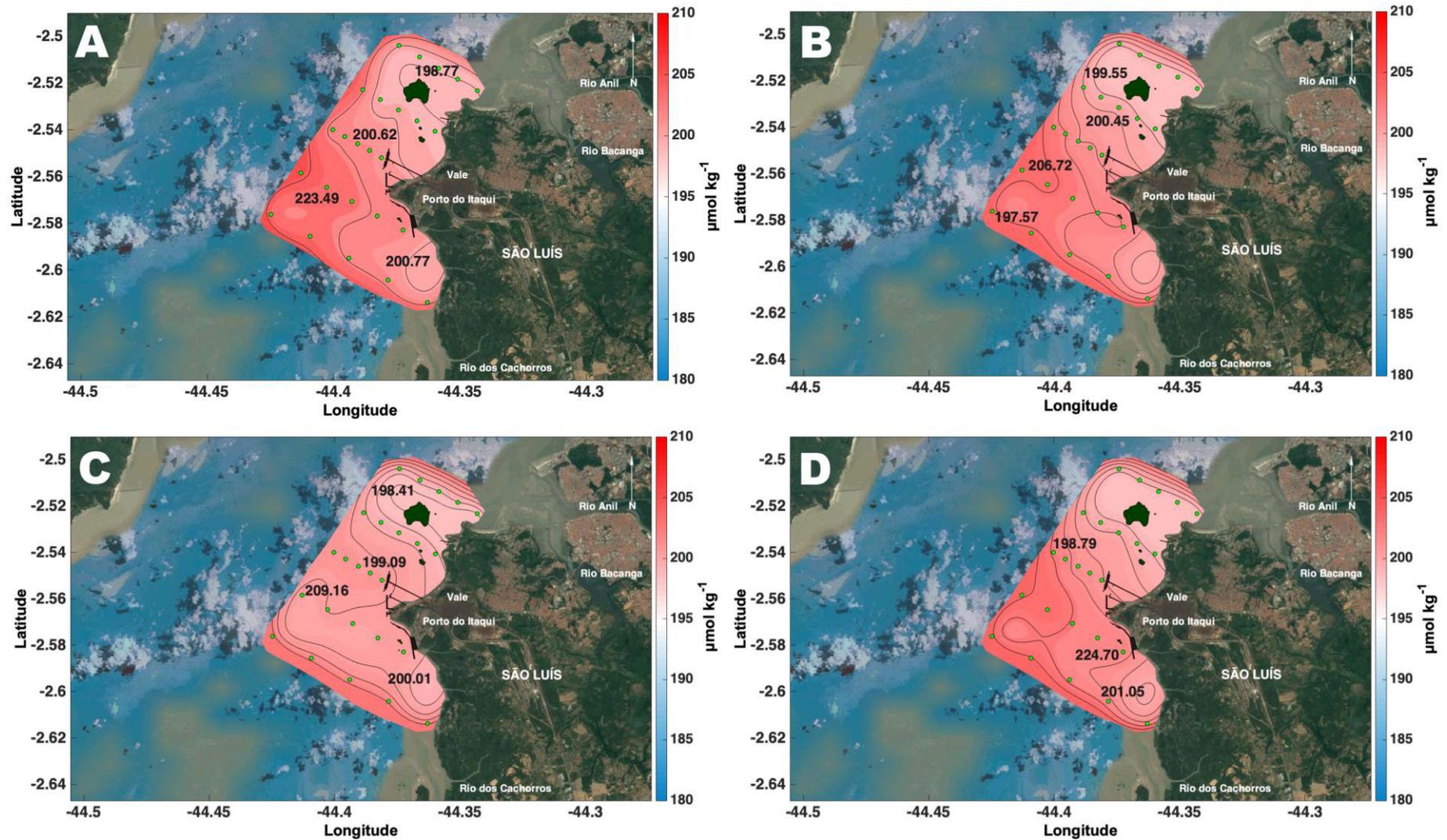


Figura 15. Gradiente horizontal dos valores de Oxigênio Dissolvido (OD) ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) observados na superfície e no fundo da coluna de água no CPSL durante a 1ª campanha, período chuvoso. Painel A: superfície na enchente; Painel B: superfície na vazante; Painel C: fundo na enchente e Painel D: fundo na vazante.

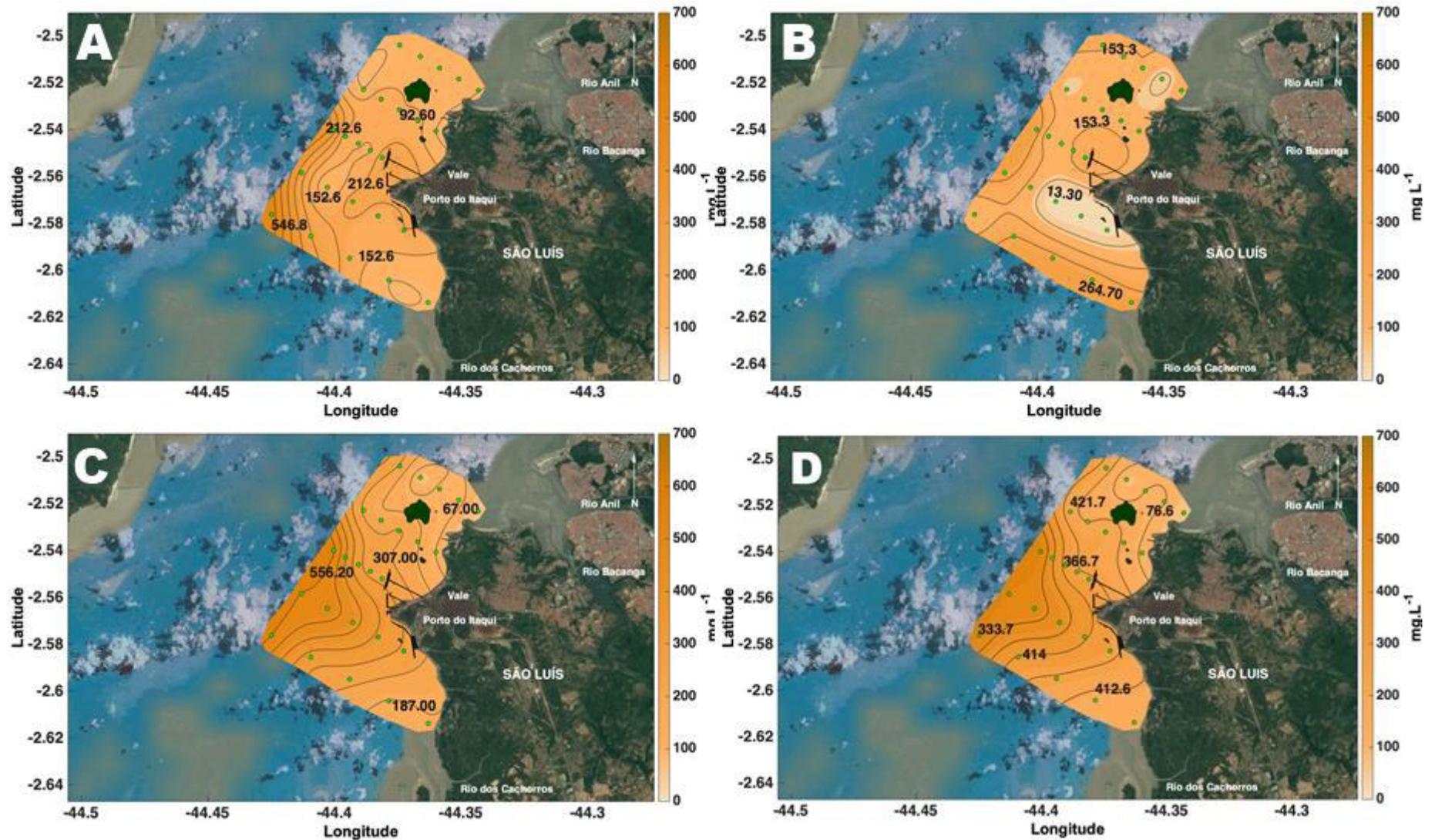


Figura 16. Gradiente horizontal dos valores de Material Particulado em Suspensão (MPS) (mg L^{-1}) observados na superfície e no fundo da coluna de água no CPSL durante a 1ª campanha, período chuvoso. Pannel A: superfície na enchente; Pannel B: superfície na vazante; Pannel C: fundo na enchente e Pannel D: fundo na vazante.

6.2.1.2 DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL

Durante o período de balanço hídrico positivo (estação de chuva), as estruturas verticais das propriedades hidrográficas: salinidade (g kg^{-1}), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Oxigênio Dissolvido ($\mu\text{mol kg}^{-1}$) e MPS (mg L^{-1}), são apresentadas na figura 17, que mostra a variação temporal das respectivas variáveis, em função da profundidade adimensional e do tempo (isopleias), durante um ciclo completo de maré de ~13 horas para o Fundeio I realizado na estação chuvosa, em condição de maré de sizígia.

A variação temporal da salinidade apresentou mínima de $29,81 \text{ g kg}^{-1}$ (hora 8), máxima de $31,63 \text{ g kg}^{-1}$ (hora 1) e média de $30,91 \text{ g kg}^{-1}$, com valores mais baixos em maré vazante e valores mais altos após a maré alta (Figura 17A). O perfil médio no tempo da salinidade ($\langle S(Z) \rangle$) exibe uma estratificação vertical na coluna d'água praticamente inexistente (0,1), com o aumento da salinidade em direção ao fundo (Figura 18A), apresentando um valor médio estacionário de (S_a) $30,8 \text{ g kg}^{-1}$.

As variações temporais de temperatura na coluna d'água ocorreram em estreitos intervalos, apresentando características perto de uma homogeneidade vertical, logo a variação entre marés foi muito pequena, com amplitude menor que 1°C . Os valores de temperatura indicaram a influência das águas costeiras/continentais ou misturas de águas (28°C), variando no intervalo de $28,79$ - $29,17^{\circ}\text{C}$, onde a temperatura mínima ocorreu na hora 1 e próximo ao fundo e a máxima ocorreu durante a hora 10, na superfície da coluna d'água, ambas durante a enchente (Figura 17B). Essa relação dos mínimos e máximo da temperatura com a maré alta e baixa, indica a influência de fluxos fluviais e intrusão de águas mais salinas do oceano, respectivamente. Calculando o valor médio estacionário da temperatura da água (T_a) para o ciclo de 13 horas do Fundeio I, pode-se observar o valor de $28,9^{\circ}\text{C}$ (Figura 18B).

O comportamento das concentrações de Oxigênio Dissolvido durante o Fundeio I, mantiveram-se elevadas apresentando uma média de $202,57 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ao longo das treze horas, com mínimo e máximo de $195,78$ e $209,09 \mu\text{mol kg}^{-1}$, respectivamente, sem mudanças bruscas ao longo do ciclo (Figura 17C). As menores concentrações de OD ocorreram logo após a baixamar, destacando-se o menor valor durante a hora nove e junto ao fundo. As maiores concentrações foram durante o momento da preamar, com valor máximo durante a hora 12, em superfície.

Analisando a distribuição vertical do MPS durante o Fundeio I, pode-se observar que o perfil temporal variou entre $42,2$ a $227,38 \text{ mg L}^{-1}$ e apresentou média de $134,95 \text{ mg L}^{-1}$ (Figura 17D). A menor concentração de MPS ocorreu em superfície na hora dois e a maior concentração foi encontrada junto ao fundo e durante o momento da passagem da baixar para enchente, na hora oito. Esse comportamento se deve provavelmente à remobilização dos materiais particulados depositados pelas correntes de fundo.

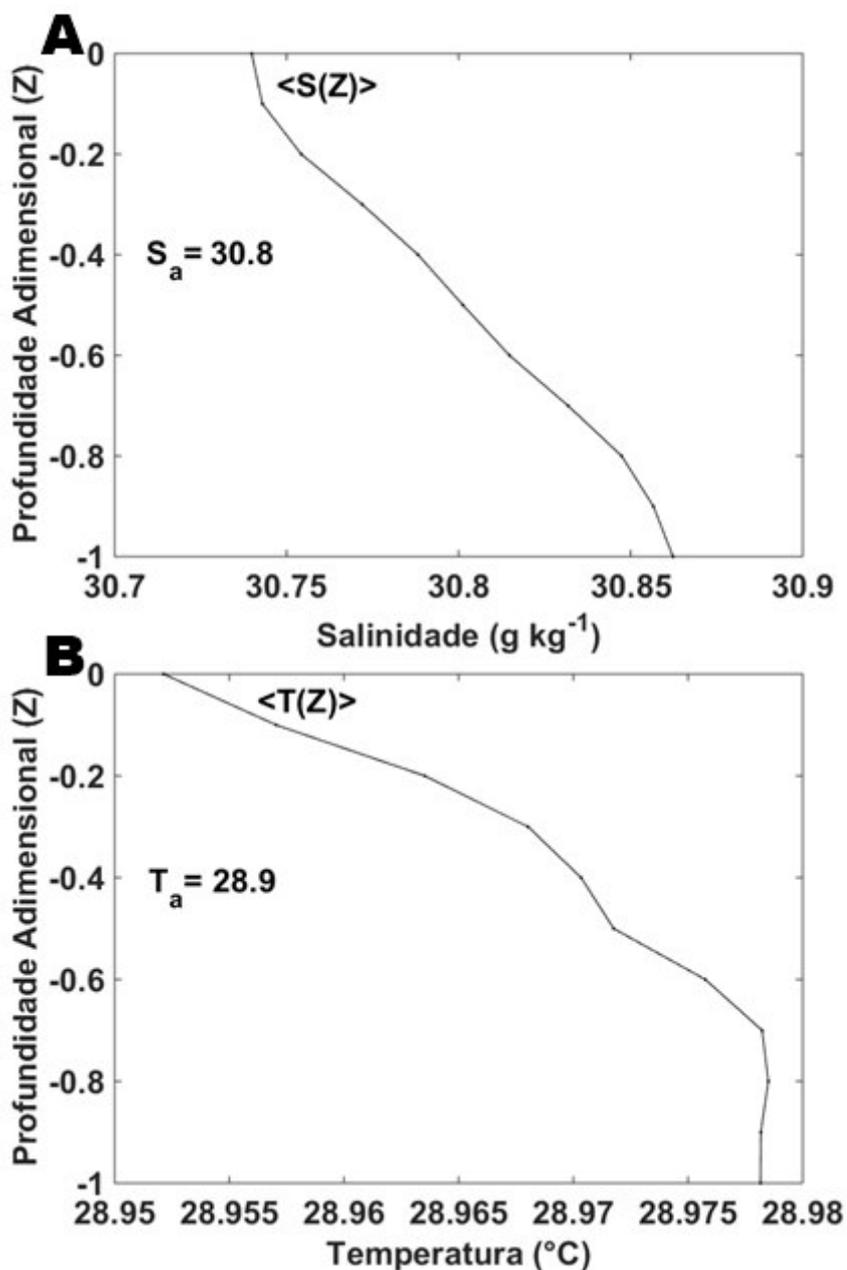


Figura 18. (A): Perfil médio da Salinidade (g kg^{-1}) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13 horas) para o Fundeio I durante a estação chuvosa. $\langle S(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da salinidade. (B): Perfil médio da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna (13 horas), para o Fundeio I durante a estação de chuva. $\langle T(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da temperatura.

6.2.2 ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA

6.2.2.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL

Os valores mínimos, máximos e médias das variáveis de estado, Oxigênio Dissolvido e MPS nas profundidades superfície e fundo, durante a estação de fim da chuva, sob maré de quadratura e em maré enchente e vazante, estão dispostos na tabela 3.

Tabela 3. Variação da Salinidade, Temperatura, Oxigênio Dissolvido (OD) e Material Particulado em Suspensão (MPS) durante a estação de fim da chuva. Mín. corresponde aos valores mínimos; Máx. valores máximos; Média aos valores médios e Desv. P ao desvio padrão.

		ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA				
		MARÉ	ENCHENTE		VAZANTE	
		PROFUND.	SUPERFÍCIE	FUNDO	SUPERFÍCIE	FUNDO
SALINIDADE (g kg ⁻¹)	MÍN.		23,85	23,83	22,35	25,19
	MÁX.		26,97	27,22	27,96	27,98
	MÉDIA		25,75	27,04	26,24	27,04
	DESV. P		0,83	0,96	1,52	0,96
		MARÉ	ENCHENTE		VAZANTE	
		PROFUND.	SUPERFÍCIE	FUNDO	SUPERFÍCIE	FUNDO
TEMPERATURA (°C)	MÍN.		29,27	29,29	29,45	29,51
	MÁX.		30,14	29,76	29,98	29,70
	MÉDIA		29,67	29,58	29,65	29,57
	DESV. P		0,23	0,11	0,12	0,05
		MARÉ	ENCHENTE		VAZANTE	
		PROFUND.	SUPERFÍCIE	FUNDO	SUPERFÍCIE	FUNDO
OD (μmol kg ⁻¹)	MÍN.		198,18	195,44	202,45	201,53
	MÁX.		218,91	210,07	217,39	210,07
	MÉDIA		209,72	204,29	209,73	204,76
	DESV. P		4,51	2,65	3,48	2,41
		MARÉ	ENCHENTE		VAZANTE	
		PROFUND.	SUPERFÍCIE	FUNDO	SUPERFÍCIE	FUNDO
MPS (mg L ⁻¹)	MÍN.		20,67	78,00	24,60	88,00
	MÁX.		214,67	526,00	231,33	421,67
	MÉDIA		106,24	198,79	105,01	202,08
	DESV. P		55,57	114,75	58,55	80,25

A distribuição da salinidade durante maré enchente na superfície e fundo, apresentou concentrações variando de 23,85 a 26,97 g kg⁻¹ (Figura 19A) e de 23,83 a 27,22 g kg⁻¹ (Figura 19C), respectivamente, com média de 25,75 ± 0,83 na superfície e 27,04 ± 0,96 no fundo. Nas duas marés os menores valores de superfície e fundo foram encontrados na radial 5, ambos no ponto 25 e os maiores valores na radial 3 (próximo ao contorno sólido, em frente ao píer IV), mostrando um aumento da salinidade no sentido continente-oceano. Em relação ao comportamento da salinidade na coluna d'água, o gradiente horizontal na superfície foi de 0,62 g kg⁻¹.km⁻¹ e junto ao fundo o gradiente foi de 0,67 g kg⁻¹.km⁻¹, entre as radiais 3 e 5.

Foi possível observar que em maré vazante a estrutura salina foi maior em relação a enchente, variando de 22,35 a 27,96 g kg⁻¹ na camada superficial, com média de 26,24 ± 1,52 (Figura 19B). A salinidade em superfície apresentou um gradiente de 2,24 g kg⁻¹.km⁻¹ (entre as radiais 3 e 4). Junto ao fundo a salinidade foi maior, variando entre 25,19 a 27,98 g kg⁻¹ (Figura 19D), com média de 27,04 ± 0,96 e gradiente salino de 0,55 g kg⁻¹.km⁻¹ (entre as radiais 2 e 4). Analisando a estrutura salina entre as duas campanhas amostrais, foi possível observar que em sua maioria, os gradientes foram maiores na estação de fim da chuva e as concentrações de salinidade

(período de menor descarga fluvial) foram menores em relação a estação de chuva, com redução de 12,30% e 8,65% em relação aos valores médios de superfície e fundo na enchente, respectivamente e redução de 12,36% e 10,20% em relação aos valores médios de superfície e fundo na vazante. A variabilidade da estrutura salina (22,35 - 27,98 g kg⁻¹) na estação de fim da chuva, mostra uma importante contribuição fluvial neste período do ano para o estuário, com características de águas salobras de acordo com a resolução CONAMA/557, visto que as águas oriundas da drenagem continental são menos salinas do que as águas do oceano adjacente, mesmo diante dos dados de precipitação pluviométrica, que foi de apenas 4,80 mm para o mês de aquisição dos dados.

Quanto a estrutura térmica espacial, as águas estuarinas do CESM apresentaram uma variação bem discreta na coluna d'água durante a estação de fim da chuva, com valores em torno de 29 °C. Mesmo com pouca variação, a temperatura da água foi maior em relação aos valores da estação de chuva. Em maré enchente, a média na superfície foi de 29,67 ± 0,23, variando entre 29,26 a 30,13 °C (Figura 20A). Junto ao fundo a média foi de 29,58 ± 0,11, com amplitude menor que 1°C (29,29-29,76°C) (Figura 20C). Em maré vazante, a temperatura superficial apresentou média de 29,65 ± 0,12, variando de 29,45 a 29,98 g kg⁻¹ (Figura 20B) e junto ao fundo variou entre 29,51-29,70 g kg⁻¹, com média de 29,57 ± 0,05, ambas as profundidades com amplitude menor que 1°C (Figura 20D). Durante os dois períodos sazonais, pode-se observar valores de amplitude térmica próximos de zero, indicando uma homogeneidade vertical e horizontal ao longo da coluna d'água do CESM, porém durante a estação de fim da chuva observamos um acréscimo das temperaturas, com águas mais quentes (>29°C) associadas a águas menos salinas (<30 g kg⁻¹).

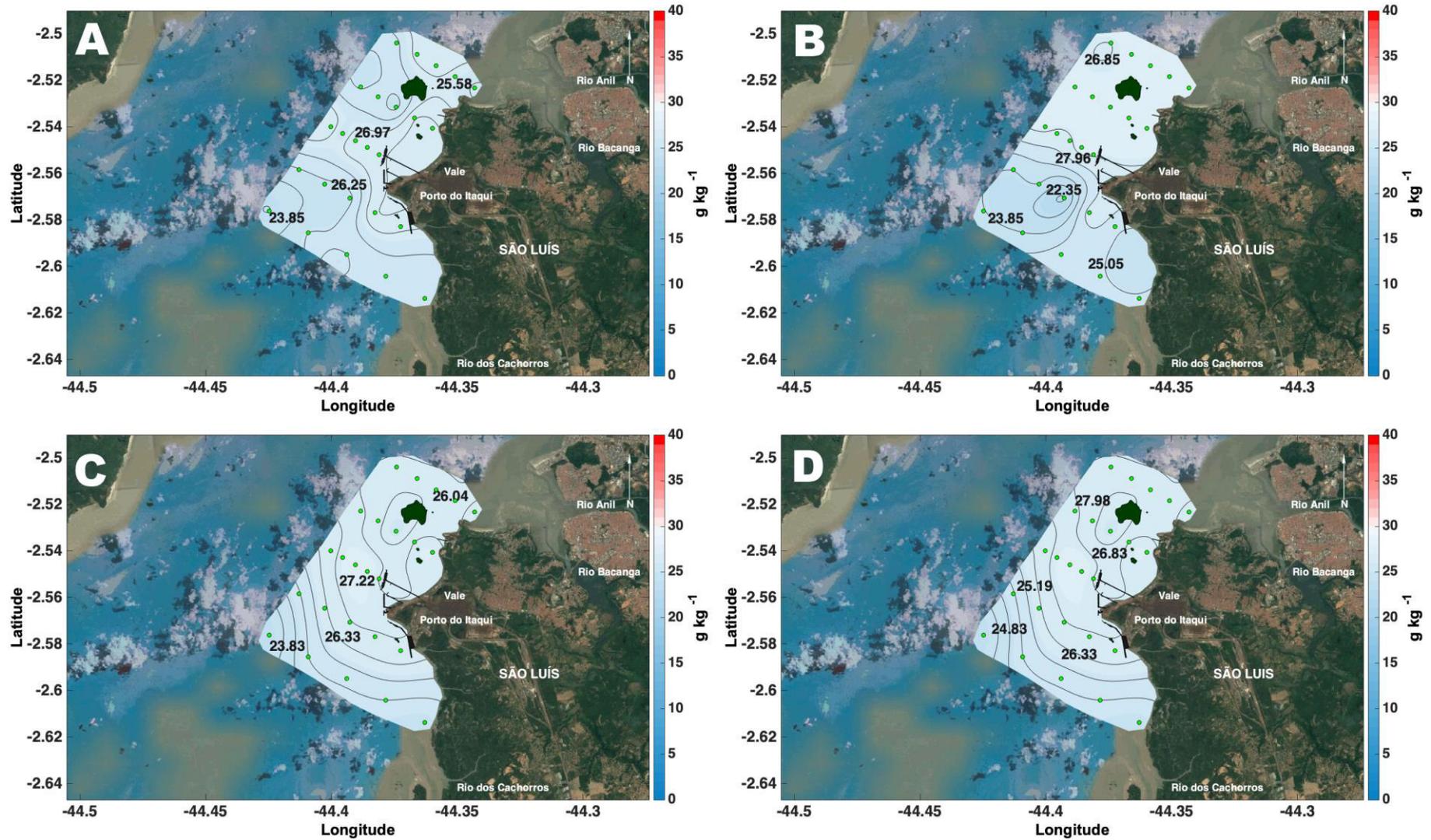


Figura 19. Gradiente horizontal dos valores de salinidade (g kg^{-1}), observados na superfície e no fundo da coluna de água no CPSL durante a 2ª campanha, final do período chuvoso. Painel A: superfície na enchente; Painel B: superfície na vazante; Painel C: fundo na enchente e Painel D: fundo na vazante.

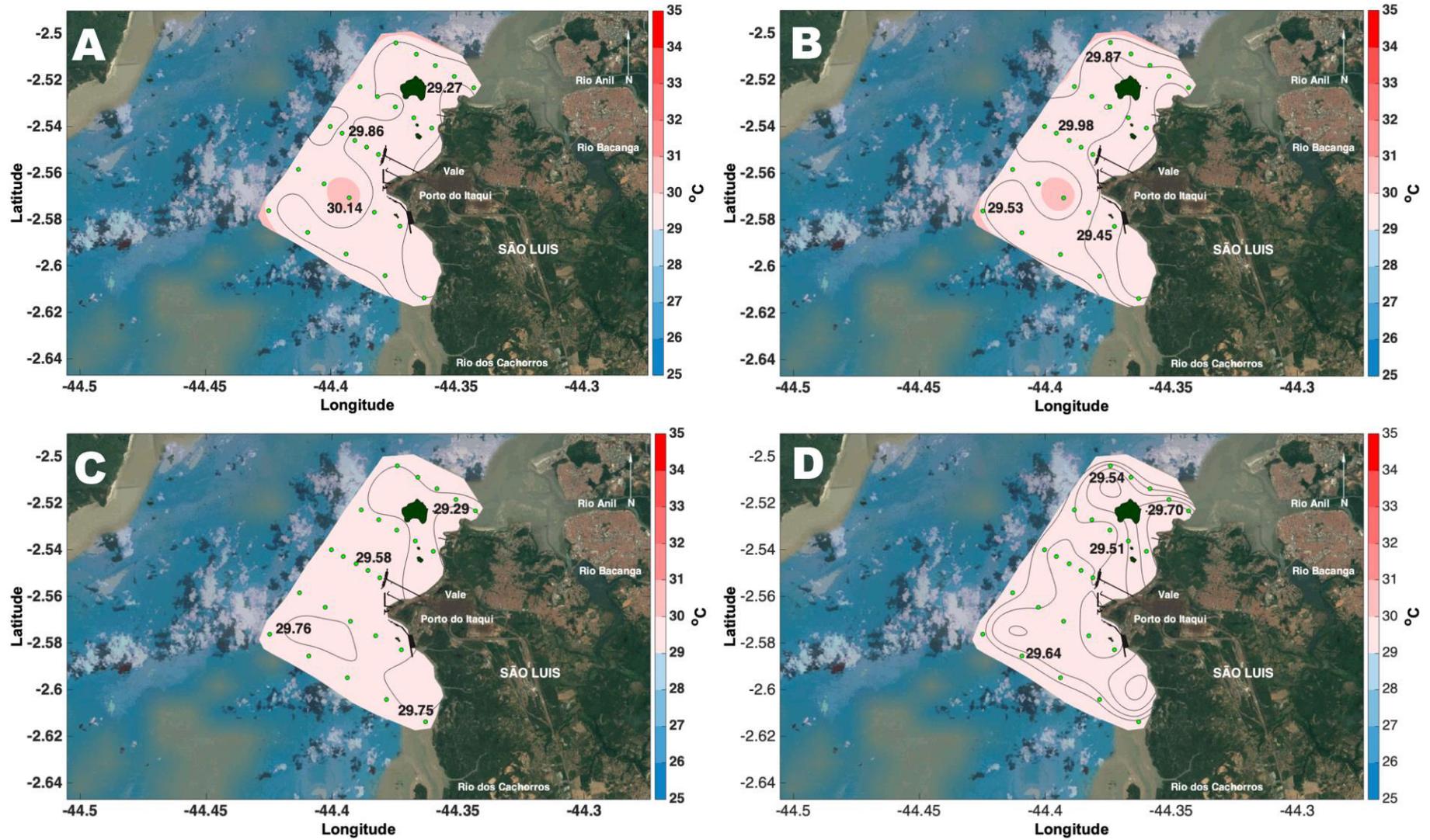


Figura 20. Gradiente horizontal dos valores de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), observados na superfície e no fundo da coluna de água no CPSL durante a 2^a campanha, final do período chuvoso. Painel A: superfície na enchente; Painel B: superfície na vazante; Painel C: fundo na enchente e Painel D: fundo na vazante.

Os teores de oxigênio dissolvido indicaram águas bem oxigenadas, um cenário estabelecido em função da entrada de águas marinhas, provenientes do oceano adjacente a área de estudo. Em maré enchente o valor médio na camada superficial foi de $209,72 \pm 4,51$, variando entre 198,18 a 218,91 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ na radial 1 e 3, respectivamente (Figura 21A). As concentrações junto fundas variaram de 195,44 (radial 1) a 210,07 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ (radial 5) (Figura 21C), com média de $204,29 \pm 2,65$. Na maré vazante variou entre 202,45 a 217,39 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ (Figura 21B), com média de $209,73 \pm 3,48$ e junto ao fundo o valor médio foi de $204,78 \pm 2,41$, variando entre 201,53 e 210,07 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, nas duas profundidades as concentrações mínimas na radial 1 e máximas na radial 5 (Figura 21D). Essas concentrações caracterizam esse ambiente como bem oxigenado, provavelmente indicando uma maior interação entre o fluido e a atmosfera, com maiores valores na superfície em ambas as marés. Analisando o comportamento do OD entre os dois períodos sazonais, pode-se observar que os valores médios foram semelhantes, porém mais altos durante a estação de fim da chuva, mesmo que de forma discreta, com percentual de 2% acima.

As concentrações de MPS ao longo das radiais, apresentaram valores altos que variaram entre 20,67 a 214,67 mg L^{-1} (Figura 22A), com média de $106,24 \pm 55,57$ na superfície. Enquanto que junto ao fundo as concentrações observadas de MPS, foram maiores, variando de 78,00 a 526,00 mg L^{-1} , com média de $198,79 \pm 114,75$ (Figura 22C). Em maré vazante, o MPS oscilou entre 24,60 a 231,33 mg L^{-1} e média de $105,01 \pm 58,55$ (Figura 22B), no fundo variou entre 88,00 a 421,67 mg L^{-1} , com média de $202,08 \pm 80,25$ (Figura 22D). Quanto a distribuição do MPS, as maiores concentrações na coluna d'água ocorreram durante a estação de chuva, com aumento de 58% na superfície e 46% no fundo em maré enchente e na vazante de 41% e 21% na superfície e fundo, respectivamente, em relação a estação de fim da chuva.

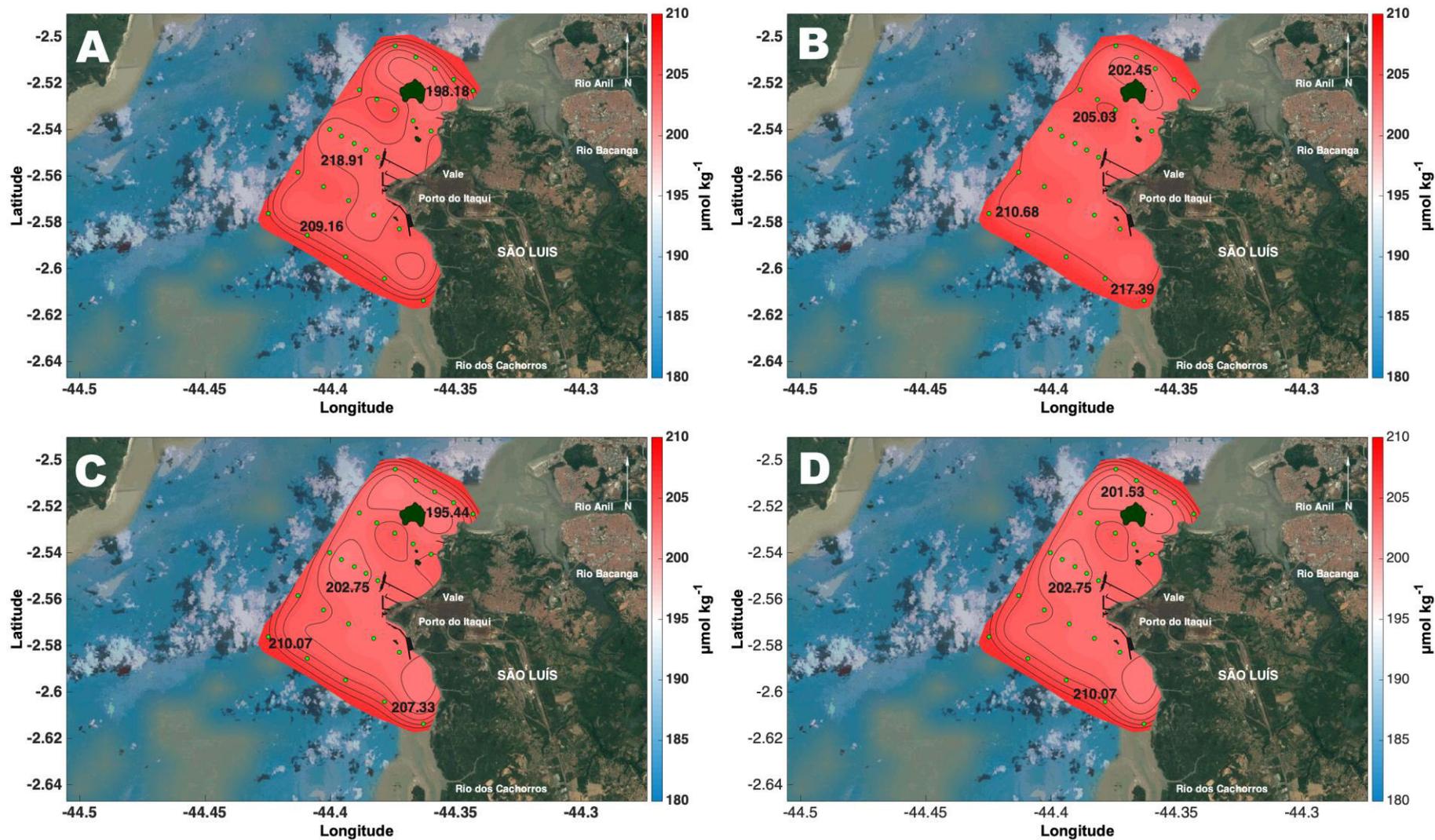


Figura 21. Gradiente horizontal dos valores de Oxigênio Dissolvido (OD) ($\mu\text{mol kg}^{-1}$), observados na superfície e no fundo da coluna de água no CPSL durante a 2ª campanha, final do período chuvoso. Painel A: superfície na enchente; Painel B: superfície na vazante; Painel C: fundo na enchente e Painel D: fundo na vazante.

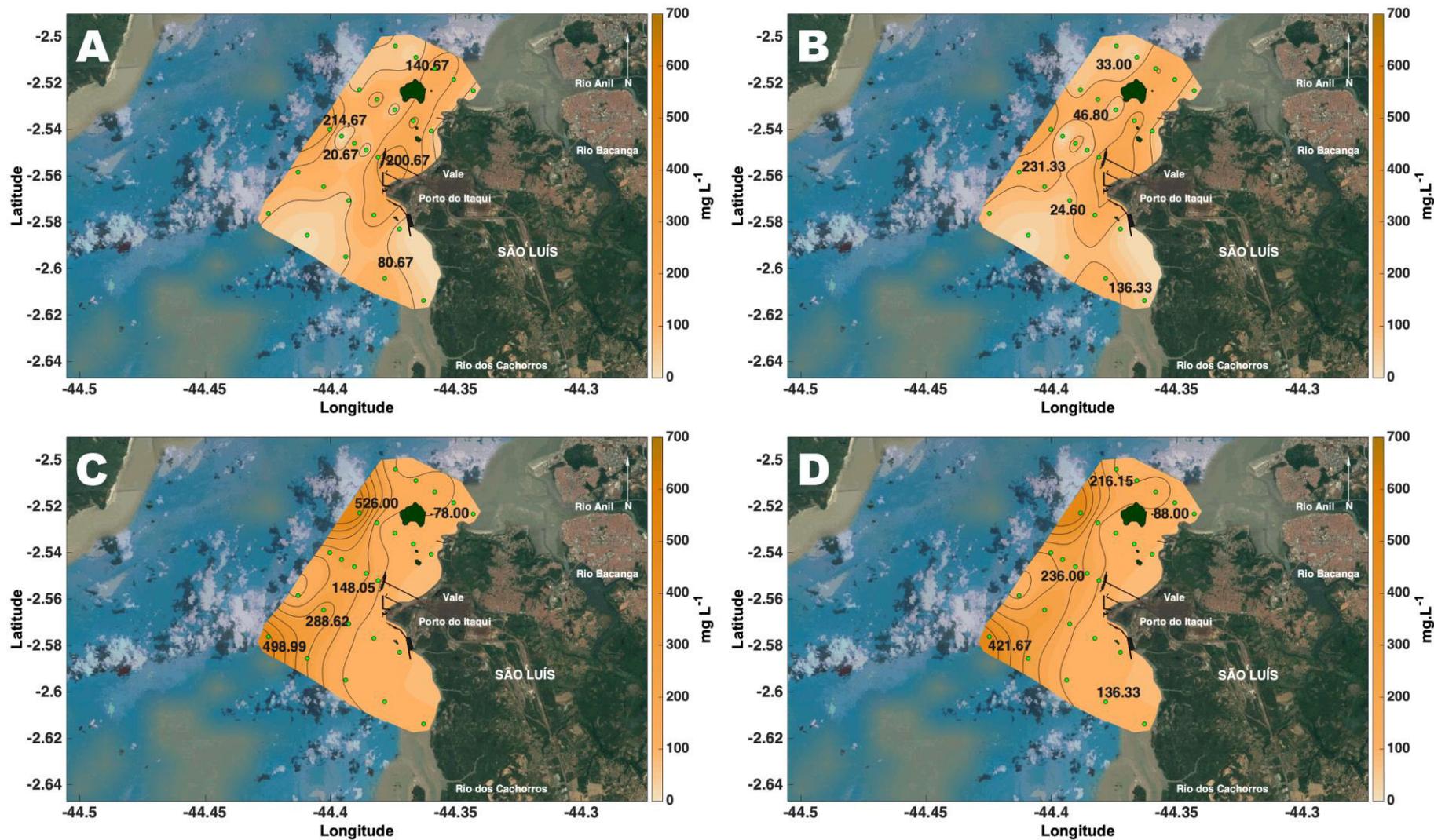


Figura 22. Gradiente horizontal dos valores de Material Particulado em Suspensão (MPS) (mg L^{-1}), observados na superfície e no fundo da coluna de água no CPSL durante a 2ª campanha, final do período chuvoso. Painel A: superfície na enchente; Painel B: superfície na vazante; Painel C: fundo na enchente e Painel D: fundo na vazante.

6.2.2.2 DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL

Durante o perfil temporal do Fundeio II, realizado na estação de fim da chuva (04 e 05 julho/2017), a salinidade foi menor em relação ao Fundeio I realizado na estação de chuva, apresentando características típicas de água estuarina, que provavelmente indicam uma influência mais acentuada da bacia de drenagem, com uma variação de quase $3,0 \text{ g kg}^{-1}$ ao longo de todo ciclo de maré do estudo, podendo-se observar salinidade mínima de $24,07 \text{ g kg}^{-1}$ (na hora 1), durante o final da primeira maré baixa e máxima de $27,04 \text{ g kg}^{-1}$ (hora 20), mais especificamente no pico da maré alta e média de $25,82 \pm 0,56 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 23A). Quanto ao perfil médio temporal de salinidade (S_a), este exibiu estratificação vertical levemente maior que o Fundeio I, porém praticamente inexistente também, com valor médio de $25,8 \text{ g kg}^{-1}$, como mostra a figura 24A.

No Fundeio II a variação vertical da temperatura foi bem pequena, com amplitude menor que 1°C , variando entre $29,12$ a $29,62 \text{ }^\circ\text{C}$, ambas mensuradas na superfície nas horas 7 e 20, respectivamente (Figura 23B). Durante todo ciclo de maré as isolinhas verticais predominaram, mostrando uma homogeneidade na área de estudo. O valor médio da temperatura (T_a) foi de $29,4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 24B). Os respectivos perfis temporais de salinidade e temperatura do Fundeio II, corroboram com os perfis espaciais já apresentados, mostrando a mínima variação térmica e salina ao longo da área de estudo do CPSL.

Assim como no período chuvoso, as concentrações de Oxigênio Dissolvido também se mantiveram elevadas durante o Fundeio II, com média de $203,66 \pm 1,65 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$ e apresentaram concentração mínima de $200,32 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$, valor que se repetiu nas horas 10 e 11, próximo ao fundo, duas horas após a maré alta e máxima de $212,11 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$, na última hora do ciclo de maré, situado na camada superficial da coluna d'água (Figura 23C). Pode-se observar uma relação diretamente proporcional das concentrações de oxigênio dissolvido e a variação da maré, além de um gradiente vertical, com menores valores no fundo em maré vazante e apresentando o máximo valor na superfície, no final da maré vazante. Os valores de OD durante os dois fundeios estiveram dentro da faixa estabelecida pela RESOLUÇÃO CONAMA 357/05, que estabelece a concentração de $5,0 \text{ mg L}^{-1}$, equivalente a $152,4 \text{ } \mu\text{mol kg}^{-1}$ para a preservação da vida aquática.

Analisando as concentrações de MPS no perfil Euleriano, observa-se que para o Fundeio II, os valores foram maiores em relação ao Fundeio I e mesmo ao longo de um ciclo de maré de 26 horas, as concentrações mantiveram-se altas, com média de $212,63 \pm 59,62 \text{ mg L}^{-1}$, mostrando uma variação entre $63,2 \text{ mg L}^{-1}$, na camada superficial, durante a hora 14, uma hora após a maré baixa e os maiores valores estiveram associados junto ao fundo, com máxima de $408,8 \text{ mg L}^{-1}$, durante a hora 11, 4 horas após a primeira maré alta. (Figura 23D).

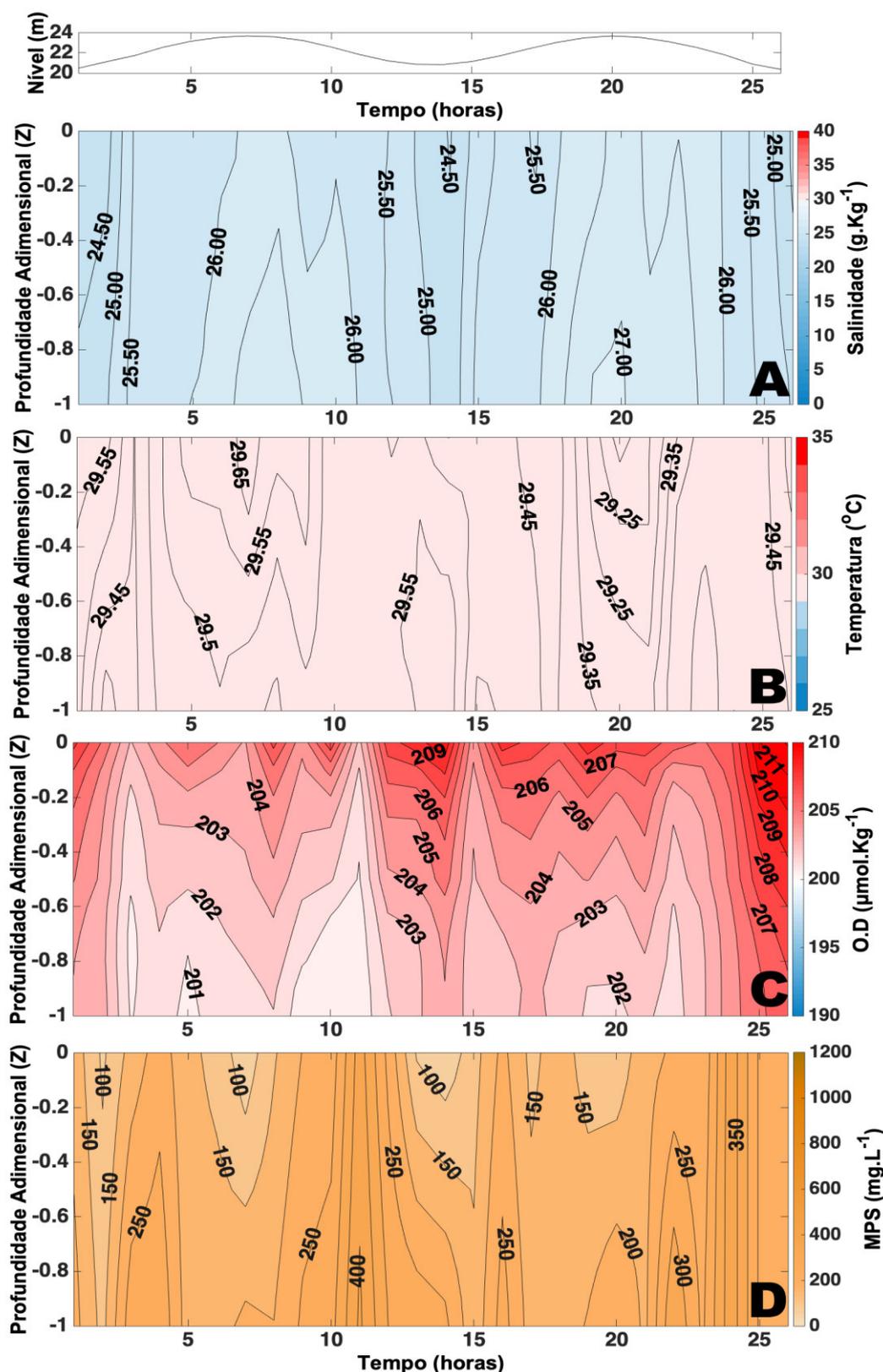


Figura 23. Estrutura vertical e temporal de Salinidade (A), Temperatura (B), Oxigênio Dissolvido (OD) (C) e Material Particulado em Suspensão (MPS) (D), em função da profundidade adimensional Z e do tempo (horas) para o Fundeio – II de 26 horas, realizado no final do período chuvoso, localizada ao lado Ilha do Medo, em 04 e 05/07/2017, em condição de maré de quadratura.

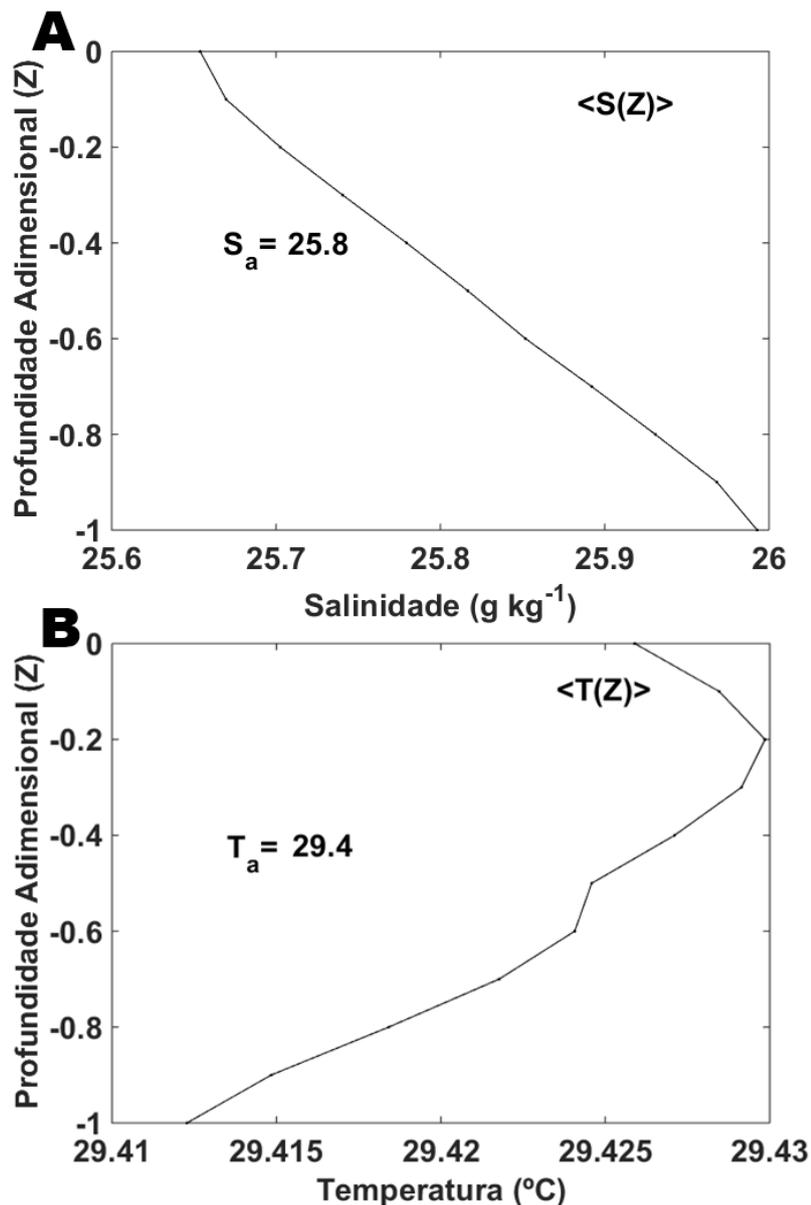


Figura 24. (A): Perfil médio da Salinidade ($g\ kg^{-1}$) ao longo de dois ciclos completos de maré semidiurna (26 horas) para o Fundeio II durante a estação de fim da chuva $\langle S(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da salinidade. (B): Perfil médio da Temperatura ($^{\circ}C$) ao longo de dois ciclos completos de maré semidiurna (26 horas), para o Fundeio II durante a estação de fim da chuva $\langle T(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da temperatura.

A variação horária do nível da superfície livre [$h(t)$] (maré dinâmica) e a variação temporal da salinidade média [$s(t)$] na coluna d'água, durante a estação de chuva (Fundeio I) e fim da chuva (Fundeio II), apresentadas na figura 25(A-B), respectivamente, mostram que durante o Fundeio I a salinidade média apresentou valor mínimo de $\sim 30,2\ g\ kg^{-1}$ por volta da hora 8, com uma defasagem de ~ 3 horas entre o pico da maré baixa (hora 6) e a salinidade. O maior valor da

salinidade média observada foi de $\sim 31,5 \text{ g kg}^{-1}$, por volta da primeira hora do fundeio, com uma pequena defasagem entre o pico da maré alta e o pico de salinidade média (Figura 25A).

A salinidade média no Fundeio II apresentou mínima de $\sim 24,2 \text{ g kg}^{-1}$ por volta da primeira hora e atingiu valor máximo de $\sim 26,9 \text{ g kg}^{-1}$ por volta da hora 20 (Figura 25), ambas as salinidades estiveram em fase com a maré dinâmica. Em ambos os fundeios, foi possível observar que houve uma influência da maré dinâmica no campo de salinidade na área de estudo, onde a redistribuição de salinidade ocorre do efeito advectivo da maré, ou seja, em maré enchente observou-se um aumento da salinidade média enquanto que em maré vazante ocorre uma redução da salinidade média (Figura 25B).

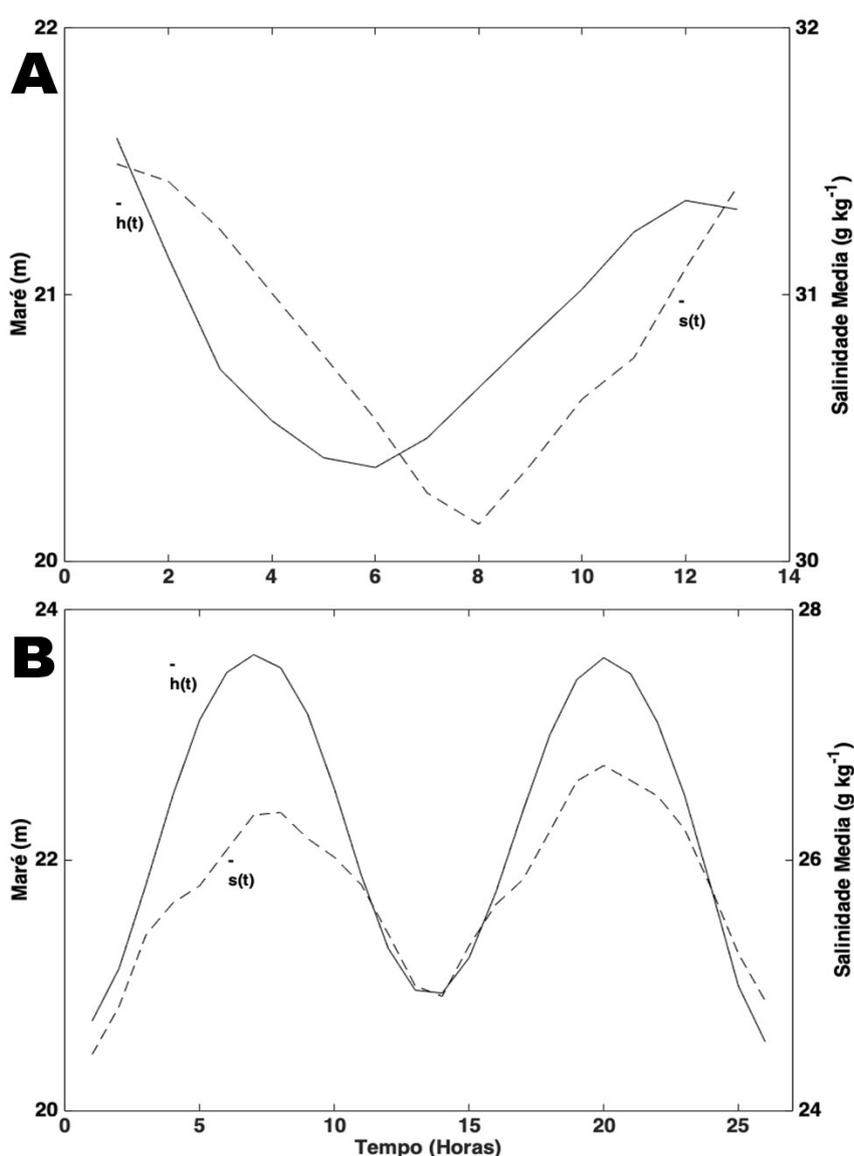


Figura 25. Variação temporal da salinidade média [$s(t)$] (linha tracejada) na coluna de água e da superfície livre [$h(t)$] (linha contínua). Figura (A) Fundeio I de 13 horas; Figura (B) Fundeio II de 26 horas.

6.3 MASSAS DE ÁGUA

6.3.1 VARIAÇÃO ESPACIAL

As massas de água foram definidas a partir das correlações entre os dados de Temperatura (T) e Salinidade (S), gerando o diagrama T-S espalhado, que mostra o comportamento das variáveis de estado medidas ao longo da coluna d'água das estações de amostragem espacial, para a estação de chuva e fim da chuva, sob regime de maré vazante e enchente (Figura 26). As distribuições espaciais entre essas massas de água foram identificadas a partir da localização tridimensional dos respectivos valores de limites isopicnais, linhas de mesma densidade.

Foi possível identificar a presença de duas massas de água na região durante o período estudado, que designa os índices termohalinos característicos para Água Costeira (AC) e Água Estuarina (AE), baseado em índices termohalinos descritos por Dias et al., (2013) para a Margem Equatorial Brasileira em um estuário da região nordeste e índices descritos por Silva et al., (2005), para a plataforma continental norte brasileira.

A distribuição de índices T-S para a estação de chuva (balanço hídrico positivo) durante a enchente (círculo azul), mostrou uma temperatura restrita à faixa de $\sim 28,8$ °C a $\sim 29,3$ °C e salinidades variando entre $\sim 27,9$ a $31,8$ g kg⁻¹, com maiores concentrações agrupadas entre 27-30 g kg⁻¹ e densidades (representada pelo símbolo σ_t) entre os limites isopicnais de ~ 16 e 19 kg m⁻³ (Figura 26). Durante a fase de vazante (círculo vermelho), os índices termohalinos apresentaram características similares, com praticamente a mesma faixa de temperaturas ($\sim 28,5$ a $29,2$ °C), salinidades entre $\sim 26,00$ e $31,9$ g kg⁻¹, com maiores concentrações entre 30-31 g kg⁻¹ e isopicnais semelhantes às de maré enchente ($15 < \sigma_t < 19$ kg m⁻³) (Figura 26).

As amplitudes térmicas e salinas de $0,5$ °C e $0,7$ °C e de $3,9$ g kg⁻¹ e $5,9$ g kg⁻¹ em maré enchente e vazante, respectivamente, na estação de chuva, mostram águas mais frias e salinas, mesmo durante o período chuva, mostrou que provavelmente há pouca contribuição das águas fluviais no CESM durante o período, onde nota-se a maior influência da intrusão de águas marinhas na área de estudo. Esse comportamento facilita a entrada da massa de Água Costeira (AC) (Tabela 4) na região de estudo, que provavelmente se deve ao fato de que, devido ao cenário de diminuição dos fluxos fluviais, a propagação da onda de maré ocorre com mais facilidade, transportando águas mais salinas estuário adentro.

O comportamento distinto dos índices T-S durante a estação de fim da chuva é perceptível, no que se refere a salinidade, pois foi menor em relação a estação de chuva. Durante a maré enchente houve um cenário típico de um sistema estuarino, com a presença de águas com temperaturas mais altas ($29,3$ - $30,3$ °C), diminuição da salinidade, variando entre $\sim 23,5 \leq S \leq 27,0$ g kg⁻¹, mostrando uma provável maior contribuição fluvial, que influenciou a faixa

restrita entre as isopícnais de $13 < \sigma_t < 16 \text{ kg m}^{-3}$ (Figura 26). Em maré vazante as temperaturas foram entre $\sim 29,5$ a $\sim 30,1$ °C e salinidades de 22,1 a $28,0 \text{ g kg}^{-1}$, restrita às isopícnais de 12 a $16,5 \text{ kg m}^{-3}$, o que evidencia a presença da massa de Água Estuarina (AE) (Tabela 4), típica e oriunda da mistura da massa de água costeira com água fluvial, oriunda do escoamento da bacia de drenagem, caracterizando assim uma água mais quente e menos salina.

Tabela 4. Valores de temperatura (°C) e salinidade (g kg^{-1}) característicos das respectivas massas de água observadas na área de estudo.

MASSA DE ÁGUA	TEMPERATURA (°C)	SALINIDADE (g kg^{-1})	DENSIDADE CONVENCIONAL (kg m^{-3})
ÁGUA ESTUARINA (AE)	> 29.0	< 30.0	< 17.0
ÁGUA COSTEIRA (AC)	< 29.0	≥ 30.0	≥ 17.0

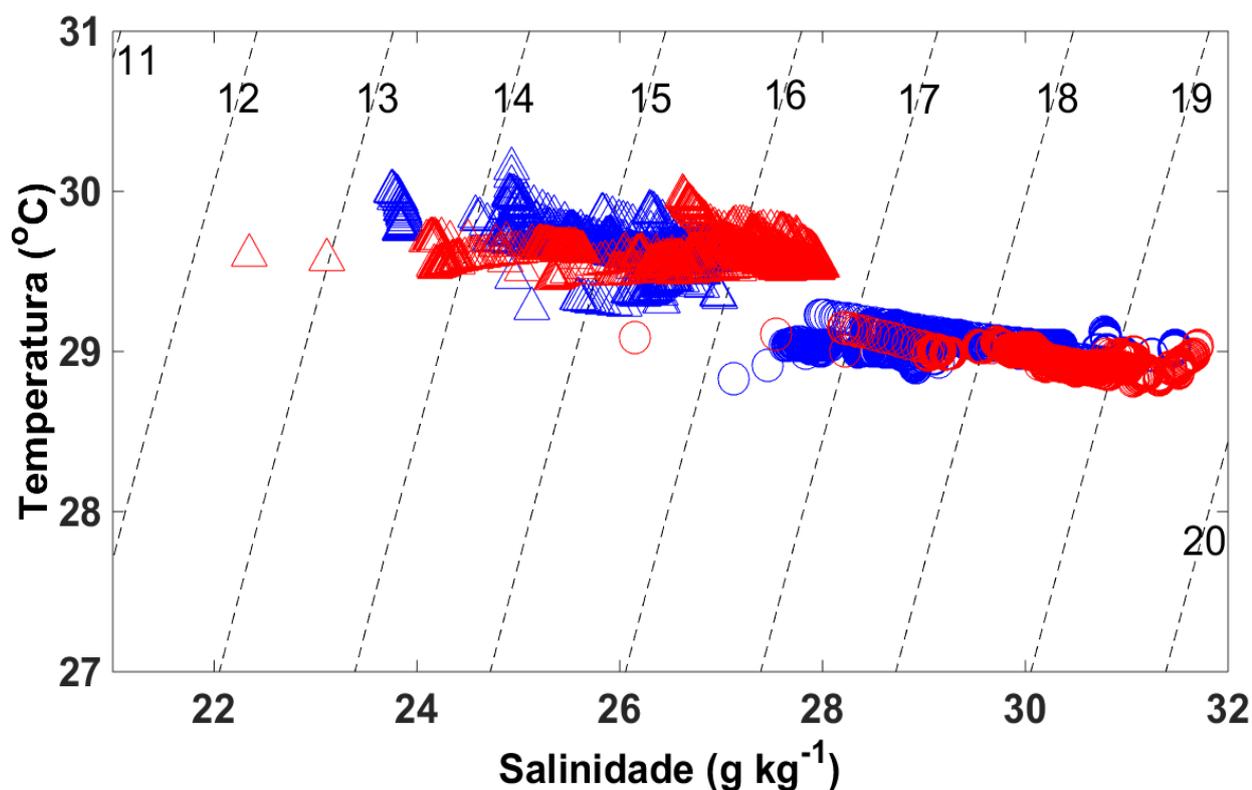


Figura 26. Diagrama T-S espalhado referente às duas campanhas amostrais ao longo do CPSL. As isopícnais representam a densidade convencional (σ_t). A forma de esfera é referente a estação de chuva e a forma de triângulo é referente a estação de fim da chuva. Cor azul – maré enchente; Cor vermelha – maré vazante.

6.3.2 VARIAÇÃO TEMPORAL

A análise do diagrama T-S durante os Fundeios I e II (Figura 27) mostrou a presença de dois agrupamentos que caracterizam as mesmas massas de água observadas durante a variação espacial deste estudo.

A partir das observações obtidas durante o Fundeio I (período chuvoso), os índices TS mostraram a presença da massa de Água Costeira, variando entre os limites isopícnais (σ_t) 18 a 20

kg m^{-3} , reportando uma variação de salinidade maior ($29,3 \leq S \leq 32 \text{ g kg}^{-1}$) e pode-se observar no diagrama TS uma pequena inclinação das isopicnais (σ_t), resultado da pequena variação das temperaturas, restrita a faixa dos $28,5\text{-}29,2^\circ\text{C}$ (Figura 7. Foi possível observar diferenças significativas entre os dois fundeios, principalmente em relação a salinidade, que apresentou pouca influência pelo período de balanço hídrico positivo, o que gerou uma maior distribuição dos pares TS no período avaliado e águas mais salinas.

Ao plotarmos a distribuição termohalina observada durante o Fundeio II, observamos que a distribuição dos pares TS foi mais heterogênea do que as do Fundeio I, com temperaturas menores que 29°C , concentrações de salinidade, em geral, menores que 30 g kg^{-1} e variando entre $\sim 23,9$ a $\sim 27,1 \text{ g kg}^{-1}$, mesmo sendo no final do período de chuva e isopicnais entre ~ 14 e $\sim 16 \text{ kg m}^{-3}$, caracterizando uma Água Estuarina (AE) resultante provavelmente do processo de descarga fluvial dos rios da região (Mearim, Pindaré, entre outros) na porção sul do CESM, aliada aos processos de mistura com AC.

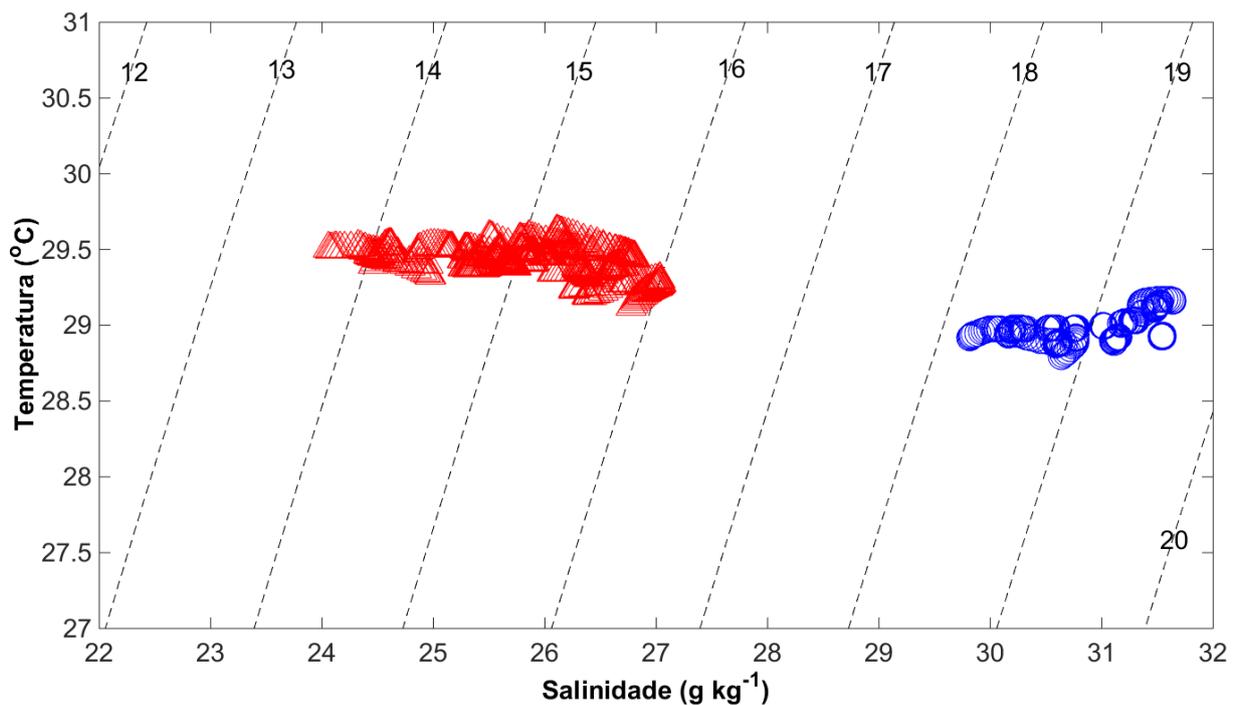


Figura 27. Diagrama T-S espalhado obtido a partir das coletas de perfis horários durante ciclos de maré semidiurna realizados ao largo do CPSL. As isopicnais representam a densidade convencional (σ_t). A forma de esfera (o) é referente ao Fundeio I – estação de chuva, maré de sizígia (~13 horas) e a forma de triângulo (Δ) é referente ao Fundeio II – estação de fim da chuva, maré de quadratura (~26 horas).

Em condições de maré de quadratura (Fundeio II), as correntes de maré são menos intensas do que na sizígia (Fundeio I) e com isso, é esperado que menos energia esteja 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). A inclinação das isopicnais sugere elevada homogeneidade da coluna

de água, fato que corrobora os dados encontrados durante a abordagem temporal. Com base nesta análise e nos critérios estabelecidos por Dias, Castro e Lacerda (2013) e Silva, Araújo e Bourlès (2005), foi possível identificar a presença de Água Costeira (AC) e Água Estuarina (AE) durante os perfis temporais nas águas estuarinas do CESM ao largo do CPSL.

6.4 CORRENTES

6.4.1 VARIAÇÃO ESPACIAL

6.4.1.1 ESTAÇÃO DE CHUVA

A tabela 5 mostra dados de intensidade, componente longitudinal e componente transversal para cada radial ao largo do CPSL durante a estação de chuva.

Tabela 5. Valores das suas respectivas velocidades (intensidade, longitudinal e transversal) para as cinco radiais da primeira campanha, realizada durante a estação chuvosa. Mín. - valores mínimos; Máx. - valores máximos e Méd. - valores médios das velocidades.

		ESTAÇÃO DE CHUVA												
		INTENSIDADE (m s ⁻¹)					INTENSIDADE (m s ⁻¹)							
		RADIAIS	1	2	3	4	5	RADIAIS	1	2	3	4	5	
		Mín.	0,05	0,07	0,32	0,003	0,043	Mín.	0,01	0,01	0,07	0,01	0,07	
		MÁX.	2,25	2,29	2,30	1,88	2,30	MÁX.	1,92	2,30	2,29	1,93	1,12	
		MÉD.	0,82	1,08	1,88	0,38	1,31	MÉD.	0,59	1,40	1,36	0,48	0,63	
MARÉ ENCHENTE			COMPONENTE LONGITUDINAL (m s ⁻¹)					COMPONENTE LONGITUDINAL (m s ⁻¹)						
			RADIAIS	1	2	3	4	5	RADIAIS	1	2	3	4	5
			Mín.	0,01	0,01	0,22	0,05	0,01	Mín.	0,04	0,05	0,18	0,01	0,05
			MÁX.	1,24	2,30	2,30	1,25	2,30	MÁX.	1,62	2,19	1,61	1,75	0,85
			MÉD.	0,39	0,84	1,74	0,21	1,10	MÉD.	0,44	1,24	0,71	0,24	0,57
			COMPONENTE TRANSVERSAL (m s ⁻¹)					COMPONENTE TRANSVERSAL (m s ⁻¹)						
		RADIAIS	1	2	3	4	5	RADIAIS	1	2	3	4	5	
		Mín.	0,19	0,01	0,01	0,02	0,01	Mín.	0,04	0,01	0,65	0,01	0,01	
		MÁX.	1,37	2,29	1,89	1,32	2,30	MÁX.	1,56	1,54	2,29	1,83	0,56	
		MÉD.	0,62	0,50	0,57	0,09	0,54	MÉD.	0,21	0,42	1,10	0,26	0,17	
		DISTÂNCIA (km)	4,1	3,7	2,6	5,3	6,1	DISTÂNCIA (km)	4,1	3,7	2,6	5,3	6,1	
		PROFUND. (m)	18	22	30	20	15	PROFUND. (m)	20	23	28	23	16	

Para obter a caracterização do padrão de circulação, a vetorização das correntes foi realizada a partir dos valores médios interpolados das componentes longitudinal (u) e transversal (v) ao escoamento do fluido, ao longo de cada uma das cinco radiais perpendiculares à costa.

A Tabela 5 sumariza os dados de velocidades totais (intensidades) das correntes para os perfis de cada radial, podemos observar que as maiores velocidades durante maré enchente e vazante ocorreram nas radiais 2 e 3 chegando a 2,30 m s⁻¹, a radial 5 também apresentou este valor máximo, porém somente em maré enchente, já em maré vazante seu valor máximo foi 51% menor, na ordem 1,12 m s⁻¹ e valores mínimos menores que 0,05 m s⁻¹.

Para a componente longitudinal, ou seja, preferencial do escoamento, os maiores valores de velocidades foram observados durante a enchente, com máximo de $2,30 \text{ m s}^{-1}$ e ocorreu nas radiais 2, 3 e 5, as radiais 1 e 4, apresentaram uma redução de 46% ($1,24$ e $1,25 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente) em relação ao valor máximo. A radial 3 apresentou maior média de velocidade longitudinal durante maré enchente, com valor de $1,74 \text{ m s}^{-1}$ (Tabela 5). As mínimas de velocidade longitudinal apresentaram valor menor que $0,05 \text{ m s}^{-1}$ (radiais 1, 2 e 5).

Em condição de maré vazante, a velocidade longitudinal teve valor máximo da ordem de $2,19 \text{ m s}^{-1}$, exclusivamente na radial 2. As radiais 1 e 3 foram menos intensas, com velocidades de aproximadamente $1,60 \text{ m s}^{-1}$ e as radiais 4 e 5 apresentarem uma diminuição de 20% ($1,75 \text{ m s}^{-1}$) e 98% ($0,85 \text{ m s}^{-1}$), respectivamente, em relação a velocidade máxima observada na radial 2 (Tabela 5) e quanto a velocidade longitudinal mínima, a radial 4 apresentou valor menor que $0,04 \text{ m s}^{-1}$. A maior média de velocidade longitudinal em maré vazante foi de $1,24 \text{ m s}^{-1}$ e ocorreu na radial 2, 29% abaixo da média na enchente.

A circulação residual (velocidades transversais ao escoamento) durante a enchente apresentou valor máximo de $2,30 \text{ m s}^{-1}$ nas radiais 2 e 5 e mínimos menores que $0,02 \text{ m s}^{-1}$ nas radiais 2, 3 e 5 (Tab. 5). A radial 1 foi a que apresentou maior média de velocidade transversal durante a enchente. As velocidades transversais durante maré vazante apresentaram valor máximo na ordem de $2,29 \text{ m s}^{-1}$ na radial 3 e valor mínimo menor que $0,04 \text{ m s}^{-1}$, que se repetiu nas radiais 2, 4 e 5. Ao compararmos as velocidades entre maré enchente e vazante durante o período de balanço hídrico positivo, podemos notar que as velocidades apresentam maior intensidade em maré enchente, com valor máximo da ordem de $2,30 \text{ m s}^{-1}$, esse valor esteve presente nas radiais 2, 3 em ambas as marés.

As figuras 28 e 29 a seguir, trazem a distribuição espacial dos vetores de correntes ao largo do CPSL, referentes a estação de chuva, onde a distribuição espacial dos vetores de velocidades que denotam a circulação espacial do campo de correntes, está esquematizada em dois níveis de referência: superfície (A) e fundo (B) para as cinco radiais, durante maré enchente e vazante.

Durante a estação de chuva o campo de correntes durante a enchente, em superfície apresentou máximo de $2,30 \text{ m s}^{-1}$ na radial 5 e no fundo chegou a $1,15 \text{ m s}^{-1}$, também na radial 5. Em maré vazante, a radial 1 apresentou maior valor na superfície ($2,30 \text{ m s}^{-1}$) e fundo ($2,25 \text{ m s}^{-1}$).

De acordo com as figuras, o sentido preferencial das correntes para os resultados experimentais nas cinco radiais foi na direção S-SE durante a enchente (Figura 28) e N-NE na fase de vazante (Figura 29). Observa-se que em superfície durante ambas as marés, os vetores das correntes apresentam um caráter giratório devido a presença do contorno sólido que ocasionou a refração do campo de correntes, cujas intensidades diminuíram em direção ao fundo, sugerindo a

presença de um vórtice ciclônico na região, através do ganho de vorticidade imposto pela presença do contorno rígido (deslocamento de camadas). O contorno sólido (Área do Porto) causa um aumento no efeito de arrasto na região de atracação dos navios ao largo do CPSL.

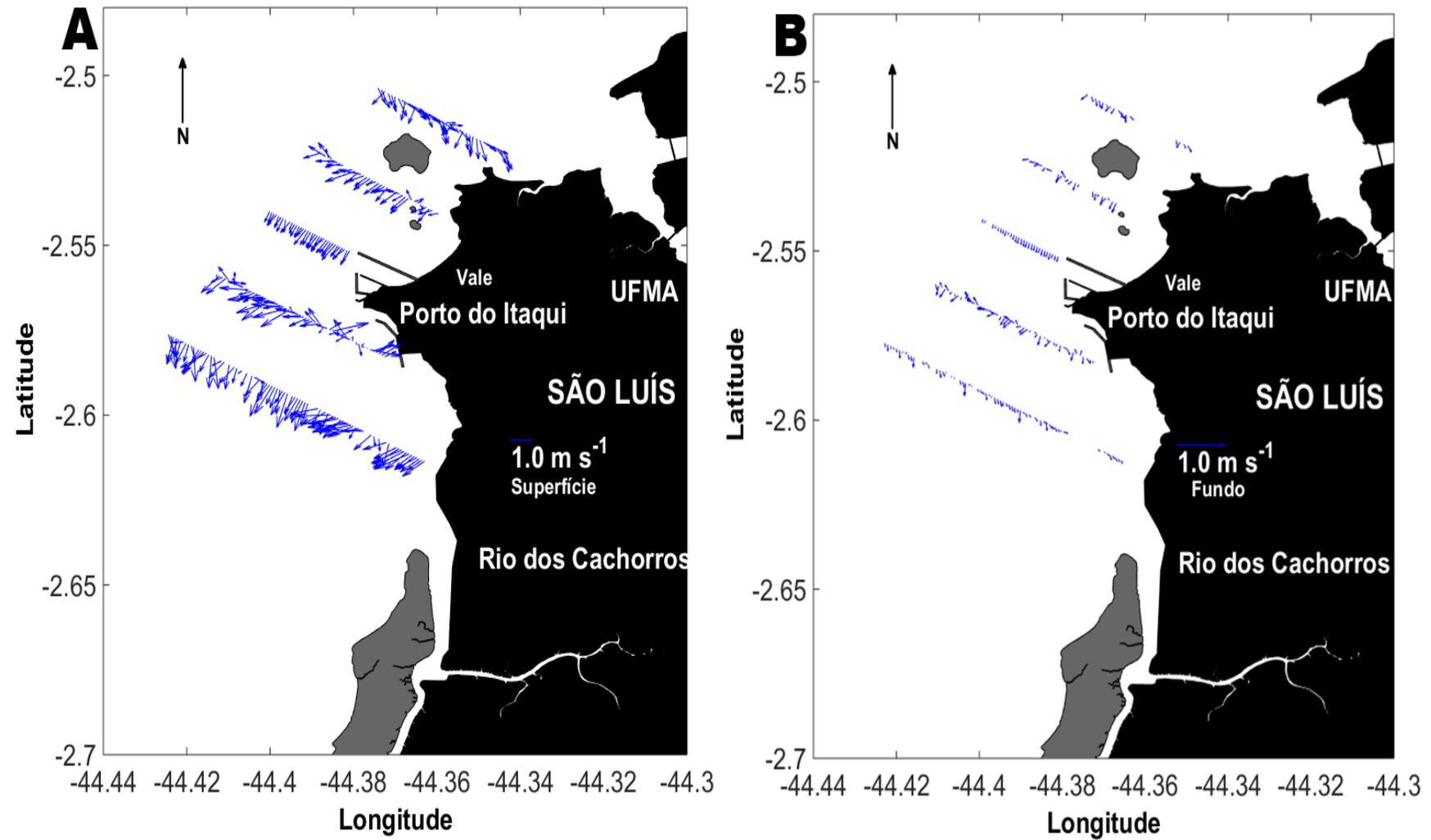


Figura 28. Representação da distribuição espacial do campo de correntes (m s^{-1}), durante a estação de chuva, em maré enchente. Paineil A: superfície; Paineil B: fundo.

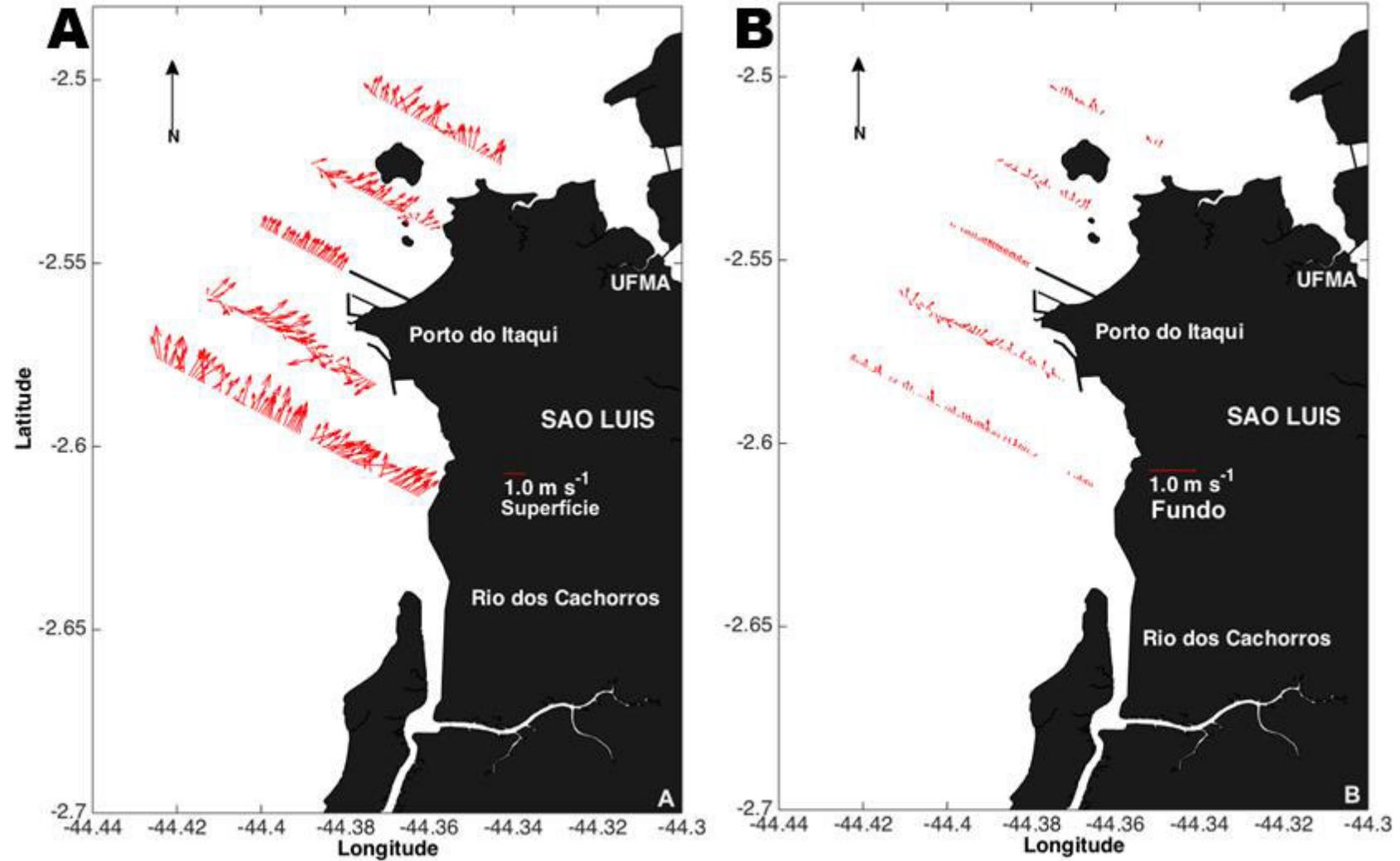


Figura 29. Representação da distribuição espacial do campo de correntes (m s⁻¹), durante a estação de chuva, em maré vazante. Painei A: superfície; Painei B: fundo.

6.4.1.2 ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA

Na tabela 6 são mostrados os valores de intensidades, componentes transversais (v) e longitudinais (u) das velocidades de correntes levantados nos vários transectos de ADCP, ao longo de cada uma das seções amostrais durante a estação de fim da chuvosa. O tempo de duração de cada radial em maré enchente foi de 1h44min (radial 1), as radiais 2, 3 e 4 tiveram duração de aproximadamente 60 min e até 2h00min (radial 5), em maré vazante o tempo de duração nos perfis foi de 1h30min na radial 1, 50min (radial 2), 1h00min nas radiais 3 e 4 e até 1h20min (radial 5).

Tabela 6. Valores das suas respectivas velocidades (intensidades, longitudinal e transversal) para as cinco radiais da segunda campanha, realizada durante a estação de fim da chuva. Mín. corresponde aos valores mínimos; Máx. corresponde aos valores máximos; Méd. corresponde aos valores médios das velocidades.

ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA															
		INTENSIDADE ($m s^{-1}$)							INTENSIDADE ($m s^{-1}$)						
		RADIAIS	1	2	3	4	5			RADIAIS	1	2	3	4	5
		Mín.	0.01	0.01	0.07	0.01	0.01			Mín.	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02
		Máx.	1.92	2.30	2.29	1.93	2.29			Máx.	2.14	2.30	2.30	2.27	2.29
		Méd.	0.59	1.40	1.33	0.48	0.94			Méd.	0.37	0.71	0.91	1.09	0.83
MARÉ ENCHENTE	COMPONENTE LONGITUDINAL ($m s^{-1}$)														
		RADIAIS	1	2	3	4	5			RADIAIS	1	2	3	4	5
		Mín.	0.004	0.016	0.033	0.012	0.016			Mín.	0.013	0.009	0.002	0.038	0.016
		Máx.	2.09	2.19	2.30	2.30	1.69			Máx.	2.30	2.30	2.30	2.23	2.30
		Méd.	0.62	0.87	0.89	0.94	0.46			Méd.	0.91	0.71	0.37	1.08	0.83
		COMPONENTE TRANSVERSAL ($m s^{-1}$)													
	RADIAIS	1	2	3	4	5			RADIAIS	1	2	3	4	5	
	Mín.	0.01	0.01	0.65	0.01	0.01			Mín.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
	Máx.	1.56	1.54	2.29	1.83	0.17			Máx.	1.24	2.20	2.15	1.64	1.73	
	Méd.	0.21	0.42	1.10	0.26	0.25			Méd.	0.12	0.26	0.64	0.38	0.28	
	DISTÂNCIA (km)	4.1	3.7	2.6	5.3	6.1			DISTÂNCIA (km)	4.1	3.7	2.6	5.3	6.1	
	PROFUND. (m)	17	22	32	25	15			PROFUND. (m)	17	23	32	23	13	
MARÉ VAZANTE	COMPONENTE LONGITUDINAL ($m s^{-1}$)														
		RADIAIS	1	2	3	4	5			RADIAIS	1	2	3	4	5
		Mín.	0.013	0.009	0.002	0.038	0.016			Mín.	0.013	0.009	0.002	0.038	0.016
		Máx.	2.30	2.30	2.30	2.23	2.30			Máx.	2.30	2.30	2.30	2.23	2.30
		Méd.	0.91	0.71	0.37	1.08	0.83			Méd.	0.91	0.71	0.37	1.08	0.83
		COMPONENTE TRANSVERSAL ($m s^{-1}$)													
	RADIAIS	1	2	3	4	5			RADIAIS	1	2	3	4	5	
	Mín.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01			Mín.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
	Máx.	1.24	2.20	2.15	1.64	1.73			Máx.	1.24	2.20	2.15	1.64	1.73	
	Méd.	0.12	0.26	0.64	0.38	0.28			Méd.	0.12	0.26	0.64	0.38	0.28	
	DISTÂNCIA (km)	4.1	3.7	2.6	5.3	6.1			DISTÂNCIA (km)	4.1	3.7	2.6	5.3	6.1	
	PROFUND. (m)	17	23	32	23	13			PROFUND. (m)	17	23	32	23	13	

Para a estação de fim da chuva, as velocidades médias (intensidades) apresentaram máximas de $2,30 m s^{-1}$, ocorrendo nas radiais 2, 3 e 5. As radiais 1 e 4 apresentaram valores da ordem de $1,0 m s^{-1}$ e as velocidades mínimas foram menores que $0,07 m s^{-1}$ durante maré enchente. Foi observado a menor velocidade média em 90% das radiais, no valor de $0,01 m s^{-1}$. Em maré vazante ocorreram maiores intensidades das correntes, com valores observados da ordem de $2,00 m s^{-1}$ em todas as radiais e a menor velocidade média ocorreu nas radiais 1, 2 e 3, com valor de $0,01 m s^{-1}$.

Quanto a componente longitudinal, na maré enchente as radiais 1, 2, 3 e 4 apresentaram velocidades da ordem de ($\sim 2,00 m s^{-1}$), sendo que as radiais 3 e 4 apresentaram o valor máximo ($2,30 m s^{-1}$) e maiores médias ($0,89$ e $0,94 m s^{-1}$, respectivamente), os valores mínimos foram menores que $0,04 m s^{-1}$ (Tabela 6). Em maré vazante a componente u indicou máxima de $2,30 m$

s^{-1} nas radiais 1, 2, 3 e 5 e a radial 4 apresentou valor de $2,23 \text{ m s}^{-1}$. Quanto aos valores mínimos, a radial 3 apresentou o menor valor, da ordem de $0,002 \text{ m s}^{-1}$.

Durante a estação de fim da chuva, foi possível observar que a variação do campo de correntes em superfície durante a enchente (Figura 30A) ocorreu de maneira quase uniforme ao longo das radiais 2, 3 e 4, com velocidade média de $0,89 \text{ m s}^{-1}$, porém a radial 5 apresentou a maior velocidade na superfície ($2,30 \text{ m s}^{-1}$). Junto ao fundo, a corrente máxima observada foi da ordem de $2,25 \text{ m s}^{-1}$, também na radial 1 (Figura 30B)

Os maiores valores de velocidade em superfície, durante a maré vazante, ocorreram na radial 5 ($2,30 \text{ m s}^{-1}$) (Figura 31A) e junto ao fundo a máxima velocidade foi na ordem de $0,91 \text{ m}^{-1}$ na radial 4 (Figura 31B).

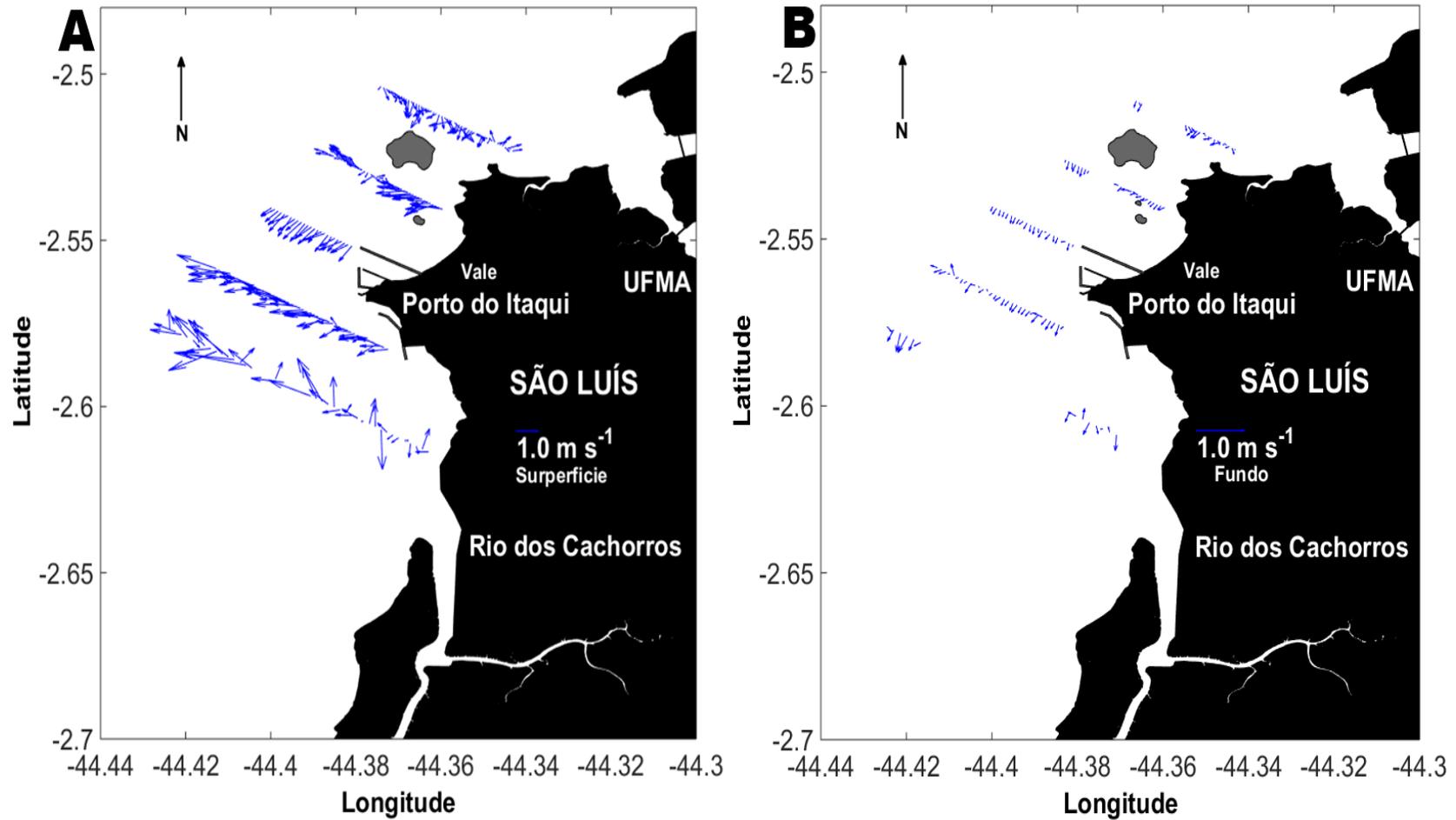


Figura 30. Representação da distribuição espacial do campo de correntes ($m s^{-1}$), durante a segunda campanha, estação de chuva, em maré enchente. Painel A: superfície; Painel B: fundo.

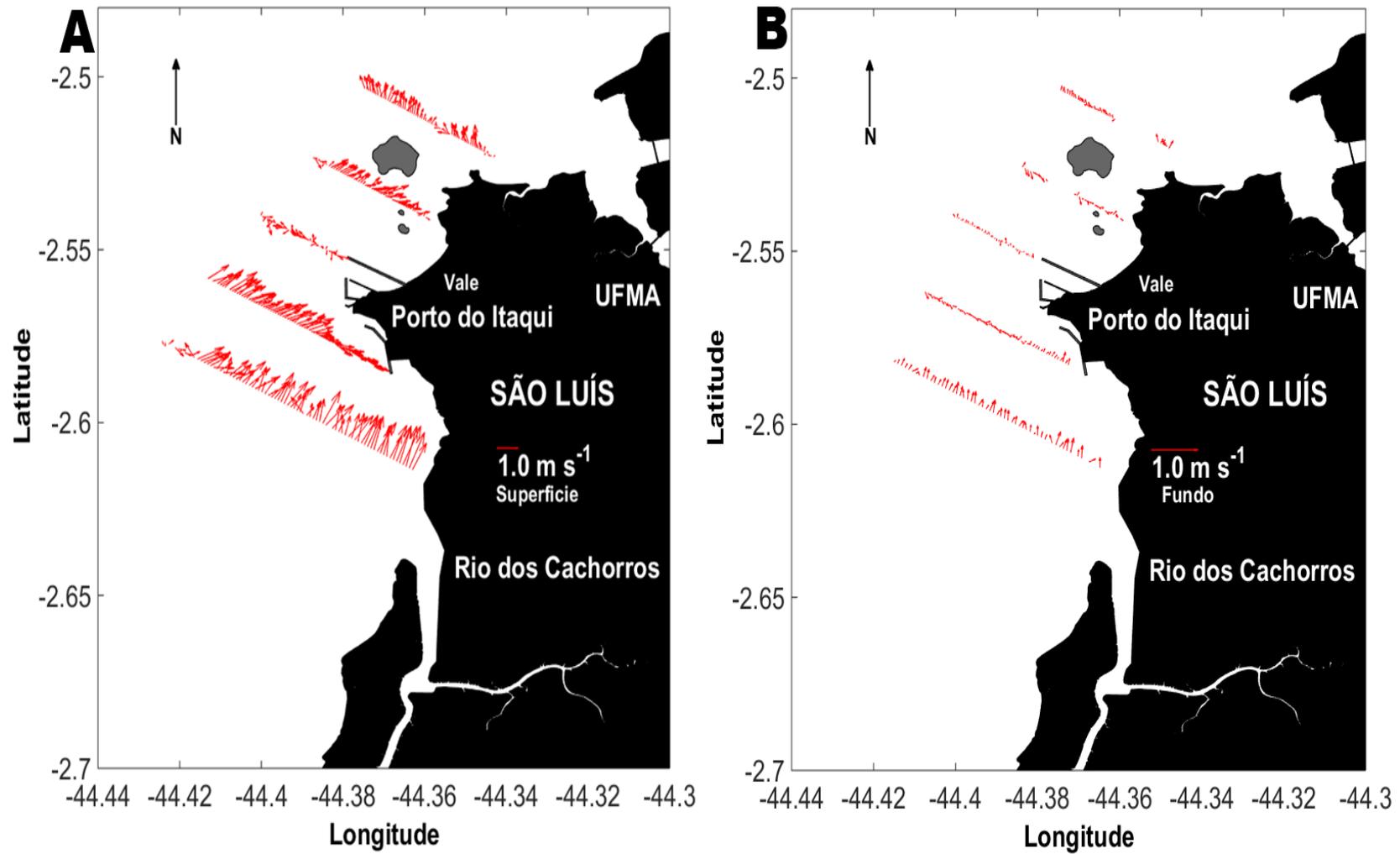


Figura 31. Representação da distribuição espacial do campo de correntes (m s^{-1}) durante a segunda campanha, estação de fim da chuva, em maré vazante. Painel A: superfície; Painel B: fundo.

6.4.2 VARIAÇÃO TEMPORAL

6.4.2.1 ESTAÇÃO DE CHUVA

A velocidade longitudinal (u) se correlaciona com os movimentos de enchente e vazante, sendo valores positivos indicando velocidade de saída (vazante) e negativa de entrada (enchente), ou seja, utilizaremos $u > 0$ para o componente longitudinal da velocidade em maré vazante e $u < 0$ para o componente longitudinal da velocidade em maré enchente.

Para o Fundeio I realizado em maré de sizígia, observou-se uma assimetria nos perfis da velocidade, com duração de aproximadamente 6 horas de enchente e 7 horas de vazante, refletindo no padrão de corrente, com velocidades maiores durante o período de vazante. A baixa-mar e preamar ocorreram por volta das 6h00 e 12h00. Quanto as velocidades médias (intensidades), notou-se a presença de dois núcleos de máximas velocidades, durante a vazante ($1,88 \text{ m s}^{-1}$), na hora 4 e durante a enchente, na hora 10, com valor da ordem de $1,52 \text{ m s}^{-1}$, ambas as velocidades máximas próximas à superfície. Os mínimos de intensidade na enchente e vazante foram de $0,04$ e $0,19 \text{ m s}^{-1}$, na hora 1 e 8, respectivamente (Figura 32A).

Os perfis de velocidade da componente longitudinal (u) foram as mais representativas e apresentam características de escoamento bidirecional, com velocidade máxima de $-1,49 \text{ m s}^{-1}$ na maré enchente (hora 10, uma hora antes da maré alta) e durante a vazante ($u > 0$), as velocidades foram mais intensas, chegando a $1,56 \text{ m s}^{-1}$ (hora 5, quatro horas após a maré alta) (Figura 32B). Entre os perfis da componente u , foi perceptível a forte assimetria em relação aos valores médios, de $-1,07 \pm 0,29 \text{ m s}^{-1}$ na enchente e de $0,89 \pm 0,35 \text{ m s}^{-1}$ em maré vazante, mostrando uma redução de 17% das velocidades em maré vazante. O núcleo de velocidades mais altas durante a vazante ocorreu entre as horas 4 - 6, com valor médio de $1,33 \text{ m s}^{-1}$ e o núcleo de máximas velocidades na enchente ocorreu entre as horas 9 e 13, com média de $-1,28 \text{ m s}^{-1}$.

A velocidade mínima ao longo do canal em maré enchente, ocorreu na primeira hora do fundeio ($-0,03 \text{ m s}^{-1}$), o que provavelmente indica a intrusão da água marinha para o interior do estuário e durante a vazante a velocidade mínima foi de $0,11 \text{ m s}^{-1}$ (hora 8), ambas próximo ao fundo da coluna d'água (Figura 32B).

As velocidades transversais (v) no Fundeio I apresentaram valores consideráveis, porém, inferiores aos da velocidade longitudinal, com máxima de $-0,87 \text{ m s}^{-1}$ (hora 2, superfície) e mínima de $-0,02 \text{ m s}^{-1}$ (hora 2, fundo) em maré enchente e durante a vazante variou entre $0,39 \text{ m s}^{-1}$ na hora 5, junto ao fundo a $0,01 \text{ m s}^{-1}$, em superfície nas horas 4 e 7. (Figura 32C).

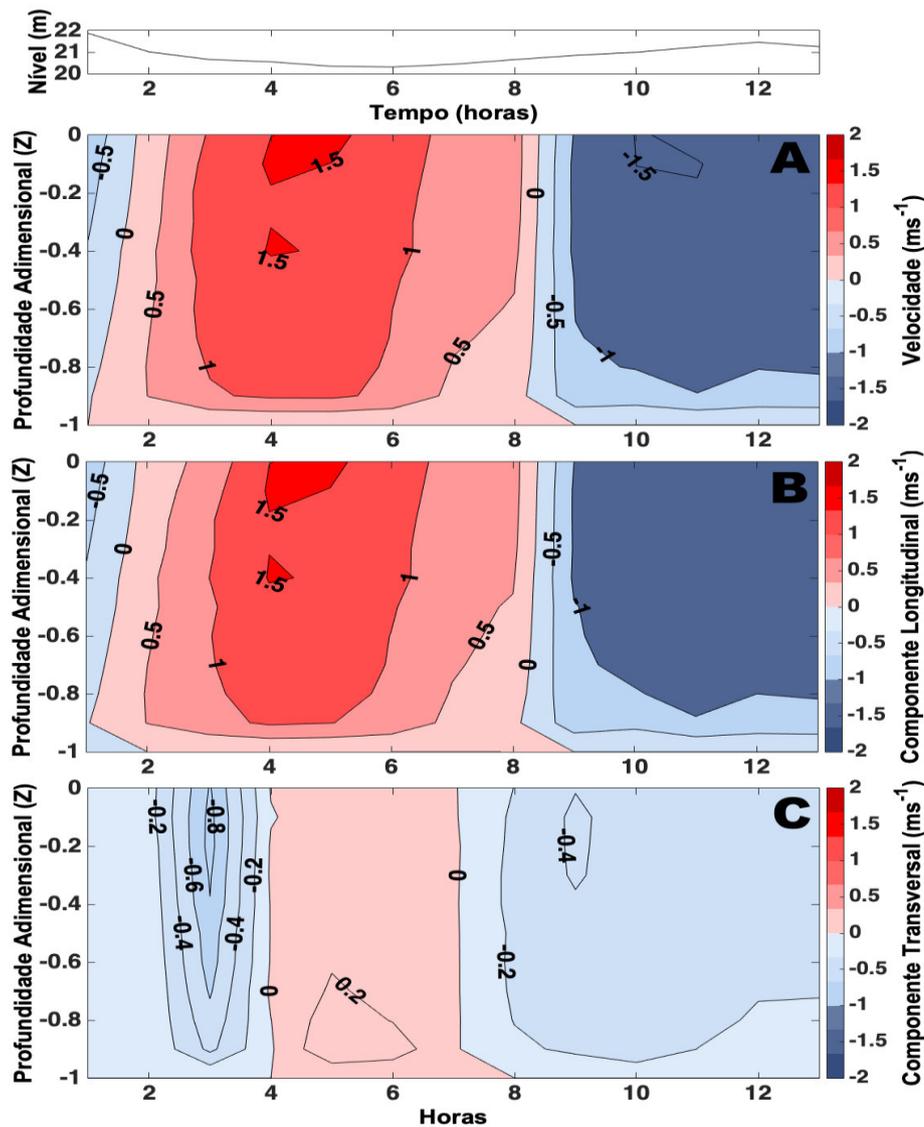


Figura 32. Estrutura vertical e temporal de (A) Velocidade (Intensidades), (B) Componente Longitudinal e (C) Componente Transversal, em função da profundidade adimensional Z e do tempo (ciclo de maré) em horas do Fundeio –I de 13 horas durante o período chuvoso, localizado ao lado da Ilha do Medo, em 14 e 15/03/2017, em condição de maré de sizígia.

A figura 33 mostra a média temporal nos ciclos completos da maré da velocidade longitudinal ao longo da coluna d'água e a média espaço-temporal da velocidade longitudinal, calculada pelas equações (10), (11) e (12) para o Fundeio I e II.

Durante a estação de chuva, o Fundeio I apresentou um perfil médio temporal da velocidade ($\langle u(Z) \rangle$) com corrente resultante unidirecional e com sentido sul, ou seja, estuário abaixo ($u > 0$) na camada superficial. O perfil exibiu uma predominância das correntes de vazante sobre as de enchente, com uma correspondente velocidade resultante (u_a) representativa para o componente do movimento gerado pela descarga fluvial de 0.05 m s^{-1} (Figura 33), ou seja, esse domínio das correntes de vazante, indica o transporte resultante estuário abaixo. Esse comportamento corrobora com o perfil da velocidade longitudinal já observado durante o Fundeio

I, como mostra a figura 33, cujo os valores de vazante apresentaram maior tempo de duração durante o ciclo.

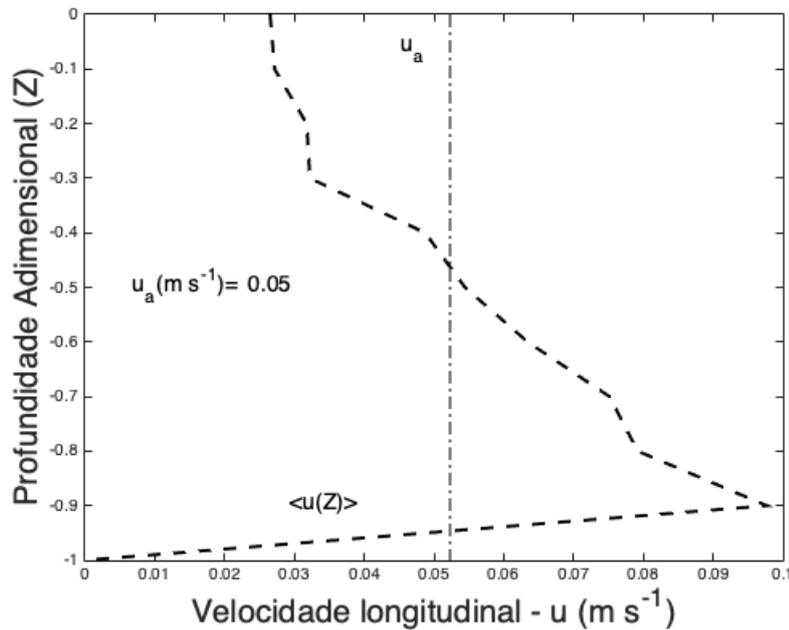


Figura 33. Perfil médio do comportamento longitudinal da velocidade ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna de 13 horas (Fundeio I). O $\langle u(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade e u_a (linha tracejada) é a velocidade residual.

Durante o Fundeio I, o nível da superfície livre $[h(t)]$ ao longo de um ciclo de maré oscilou cerca de 1 metro, com o pico da maré alta ocorrendo por volta da hora 1 e o pico da maré baixa por volta da hora 6. No que se refere a velocidade longitudinal média $[u(t)]$, esta apresentou valores que chegaram a $-1,32 \text{ m s}^{-1}$ durante a fase de vazante, na hora 5 e a $1,24 \text{ m s}^{-1}$ em maré enchente, por volta da hora 11 de amostragem (Figura 34A). Foi possível observar que os instantes de movimentos nulos, ou seja, reversão do sentido, ocorreram depois de 2 horas após o pico da maré alta ou estufa da enchente e cerca de 1 hora na maré baixa, ou estufa de vazante.

Para o Fundeio II, houve uma variação aproximada de 3 metros no nível da superfície livre $[h(t)]$, com o pico da maré alta ocorrendo aproximadamente nas horas 7,5 e 20 e nas horas 1,14 e 26 ocorreram os picos de maré baixa. A velocidade longitudinal média $[u(t)]$ apresentou valores que chegaram a $-0,90 \text{ m s}^{-1}$ em maré vazante (hora 22) e a $0,81 \text{ m s}^{-1}$ em maré enchente (hora 4) (Figura 34B).

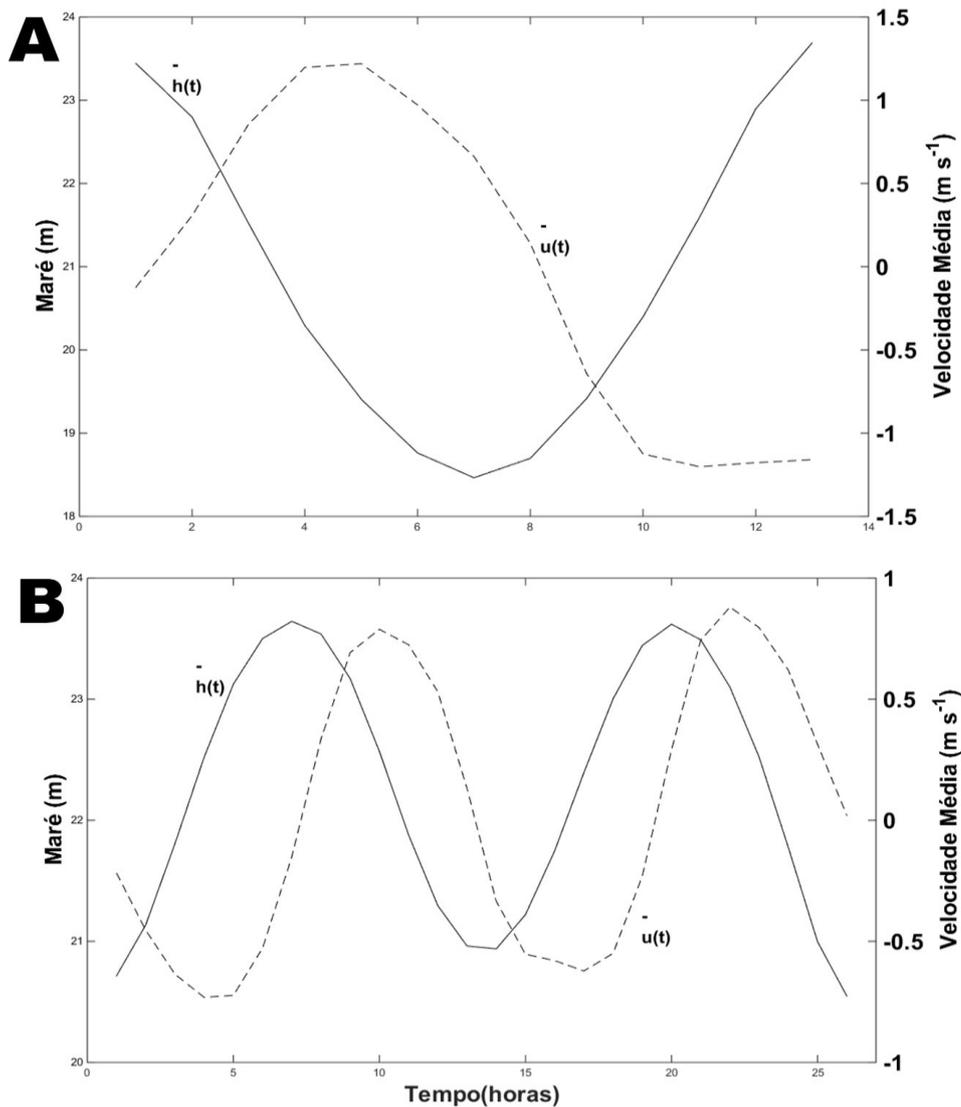


Figura 34. Variação temporal da velocidade média $[u(t)]$ (linha tracejada) na coluna de água e da superfície livre $[h(t)]$ (linha contínua) em (C) Fundeio I e (D) Fundeio II.

6.4.2.2 ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA

Os resultados para as estruturas verticais das variações temporais (locais) das velocidades longitudinais (u) e transversais (v) para o Fundeio II com duração de 26 horas, sob maré de quadratura, são apresentadas na Figura 34, por isolinhas em função da profundidade e do tempo (isopletas).

As velocidades observadas durante o Fundeio II, foram menores em relação às do Fundeio I. Quanto as velocidades médias, entre os perfis da fase de maré enchente e vazante, notou-se um comportamento correlato, com valores de $-0,60 \pm 0,17 \text{ m s}^{-1}$ e $0,59 \pm 0,12 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente (Figura 35A).

Os perfis da velocidade da componente longitudinal apresentaram um escoamento bidirecional e na distribuição das isolinhas de velocidade longitudinal (u) durante a fase de enchente, foi observado uma variação de $-0,01$ a $-0,96 \text{ m s}^{-1}$, ambos os valores na superfície da coluna d'água, ocorrendo na hora 26 e 4, respectivamente, atingindo o máximo de velocidade de enchente 3 horas antes do da primeira preamar (Figura 35B). As velocidades longitudinais foram mais intensas durante a maré vazante, atingindo o pico de velocidade instantânea de $1,13 \text{ m s}^{-1}$ na superfície, duas horas antes da maré baixa, junto com esse valor foi observado a predominância de velocidades da ordem de $1,0 \text{ m s}^{-1}$ entre as horas 21 e 22 do ciclo de maré, formando um núcleo com média de $1,09 \text{ m s}^{-1}$, como pode ser observado na figura 34B. Durante a maré vazante, o valor mínimo observado foi de $0,04 \text{ m s}^{-1}$ durante a hora 13 e próxima ao fundo (Figura 35B).

As velocidades transversais ao escoamento do fluido em maré enchente apresentaram mínima e máxima de $-0,01 \text{ ms}^{-1}$ e $-0,21 \text{ ms}^{-1}$. Em maré vazante, variaram de $0,01$ a $0,37 \text{ a ms}^{-1}$, na superfície e fundo, respectivamente (Figura 35C). Apesar do domínio de vazante em ambos os períodos sazonais, nota-se um aumento de velocidades na estação de chuva (Fundeio I).

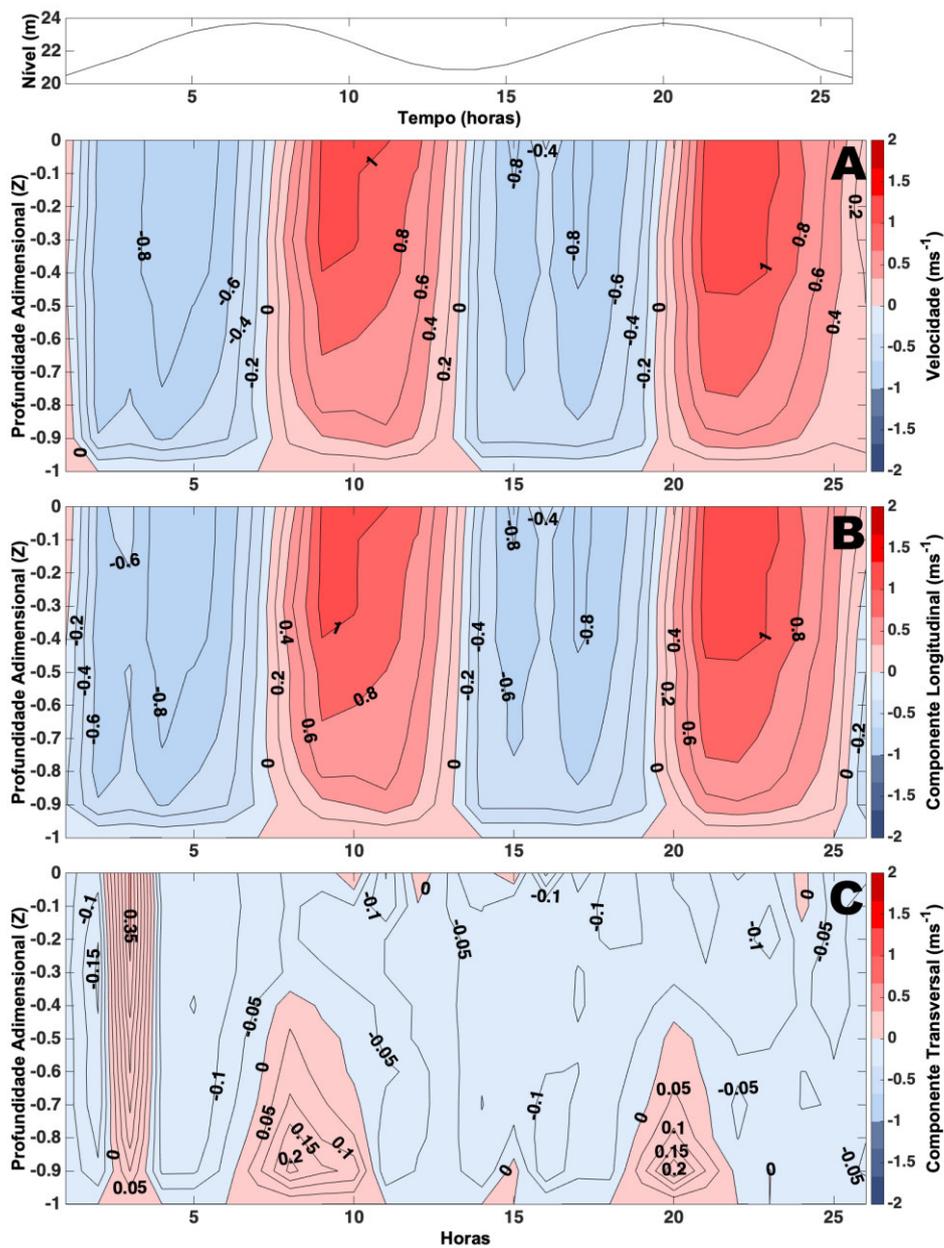


Figura 35. Estrutura vertical e temporal de (A) Velocidade Longitudinal, (B) Componente Longitudinal e (C) Componente Transversal, em função da profundidade adimensional Z e do tempo (horas) para o Fundeio – II de 26 horas no final do período chuvoso, localizada ao lado da Ilha do Medo em 04 e 05/07/2017 em condição de maré de quadratura.

A Figura 36 apresenta a média temporal da componente longitudinal da velocidade, onde a linha tracejada está relacionada a velocidade resultante. Nota-se que através da análise do perfil médio temporal da velocidade ($\langle u(Z) \rangle$), o Fundeio II apresentou duplo sentido, na camada superficial com sentido estuário abaixo, estuário acima na camada de fundo e uma superioridade das correntes de vazante ($u > 0$) sobre as de enchente, cujo respectivo valor médio calculado ao longo da coluna de água ($u_a = \langle \bar{u} \rangle$) que caracteriza a velocidade resultante com valor médio de

0.03 ms^{-1} indicando um transporte estuário abaixo, uma redução de 40% em relação ao Fundeio I (Figura 36).

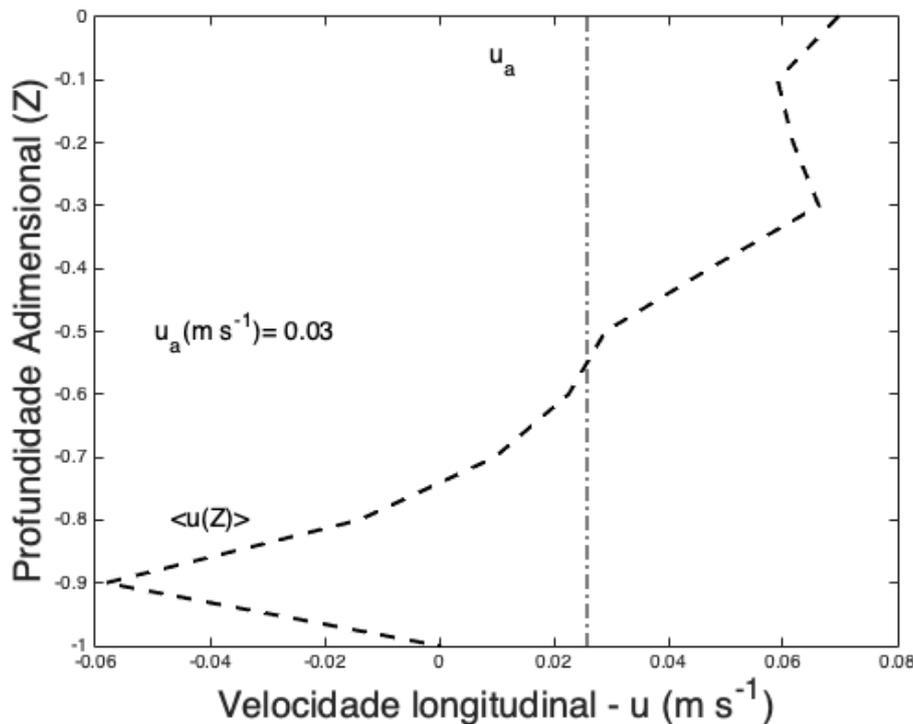


Figura 36. Perfil médio do comportamento longitudinal da velocidade ao longo de um ciclo completo de maré semidiurna de 26 horas. O $\langle u(Z) \rangle$ (linha contínua) é o perfil da média temporal da velocidade e u_a (linha tracejada) é a velocidade residual.

6.5 ESTABILIDADE E CLASSIFICAÇÃO ESTUARINA

Pelo número de Richardson por camada (Ri_L) pode-se avaliar a importância relativa entre turbulência e estratificação vertical na coluna d'água em diferentes momentos da maré.

De acordo com a Figura 37, para o Fundeio I, observou-se que na maior parte do tempo (84%), a variação temporal do Ri_L mostrou elevada instabilidade vertical, com baixos valores ($Ri_L < 2$), essa classificação permite inferir que os processos de difusão turbulenta dominam durante a maior parte do período e a coluna d'água é instável, porém em dois momentos (16%) o Ri_L mostrou valor acima de 2, com a hora 1 (3,5) e 8 (2,1) apresentando condições de fraca estabilidade vertical na coluna d'água ($2 < Ri_L < 20$) (Figura 37), esses dois momentos foram os períodos de inversão da maré. Os valores de Ri_L sugerem que a propagação da onda longa de gravidade ocorre de forma intensa no CPSL, influenciando diretamente na instabilidade vertical da coluna de água.

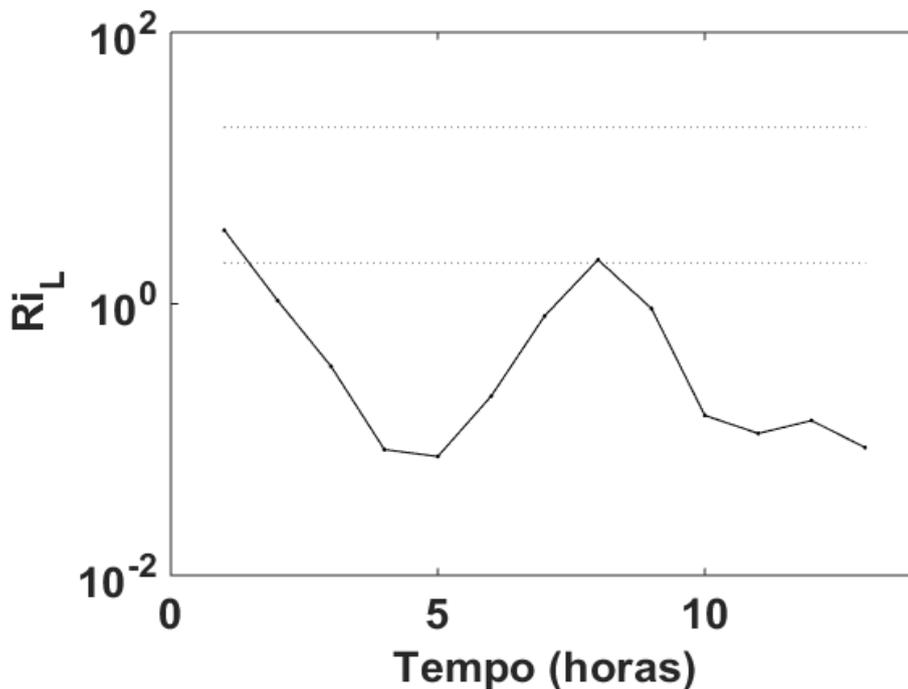


Figura 37. Variação temporal do número de Richardson por camada (Ri_L) para o Fundeio I (13 horas) realizado ao largo do CPSL. As linhas tracejadas delimitam $Ri_L > 20$ mostra uma condição de alta estabilidade; $2 < Ri_L < 20$ delimita que as condições são de fraca estabilidade vertical e $Ri_L < 2$ mostra uma instabilidade vertical.

A análise da variação temporal do número de Richardson por camada (Ri_L) para o Fundeio II, pode ser observada na Figura 33 e mostra duas classificações para o ambiente. Na primeira hora da amostragem, o comportamento do Ri_L foi de alta estabilidade vertical, com valor bem acima de 20 ($Ri_L > 10^3$), inferindo que os mecanismos de mistura não foram suficientemente fortes para quebrar a estratificação da coluna d'água, este valor ($\sim 10^4$) pode estar associado as fracas correntes de maré dos períodos de inversão de corrente. A partir da hora 2, o Ri_L apresentou baixos valores ($Ri_L < 2$) durante a maior parte do ciclo, demonstrando uma total mistura vertical, ou seja, a turbulência foi efetiva no que se refere a geração de mistura durante a maior parte do ciclo da maré. Com a instabilidade, os processos de mistura dominam e resultam em uma coluna de água instável, sugerindo a intensa ocorrência da propagação da onda longa de gravidade no CESM.

Porém, observou-se que os instantes das horas 7, 8 e 19 nos quais a fase de maré enchente apresentou sua altura máxima (4,9) e nas horas 13 e 23 máximas da maré vazante (1,7), o Ri_L foi maior que 2 ($2 < Ri_L < 20$), demonstrando uma condição de estratificação moderada relevante, com uma fraca estabilidade na coluna d'água (Figura 38).

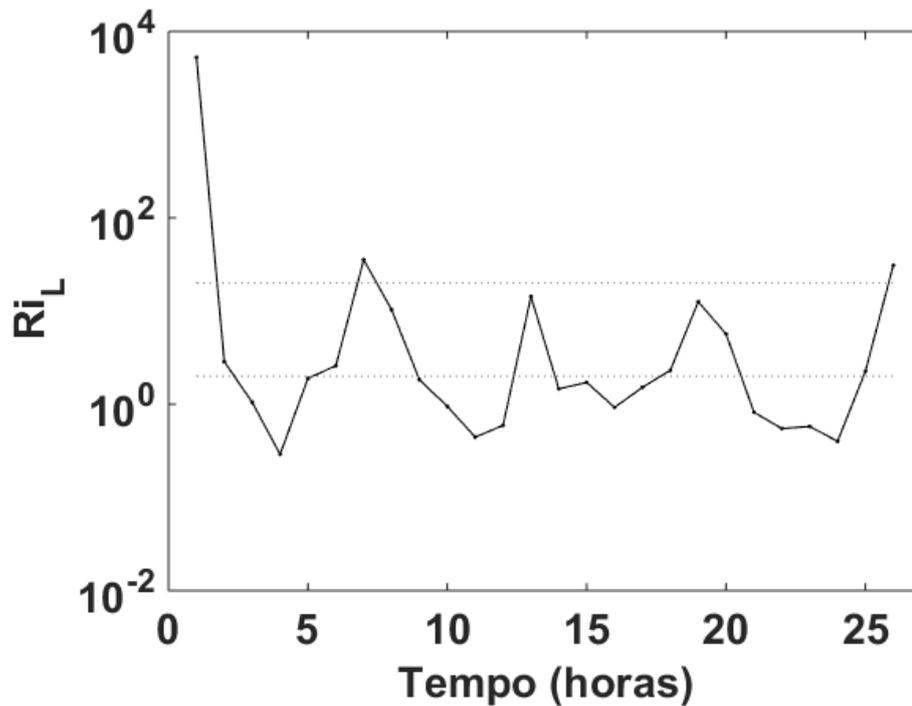


Figura 38. Variação temporal do número de Richardson por camada (Ri_L) para o Fundeio II (26 horas), realizados ao largo do CPSL. As linhas tracejadas delimitam $Ri_L > 20$ mostra uma condição de alta estabilidade; $2 < Ri_L < 20$ delimita que as condições são de fraca estabilidade vertical e $Ri_L < 2$ mostra uma instabilidade vertical.

O seguinte diagrama está dividido em 4 tipos estuarinos, cada um agrupando uma categoria de estuário. O parâmetro de circulação (eixo x) significa a intensidade da circulação gravitacional do estuário, enquanto que o parâmetro de estratificação (eixo y) representa o grau de estabilidade da coluna d'água no estuário.

As características de fluxo do CPSL para o Fundeio I (estação de chuva), indicam uma condição do tipo 1a, bem misturado e fracamente estratificado, com o valor do parâmetro Ni aproximadamente igual a 1 e o transporte de substâncias estuário acima é realizado exclusivamente por difusão turbulenta, gerada pela propagação da maré no estuário (Figura 39). Estuários classificados como dos subtipos 1a pelo diagrama de Hansen & Rattray o fluxo residual é estuário abaixo em todas as profundidades, ou seja, em termos gerais são considerados como bem misturados, caracterização típica de estuários dominados por maré com uma amplitude capaz de promover homogeneização vertical da coluna d'água.

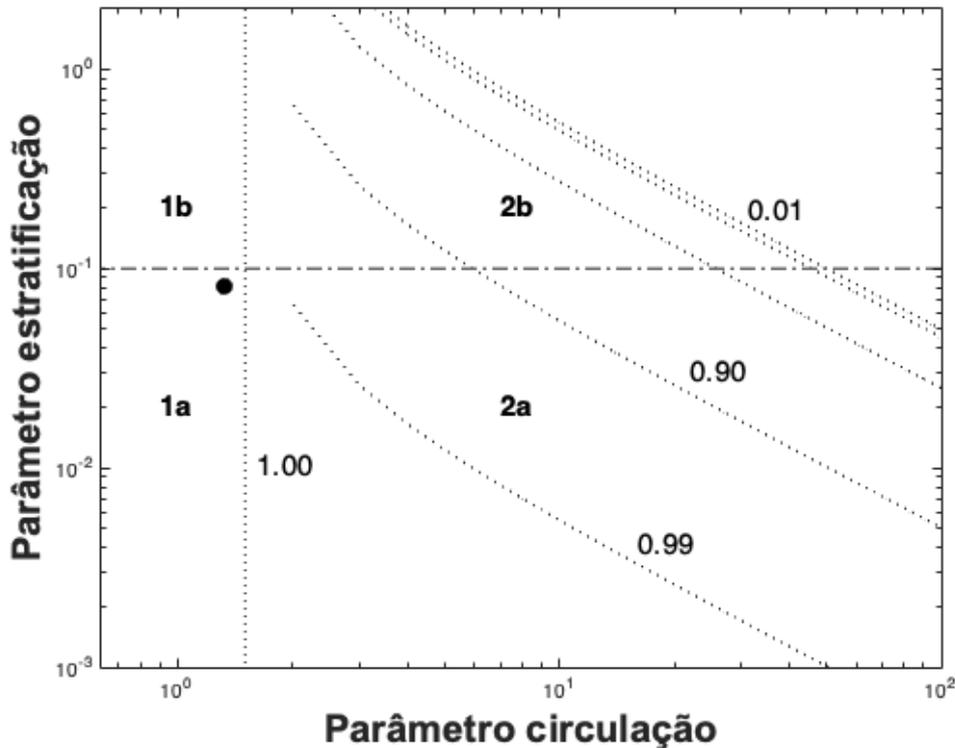


Figura 39. Diagrama de Estratificação-Circulação para classificação do estuário (Hansen & Rattray Jr., 1966), com isolinhas do parâmetro Ni , proporção relativa ($0 < Ni \leq 1$) entre dispersivo e advectivo para o Fundeio I (13 horas), realizado na estação de chuva, em maré de sizígia.

Para a amostragem feita durante o Fundeio II (estação de fim da chuva), o diagrama estratificação-circulação de Hansen & Rattray (1966), classifica-o como Tipo 2a, ou parcialmente misturado e fracamente estratificado, mas com o valor do parâmetro $Ni = 0,99$ ($Ni \rightarrow 1$), onde o perfil estacionário de velocidade mostrou uma circulação gravitacional fraca, indicando a predominância dos processos difusivos da maré (oriundos do oceano), ou seja, 99% transporte por difusão da maré e 1% por advecção (correntes fluviais e correntes baroclínicas) foram importantes para o transporte de sal sentido montante (estuário acima), como mostra a Figura 40.

Observou-se um padrão mais estratificado na maré de quadratura (Fundeio II) em comparação no período de sizígia (Fundeio II) durante o estudo, o que confirma uma ausência da estratificação salina durante o período de maré de sizígia. Isso é esperado, pois as marés de sizígia geram maiores velocidades de correntes que as marés de quadratura, o que faz com que, conseqüentemente as marés de sizígia possam promover maiores misturas na coluna d'água.

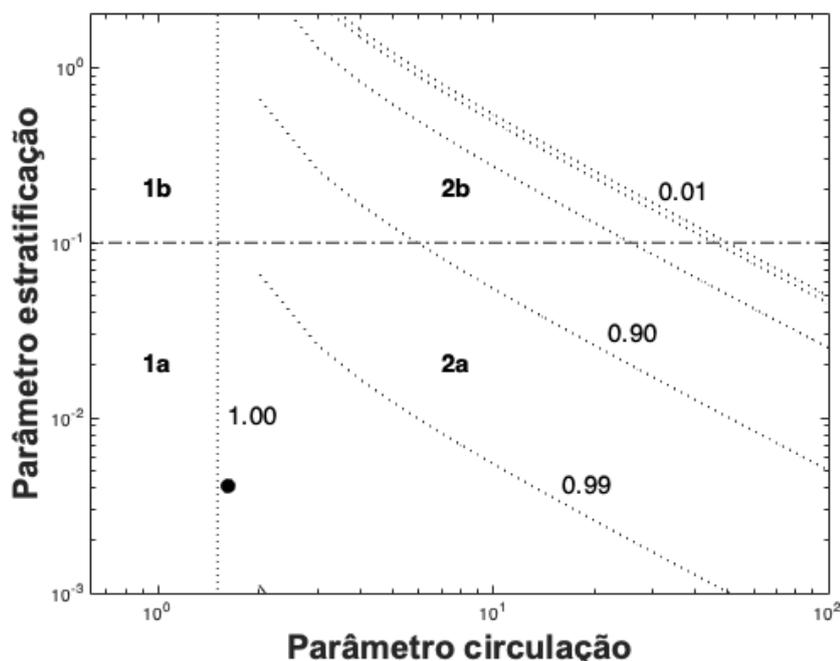


Figura 40. Diagrama de Estratificação-Circulação para classificação do estuário (Hansen & Rattray Jr., 1966), com isolinhas do parâmetro Ni , proporção relativa ($0 < Ni \leq 1$) entre dispersivo e advectivo, para o Fundeio II (26 horas), realizado na estação de fim da chuva, em maré de quadratura.

6.6 TRANSPORTE ADVECTIVO DE SAL

As Figuras 41 e 42 mostram, respectivamente, para os fundeios I e II as intensidades das parcelas do transporte advectivo de sal (descarga fluvial, transporte de Stokes, circulação gravitacional/difusão da maré, circulação gravitacional, difusão residual, cisalhamento da maré, efeitos não estacionários do vento) e o transporte advectivo de sal total obtido pela somatória dos termos advectivos + dispersivos. Valores de transporte positivos e negativos indicam condições de vazante e enchente, respectivamente.

Para o Fundeio I, de 13 horas, os principais processos dominantes responsáveis pelo transporte advectivo de sal (T_S) no período de balanço hídrico positivo que estiveram atreladas basicamente a difusão turbulenta, foram descarga fluvial ($33,57 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$) e a deriva de Stokes ($-9,74 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$), com uma pequena contribuição de corrente de maré ($-0,51 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$), como é possível observar na Figura 41. O transporte de sal integrado durante o ciclo de maré e a somatória das parcelas foram iguais a $23,33 \text{ kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$. O transporte relacionado à deriva de Stokes mostrou valores notáveis se comparado aos outros componentes ligados ao transporte de sal, apresentou sentido estuário acima, correspondente ao transporte de massa gerado pela propagação da onda de maré progressiva no ambiente estuarino. No geral, o sentido do respectivo transporte ocorre estuário abaixo, assim como observado no CESM, entretanto o transporte advectivo de sal associado à

descarga fluvial mostrou-se intenso, contribuindo com o transporte de sal estuário abaixo, em direção a plataforma continental adjacente (Figura 41).

O comportamento observado através das parcelas, indica um T_S sentido estuário abaixo, sugerindo que o estuário exerceu a função de exportador de sal durante o Fundeio I. 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.

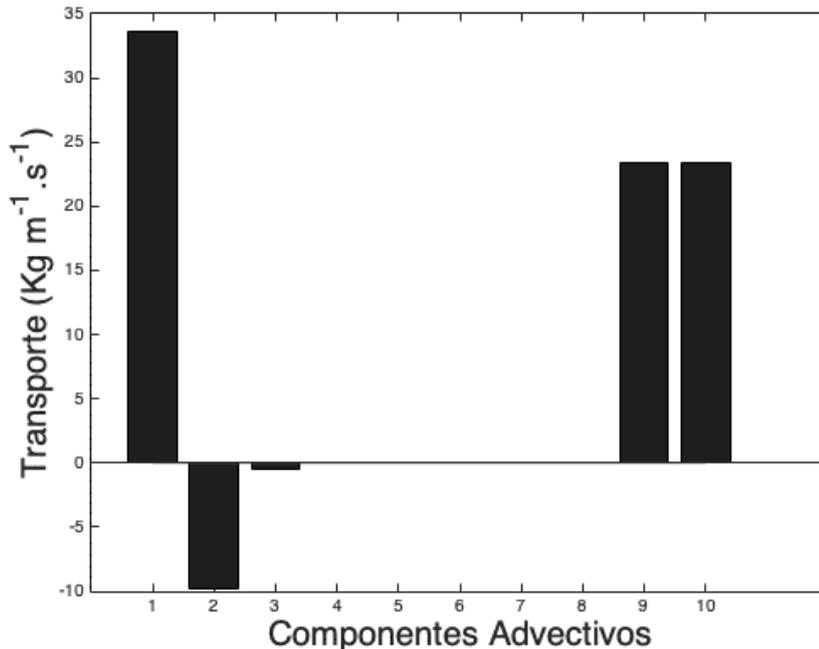


Figura 41. Componentes do transporte advectivo de sal para o Fundeio I (13 horas). Parcelas: descarga fluvial (1); deriva de Stokes (2); correlação de maré (3); circulação gravitacional (4); flutuações turbulentas (5); dispersão de maré (6); circulação residual (7). A soma das parcelas está indicada em (9) e o transporte total de sal integrado diretamente ao longo do ciclo de maré em (10).

Em relação ao Fundeio II, o valor do transporte de sal integrado durante o ciclo da maré foi aproximadamente $19,82 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. As principais parcelas componentes do transporte de sal foram todas em sua maioria sentido estuário abaixo, que normalmente apresenta caráter advectivo. O transporte relacionado à descarga fluvial obteve o maior valor, seguido de corrente de maré e pôr fim a deriva de Stokes, apresentando valores de $14,87$, $1,98$ e $2,97 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, respectivamente (Figura 42) a circulação gravitacional também esteve presente (coluna 4) e apresentou pequena contribuição de $-0,0833 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ com sentido estuário acima. Comparando o comportamento da descarga fluvial nos dois fundeios, observa-se um comportamento similar desta respectiva componente, com mesmo sentido, porém com uma redução de 55% durante o Fundeio II. O valor do transporte de sal integrado durante o ciclo de maré foi $19,24 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e o cálculo através da somatória dos termos das parcelas advectivas e dispersivas foi de $19,82 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, indicando assim

um transporte de sal orientado para fora do estuário, esse comportamento sugere que o CESM funcionou como exportador de sal.

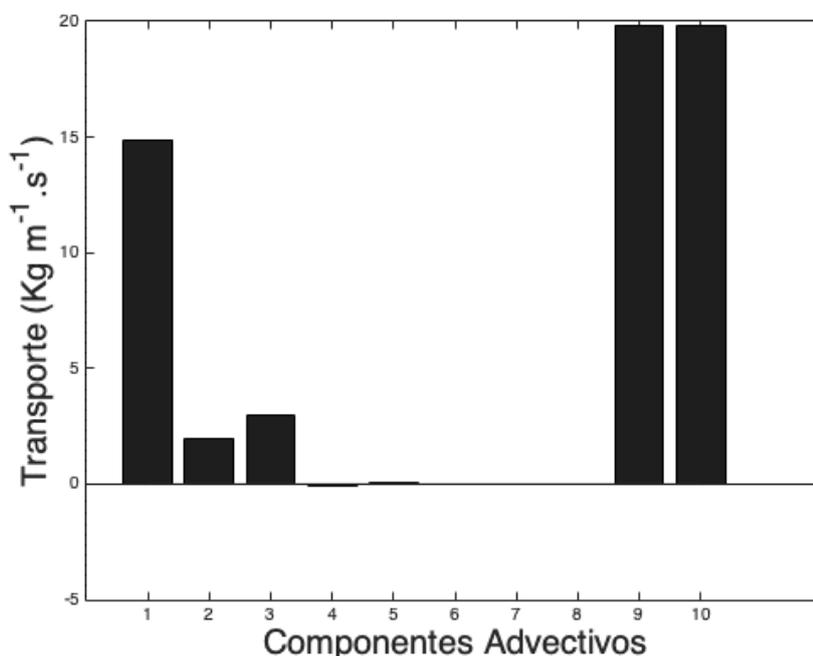


Figura 42. Componentes do transporte advectivo de sal para o Fundeio II (26 horas). Parcelas: descarga fluvial (1); deriva de Stokes (2); correlação de maré (3); circulação gravitacional (4); flutuações turbulentas (5); dispersão de maré (6); circulação residual (7). A soma das parcelas está indicada em (9) e o transporte total de sal integrado diretamente ao longo do ciclo de maré em (10).

6.7 INTERAÇÕES CONTINENTE-OCEANO

6.7.1 TRANSPORTE DE VOLUME (T_V) E VOLUME TOTAL (V_T)

O transporte de volume/vazão estuarina (T_V) nas seções transversais ao fluxo médio, durante a estação de chuva, apresentou duas ordens de grandeza distintas em maré enchente, que variaram de $1,99 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $7,71 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, nas radiais 5 e 2, respectivamente, com valor médio de $3,33 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Tabela 7). Em maré vazante houve um aumento e a variabilidade das vazões também diferiu em uma ordem de grandeza, variando de $2,41 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $1,96 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ nas radiais 2 e 5, respectivamente, com média de $7,51 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Tabela 7). Ao compararmos as vazões nas diferentes condições de maré, observamos que o valor médio observado em maré vazante foi 130% superior ao observado em maré enchente. O valor máximo durante a enchente ocorreu na radial 2, área mais próxima do oceano adjacente. Durante a vazante o maior valor foi encontrado na radial 5 (parte mais interna do estuário), diminuindo gradativamente em direção ao oceano aberto e aumentando novamente em direção a radial 1 ($9,78 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), provavelmente devido a influência do aporte de água dos rios Bacanga e Anil e por essa radial estar mais próxima

da região costeira adjacente. O gradiente horizontal desta propriedade ao largo do CPSL foi de $1,0 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-1}$ em maré enchente e de $2,3 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-1}$ em maré vazante.

No período de chuva, observou-se que o volume de água (V_T) variou em duas ordens de grandeza ($4,43 \times 10^7 \text{ m}^3$ a $1,72 \times 10^9 \text{ m}^3$) durante maré enchente (Tabela 7), nas radiais 5 e 2, respectivamente. O somatório do volume total de água para as 5 radiais foi de $3,65 \times 10^9 \text{ m}^3$. Durante a fase de vazante, o V_T variou em uma ordem de grandeza, com mínima de $5,38 \times 10^8 \text{ m}^3$ e máxima de $4,37 \times 10^9 \text{ m}^3$, valores localizados nas radiais 2 e 5, respectivamente (Tabela 7) e o somatório para as 5 radiais foi de $8,38 \times 10^9 \text{ m}^3$. Em relação aos valores totais em cada maré, na enchente houve uma redução de 57% em relação a vazante. O volume de água total apresentou o mesmo comportamento da vazão em relação as radiais, durante a enchente o maior valor observado foi na radial 2, área mais próxima do oceano adjacente e em maré vazante a radial 5 (área mais interna), apresentou maior quantidade de água total.

Tabela 7. Tabela mostrando os valores de Vazão (Transporte de volume) e Volume Total de água com suas respectivas ordens de grandeza durante a estação de chuva.

1° CAMPANHA 2017 PERÍODO CHUVOSO					
MARÉ ENCHENTE (FLOOD)	RADIAL	VAZÃO (Q) (m^3/s)	MARÉ ENCHENTE (FLOOD)	RADIAL	VOL. TOTAL (V = Q x T)
		RADIAL 1		$1,57 \times 10^4$	
	RADIAL 2	$7,71 \times 10^4$		RADIAL 2	$1,72 \times 10^9$
	RADIAL 3	$1,31 \times 10^4$		RADIAL 3	$2,93 \times 10^8$
	RADIAL 4	$5,55 \times 10^4$		RADIAL 4	$1,24 \times 10^9$
	RADIAL 5	$1,99 \times 10^3$		RADIAL 5	$4,43 \times 10^7$
MARÉ VAZANTE (EBB)	RADIAL 1	$9,76 \times 10^4$	MARÉ VAZANTE (EBB)	RADIAL 1	$2,18 \times 10^9$
	RADIAL 2	$2,41 \times 10^4$		RADIAL 2	$5,38 \times 10^8$
	RADIAL 3	$2,48 \times 10^4$		RADIAL 3	$5,55 \times 10^8$
	RADIAL 4	$3,32 \times 10^4$		RADIAL 4	$7,41 \times 10^8$
	RADIAL 5	$1,96 \times 10^5$		RADIAL 5	$4,37 \times 10^9$

Para o final da estação chuvosa, a distribuição espacial do transporte de volume ao largo do CPSL apresentou mesma ordem de grandeza, com mínima de $1,81 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (radial 5), máxima de $7,19 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (radial 1) e valor médio de $4,30 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, em maré enchente (Tabela 8). Durante a vazante a variabilidade dos dados de vazões foi apenas 6% maior em relação aos valores médios e apresentou duas ordens de grandeza, variando entre $5,59 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (radial 3) a $7,87 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (radial 1), com média de $4,54 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Tabela 8). Pode-se observar que as maiores vazões estiveram relacionadas com a estação de chuva. O gradiente horizontal em maré enchente foi da ordem de $5,4 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-1}$ e em maré vazante de $1,5 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{km}^{-1}$.

Durante a estação de fim da chuva, o volume total de água em maré enchente, variou em uma ordem de grandeza ($4,03 \times 10^8 \text{ m}^3$, radial 5 a $1,60 \times 10^9 \text{ m}^3$, radial 1) (Tabela 8) e a soma das 5 radiais foi de $4,79 \times 10^9 \text{ m}^3$ de água. Em maré vazante, a variação do V_T foi de $1,32 \times 10^8 \text{ m}^3$ a $1,76 \times 10^9 \text{ m}^3$ de água, nas radiais 3 e 1, respectivamente (Tabela 8) e o somatório foi da ordem de $5,06 \times 10^9 \text{ m}^3$, o que representa 6% superior a maré enchente.

Tabela 8. Tabela mostrando os valores de Vazão (Transporte de volume) e Volume Total de água com suas respectivas ordens de grandeza durante a estação de fim da chuva.

2° CAMPANHA 2017 ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA					
MARÉ ENCHENTE (FLOOD)	RADIAL	VAZÃO (Q) (m^3/s)	MARÉ ENCHENTE (FLOOD)	RADIAL	Vol. Total (V = Q x T)
	RADIAL 1	$7,19 \times 10^4$		RADIAL 1	$1,60 \times 10^9$
	RADIAL 2	$3,35 \times 10^4$		RADIAL 2	$7,48 \times 10^8$
	RADIAL 3	$4,29 \times 10^4$		RADIAL 3	$9,57 \times 10^8$
	RADIAL 4	$4,84 \times 10^4$		RADIAL 4	$1,08 \times 10^9$
	RADIAL 5	$1,81 \times 10^4$		RADIAL 5	$4,03 \times 10^8$
MARÉ VAZANTE (EBB)	RADIAL 1	$7,87 \times 10^4$	MARÉ VAZANTE (EBB)	RADIAL 1	$1,76 \times 10^9$
	RADIAL 2	$2,21 \times 10^4$		RADIAL 2	$4,93 \times 10^8$
	RADIAL 3	$5,90 \times 10^3$		RADIAL 3	$1,32 \times 10^8$
	RADIAL 4	$7,00 \times 10^4$		RADIAL 4	$1,56 \times 10^9$
	RADIAL 5	$5,02 \times 10^4$		RADIAL 5	$1,12 \times 10^9$

6.7.2 BALANÇO DE CARGAS

Como pode ser observado na seção anterior, houve diferenças entre cada radial em relação as vazões estuarinas de entrada (maré enchente) e de saída (maré vazante), observadas nas campanhas realizadas em diferentes períodos sazonais. Durante a estação de chuva, foi observado que houve um domínio de 60% das vazões estuarinas de entrada no sistema estuarino (radiais 1, 3 e 5) resultando em valores negativos de $-8,19 \times 10^{-4}$, $-1,17 \times 10^{-4}$ e $-1,94 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figura 43), mostrando um comportamento importador. As radiais 2 e 4 tiveram comportamento exportador, com valores positivos de $5,30 \times 10^{-4}$ e $2,23 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente (Figura 43).

Na estação de fim da chuva de 2017, as vazões hídricas de entrada também foram superiores as vazões de saída, com valores negativo nas radiais 1, 4 e 5, com seus respectivos valores de $-6,76 \times 10^{-3}$ $-2,16 \times 10^{-4}$ e $-3,21 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figura 43). Os outros 40% compostos pelas radiais 2 e 4, resultaram em valores positivos de $1,14 \times 10^{-4}$ e $3,70 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, mostrando comportamento exportador.

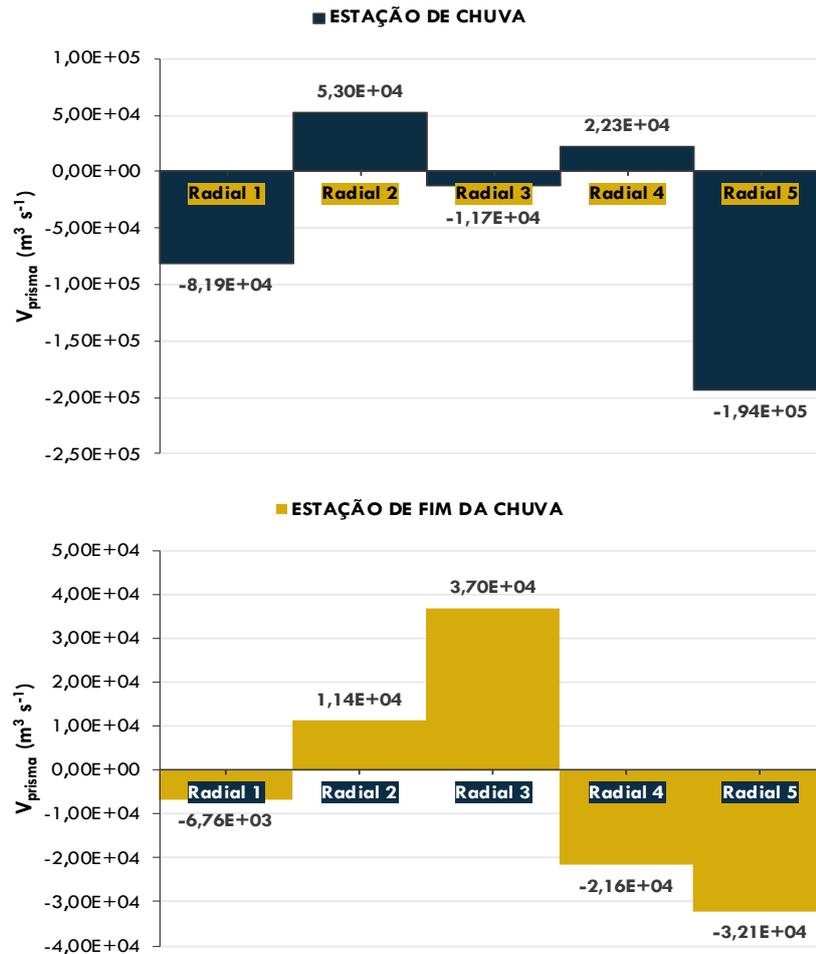


Figura 43. Valores do balanço de cargas nas estações de chuva e fim da chuva. Valores médios para cada radial na estação de chuva (azul) e estação de fim da chuva (amarelo).

6.7.3 PERCENTUAL DE ÁGUA-DOCE E TEMPO DE RESIDÊNCIA (P_{ad} %)

Ao relacionarmos os percentuais de água doce (P_{ad} %) com os valores de referência para os tempos de residência (T_R) nas águas estuarinas do CESM, para os dois períodos sazonais (Figura 44), podemos observar que estes parâmetros se relacionam de maneira diretamente proporcional, com uma influência significativa entre ambos. Ao longo da malha amostral o P_{ad} elevou linearmente o tempo de residência nas águas estuarinas do CESM. Durante a estação de balanço hídrico positivo, os T_R 's foram menores que 1,5 horas e com P_{ad} 's inferiores a ~20%. No fim da estação chuvosa os P_{ad} 's foram superiores, porém não ultrapassaram 35% resultando em tempos de residência de até 2 horas.

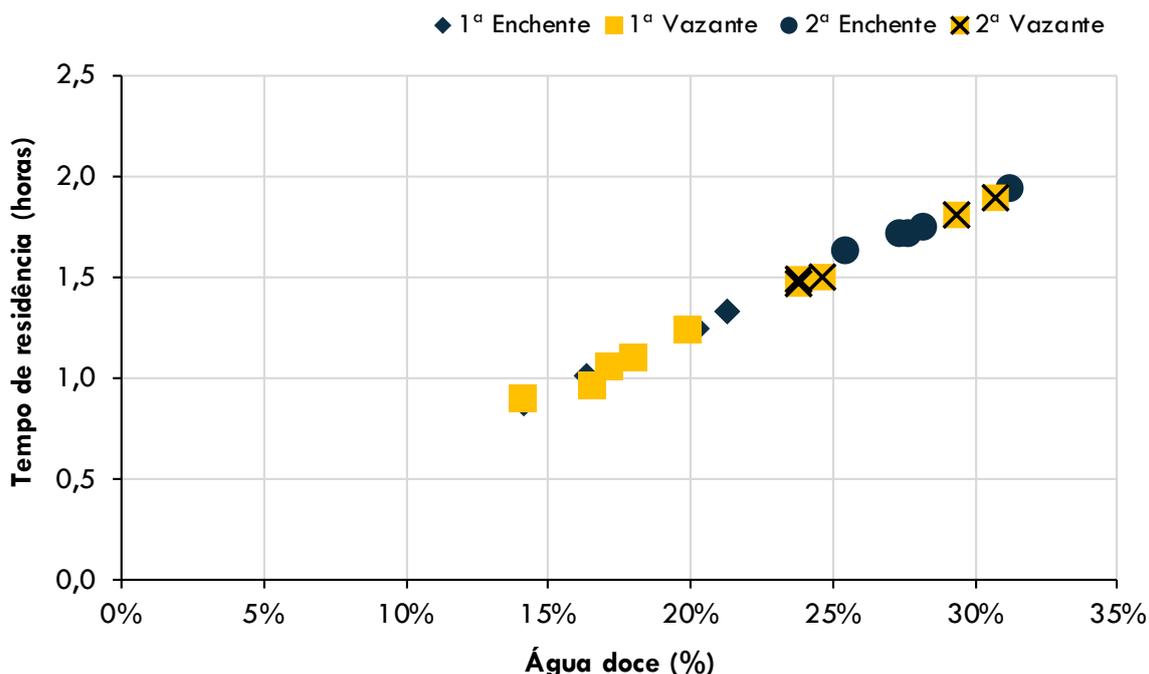


Figura 44. Gráfico de dispersão mostrando a relação entre o Tempo de Residência (T_R) e o Percentual de água doce (P_{ad}) para as cinco radiais ao longo do CPSL, durante a estação de chuva (1ª Campanha) e estação de fim da chuva (2ª Campanha), em maré enchente (azul) e vazante (amarelo).

Observa-se que o P_{ad} foi menor durante a estação de chuva, com percentuais que variaram na faixa de 14% a 21%, nas radiais 1 e 5, respectivamente, com média de 18% (Figura 45A) e tempo de residência de 0,9 a 1,3 horas durante a enchente (Figura 45B). Em relação aos valores mínimos e máximos na vazante, o percentual de água doce foi de 14% (radial 1) a 20% (radial 5) (Figura 45C) e T_R 's entre 0,9 e 1,2 horas, nas radiais 1 e 5, respectivamente, como mostra a Figura 45D, onde os maiores tempos e maiores percentuais ocorreram na parte mais interna do estuário.

Na estação de fim da chuva, os valores de percentual de água doce e tempo de residência da água foram maiores, como mostrou o gráfico da Figura 44, cujos valores de P_{ad} durante a enchente apresentaram mínima e máxima de 25% e 31%, na radial 3 e 5, respectivamente (Figura 46A) e T_R 's de 1,6 a 1,9 horas nas mesmas respectivas radiais (Figura 46B).

Durante a vazante houve uma pequena redução, com os percentuais de água doce variando entre 24% a 31% e T_R 's de 1,5 horas a 1,9 horas, ambos nas radiais 1 e 5, respectivamente (Figura 46C|D). Os maiores percentuais em maré enchente, indicam provavelmente que o P_{ad} foi resultado do barramento físico imposto pela maré. Além disso, pode-se observar que a radial 5 apresentou os maiores valores em maré enchente e vazante, provavelmente por sua localização mais estuário acima, área que recebe maior influência fluvial. Na estação de fim da chuva, o T_R

variou de 1,5 a 2 horas (Figura 46B |D), indicando que os maiores percentuais de água doce retornam maiores T_R 's, dada a influência da maré na região.

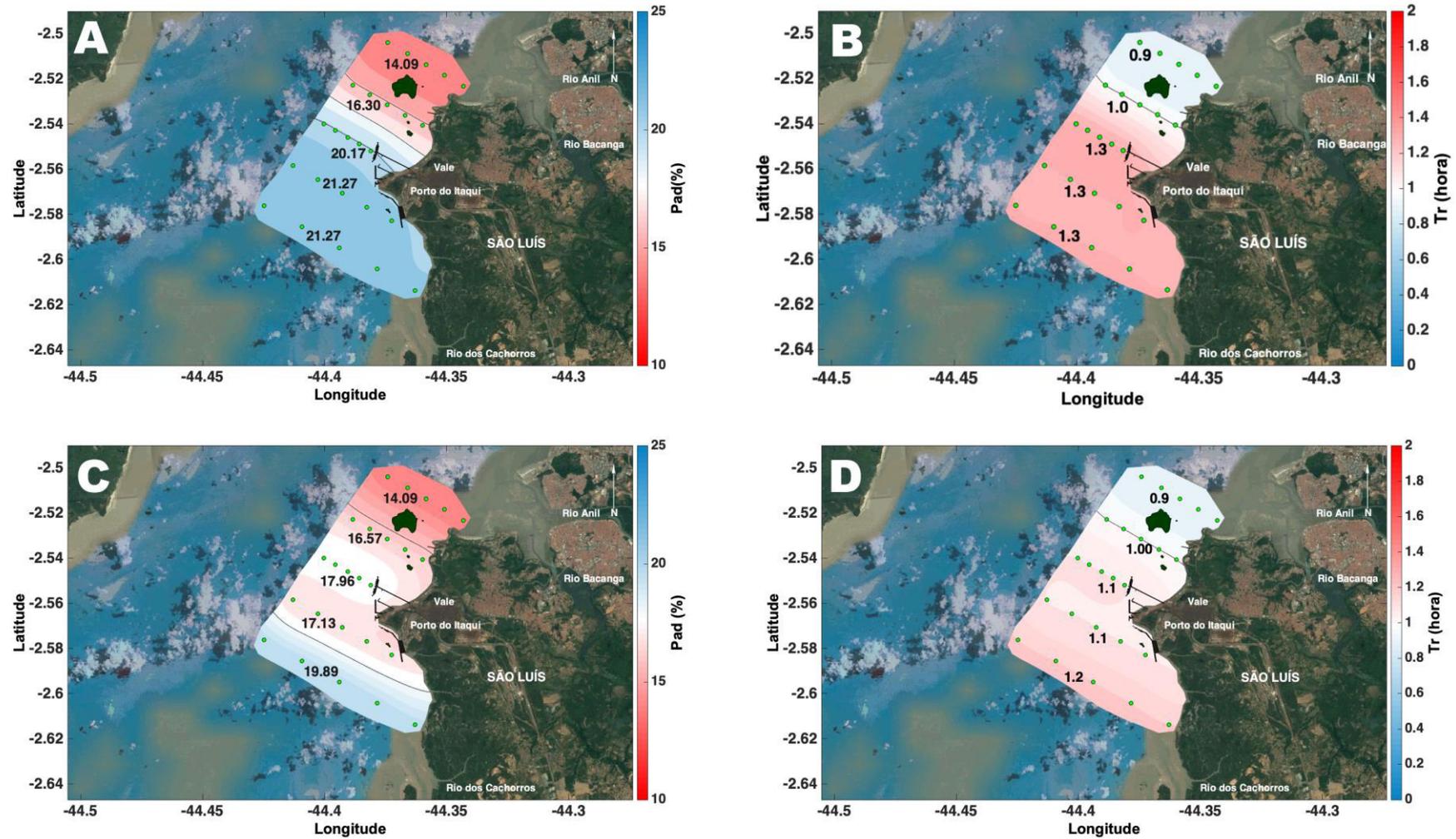


Figura 45. Distribuição Espacial do Percentual de água doce (%) em maré enchente (A) e maré vazante (C) e Tempo de residência (T_R) em maré enchente (B) e maré vazante (D) durante a estação de chuva (1ª campanha), ao largo do CPSL.

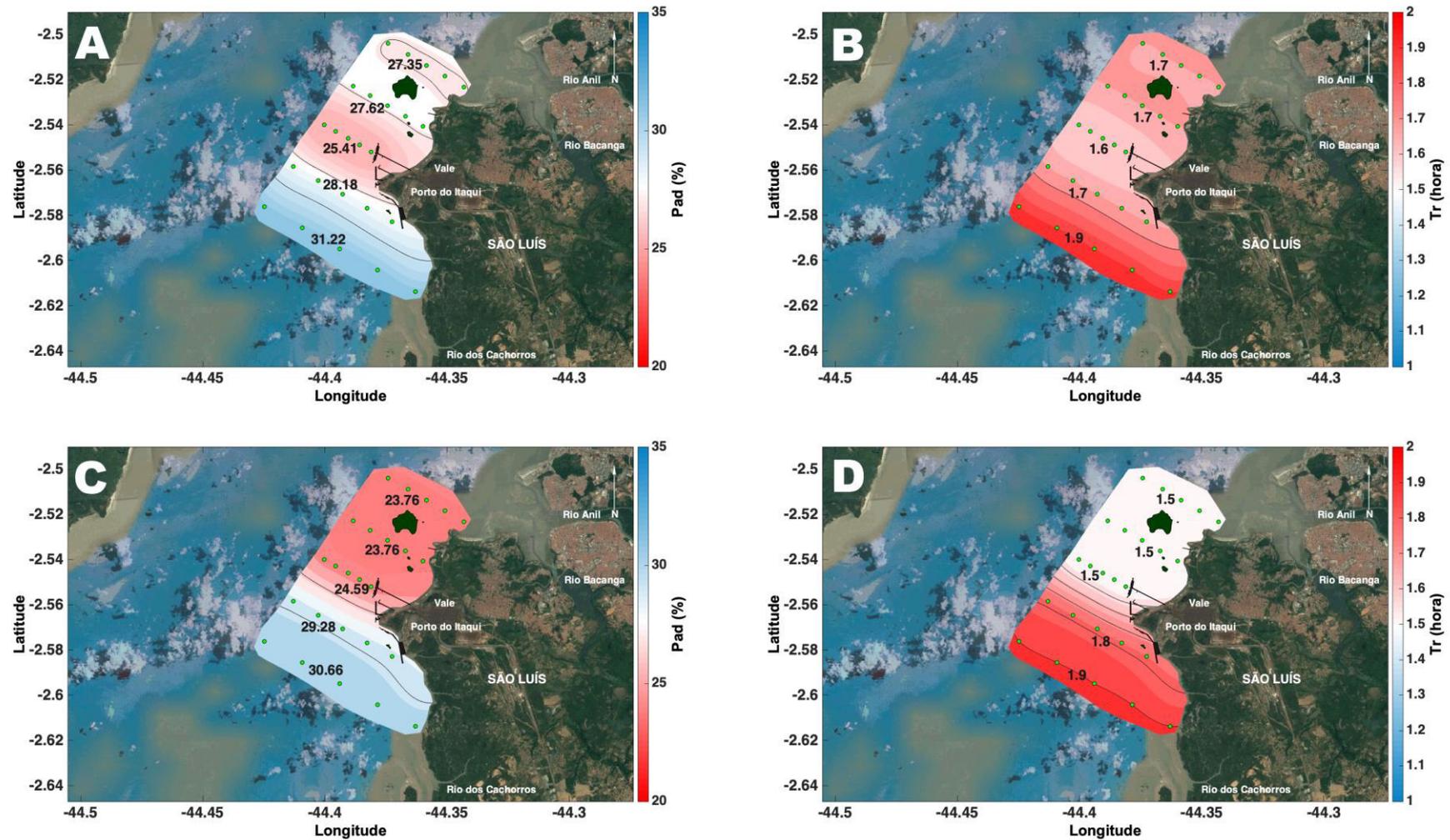


Figura 46. Distribuição Espacial do Percentual de água doce (%) em maré enchente (A) e maré vazante (C) e Tempo de residência (T_R) em maré enchente (B) e maré vazante (D) durante a estação de fim da chuva (2ª campanha), ao largo do CPSL.

6.8 FLUXOS DE MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO

6.8.1 ESTAÇÃO DE CHUVA

Durante a estação de chuva, a variação dos fluxos integrados de MPS ao longo das radiais do CPSL em maré enchente, foi entre 3904 Ton.h^{-1} (radial 5) a $128268 \text{ Ton.h}^{-1}$ (radial 4) (Figura 47), com valor médio de 54014 Ton.h^{-1} . Ao considerarmos os fluxos instantâneos das radiais 1, 2, 3 de forma integrada durante a fase de enchente, obtemos um transporte de $137897 \text{ Ton.h}^{-1}$, desta quantidade, grande parte chega a radial 4 (93 %), porém apenas 3% do material da radial 4 chega até a radial 5, a qual apresentou o menor valor ($39,04 \text{ Ton.h}^{-1}$), enquanto os outros 97% ficam retidos na radial 4, podendo estar sendo depositado e diminuindo a profundidade local.

Em maré vazante os fluxos de MPS apresentaram variação da ordem de 27024 Ton.h^{-1} (radial 2) a $4167,33 \text{ Ton.h}^{-1}$ (radial 5) (Figura 47), com média de $124399 \text{ Ton.h}^{-1}$. Observa-se que houve um comportamento inverso ao da maré enchente. Ao avaliarmos o maior valor do fluxo de MPS presente na radial 5, apenas 9% do material chega a radial 4, logo 91% ficou retido na radial 5, na parte mais interior do estuário. Comparando os valores médios de fluxo de MPS obtido durante as marés, observa-se uma diminuição de 57% em maré enchente. É importante ressaltar que as medições não são simultâneas, ou seja, houve momentos de diferentes intensidades das correntes ao longo da corrida da maré.

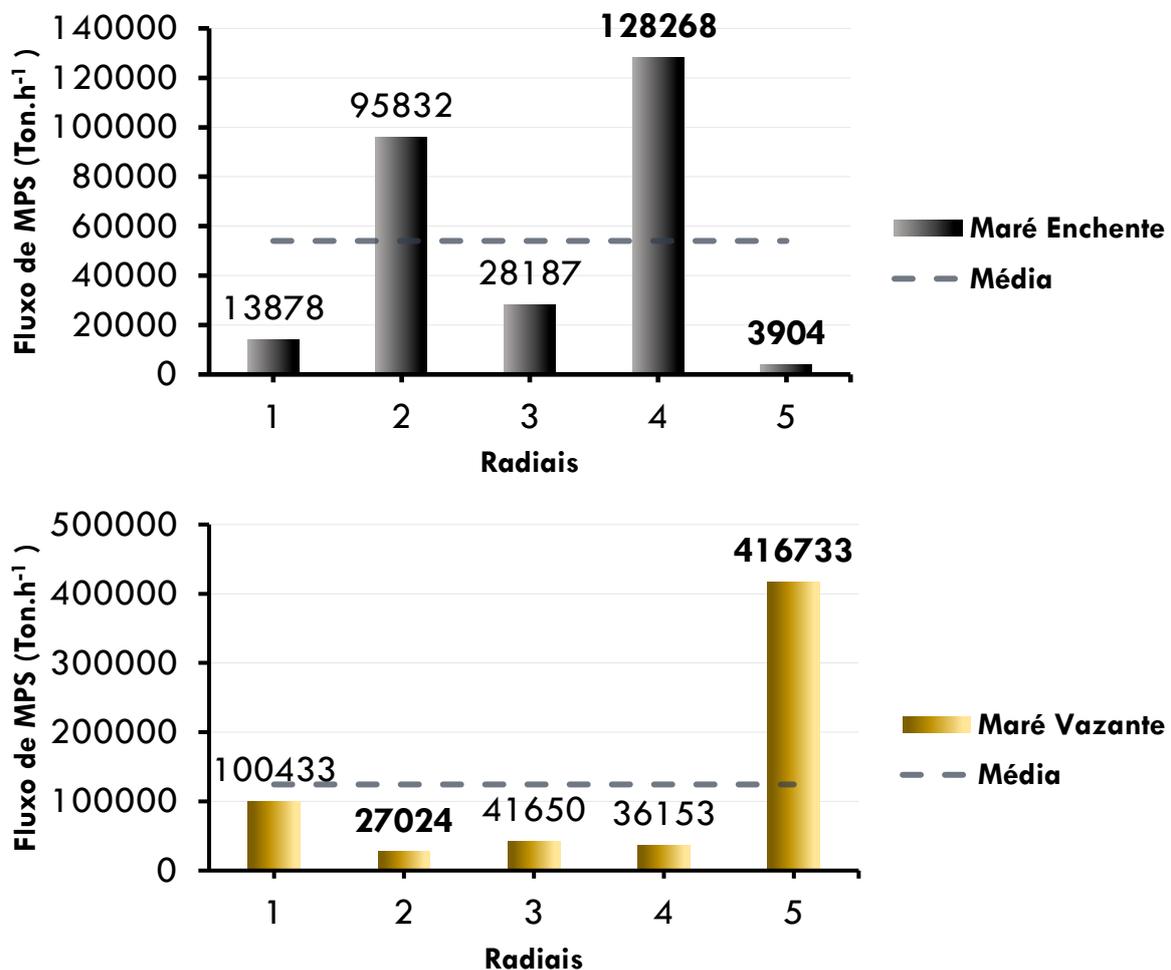


Figura 47. Evolução temporal dos fluxos integrais de MPS (Ton.h^{-1}) para cada radial ao largo do CPSL, durante a estação chuvosa – sob maré de sizígia, em maré enchente (preto) e vazante (amarelo).

6.8.2 ESTAÇÃO DE FIM DA CHUVA

A figura 48 mostra a evolução dos fluxos de mps durante a estação de fim da chuva (quadratura) e observa-se que os valores em Ton.h^{-1} foram menores em relação a estação de chuva (sizígia), corroborando com os dados de vazão. Durante a maré enchente a variabilidade observada foi de 20156 Ton.h^{-1} (radial 5) a 63292 Ton.h^{-1} (radial 1), com média de 45525 Ton.h^{-1} (Figura 48), ao considerarmos os fluxos instantâneos de MPS das radiais 3 e 4 de forma integrada (78221 Ton.h^{-1}), apenas 19% do material chega até a radial 5, ou seja, os outros 81% ficaram retidos entre as radiais 3 e 4, área em frente aos píer I e III (radial 3) e berços 100 e 101 de atracação (radial 4) pertencentes ao Porto do Itaqui. Em maré vazante, as descargas de mps foram da ordem de 12790 Ton.h^{-1} a $136977 \text{ Ton.h}^{-1}$, nas radiais 3 e 4, respectivamente, com valor médio maior que a enchente, de 74165 Ton.h^{-1} (Figura 48). Os fluxos instantâneos de mps observados em maré vazante apresentaram os maiores valores na radial 4 e 5, ao considerarmos a soma das respectivas radiais, o que equivale a $232089 \text{ Ton.h}^{-1}$, 94% do material em suspensão fica retido e apenas 6% é transferido para a radial 3. Em relação aos valores médios das descargas de mps, houve uma redução de 39% na maré enchente, em relação a vazante.

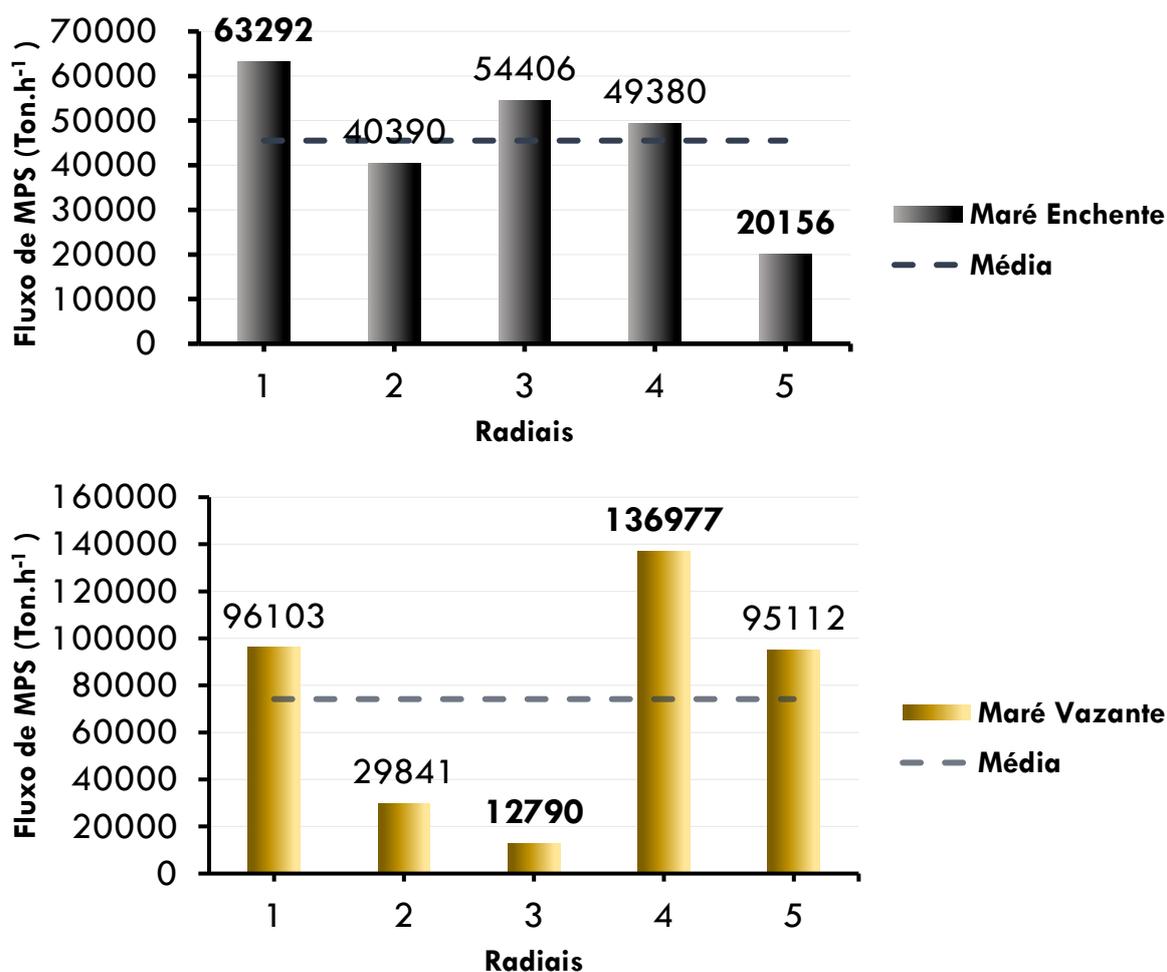


Figura 48. Evolução temporal dos fluxos integrais de MPS (Ton.h^{-1}) para cada radial ao largo do CPSL, durante a estação de fim da chuva – sob maré de quadratura, em maré enchente (preto) e vazante (amarelo).

7. DISCUSSÕES

A precipitação é um dos componentes do ciclo hidrológico que pode alterar o regime de descarga fluvial. Diante dos dados observados na região do Complexo Estuarino de São Marcos ao largo do Complexo Portuário de São Luís, os dados de precipitação pluviométrica para o ano de 2017 provavelmente não foram afetados por eventos climáticos de larga escala, o quadrimestre chuvoso foi apenas 2% abaixo da normal climatológica, porém o mês de aquisição de dados para o período chuvoso (março), esteve acima da média histórica, com intensidade dos ventos de 1 m s^{-1} . Já para o segundo semestre, a intensidade dos ventos foi maior ($\sim 2,5 \text{ m s}^{-1}$), pois segundo Santos, (2018b), as ondas que dominam a região do Complexo Estuarino de São Marcos são geradas por ventos locais, com alturas significativa e períodos de pico maiores durante o período seco (segundo semestre), em relação as do primeiro semestre (período chuvoso), pois a pista de geração de ondas é maior devido ao deslocamento da ZCIT para o Hemisfério Norte. A pluviometria de julho foi de aproximadamente 50% abaixo do mês de março e para o mês de agosto foi menor ainda, com menos de 5 mm, caracterizando a estação de fim da chuva (transição chuva/estiagem).

Os gradientes espaciais das variáveis de estado na estação de chuva de 2017, em maré de sizígia, mostraram com evidência a presença de águas mais salinas, com média de $\sim 30 \text{ g kg}^{-1}$ durante maré enchente e vazante. A estrutura salina durante o período de chuva apresentou concentrações elevadas para o período, podendo inferir que mesmo com a maior precipitação pluviométrica, a descarga fluvial não foi maior que a componente marinha durante a estação de chuva. A salinidade entre as radiais apresentou uma variação discreta, com maiores valores encontrados na radial 1, isso pode ser explicado devido a localização dos pontos (1 a 5), uma vez que, sua localização é na região mais aberta do estuário e são, portanto, mais influenciados pela entrada de água marinha, oriunda do oceano adjacente. Os valores encontrados para salinidade são similares aos identificados por Lefèvre et al., (2017), durante a estação chuvosa, em seus estudos no CESM, com valores de salinidade variando entre 30-35,5 g kg^{-1} .

Em relação ao Fundeio I, a média da salinidade foi de 31 g kg^{-1} e assim como na variação espacial, as águas foram classificadas como salinas segundo a resolução CONAMA 357. Pode-se observar que as concentrações de salinidade espacial e temporal durante a estação de fim da chuva, foram menores em relação ao período chuvoso, com média de 26 g kg^{-1} , evidenciando águas salobras, mesmo diante do baixo nível de precipitação pluviométrica nesse período. De acordo com LIMA, (2019) esse comportamento nas águas estuarinas do CESM está associado à descarga fluvial oriunda da bacia de drenagem no fim da estação chuvosa. Águas mais salinas durante os meses de março (climatologicamente chuvoso) e águas salobras durante julho-agosto (final da

chuva), denotam um atraso temporal da razão chuva/vazão. Em estudo realizado por Lefèvre et al., (2017) para o CESM durante a estação de fim da chuva, a variação de salinidade ao longo de todo estuário, durante o período de fim de chuva, foi maior que a do presente estudo, com salinidade em torno de 32 (P1) à 36,42 g kg⁻¹ (P7) em um transecto correspondendo à estação 1 no CESM, próximo à cidade de São Luís, a última estação, localizada na PCM antes da isóbata de 50 m.

Para este estudo, durante a estação de chuva, os valores de temperatura estiveram dentro da faixa para ambientes estuarinos de baixa latitude, com média de 28 °C em maré enchente e 29°C em maré vazante. Para os estuários localizados em baixas latitudes, assim como o CESM, a temperatura das águas varia entre 26 e 30°C (SOUSA; CUNHA & NUNES, 2013). Geralmente, a temperatura no estado do Maranhão varia pouco e o clima é quente ao longo do ano (RODRIGUES et al., 2016). Corrêa et al., (2019) em seus estudos no CESM, mostrou que a temperatura da água esteve acima de 28 °C, resultante da mistura das massas de água costeira e continental, segundo os índices propostos por Dias et al., (2013). Os dados de temperatura analisadas por Santos (2018) no CPSL, corroboram com os deste estudo, pois a amplitude térmica não foi superior a 2°C. Os valores médios da temperatura da água corroboram com os de Piratoba et al., (2017) para o período chuvoso (entre 29,4 e 30,1°C), realizado na área portuária de Barcarena, PA.

Os resultados do Fundeio I mostram a relação de temperaturas mais baixas associadas às maiores salinidades. Esse mesmo comportamento foi abordado nos estudos de Santos, (2018) no Complexo Estuarino Arraial São José-CEASJ, que apresenta ligação com o CESM, através do Estreito dos Mosquitos, onde apresentou temperaturas médias variando ao longo do ciclo completo de maré entre 29,5 a 29,9°C durante a estação de chuva sob ótica *Euleriana*. Lima, (2019) em um fundeio situado ao norte do CESM, salientou a maior influência de águas mais frias e salinas/densas, caracterizando a intrusão de águas costeiras, oriundas da plataforma continental adjacente (DIAS; CASTRO; LACERDA, 2013). Ao avaliarmos as variáveis de estado encontradas neste estudo, foi observado um ligeiro aquecimento das águas durante a estação de fim da chuva, quando comparado a estação chuvosa. Essas diferenças reportadas anteriormente, podem estar associadas a redução na estação de chuva e aumento no fim da chuva, dos fluxos fluviais no sistema estuarino, uma vez que águas continentais são devidamente mais quentes do que as marinhas. A partir desses dados, nota-se uma maior influência dos fluxos fluviais no sistema estuarino durante o final da chuva, em relação ao mês com elevada precipitação pluviométrica em São Luís, logo, esse cenário infere que isto é fruto do atraso do volume hídrico precipitado sobre as bacias hidrográficas até desagurem no CESM, já que o período de 2017 pode ser considerado quanto ao volume de chuvas, como ano de comportamento médio, onde foram observados dados

de precipitação pluviométrico significativos, no primeiro semestre (1.490 mm) e no segundo semestre, uma grande redução da precipitação (6,60 mm).

Os níveis de temperaturas encontradas neste estudo durante o segundo semestre foram mensurados em outros estuários de regiões tropicais, como em Cordeiro, (2017) na região interna do porto de Suape, localizado no litoral sul de Pernambuco, durante o período de estiagem. Assim como em Carvalho et al., (2010) em seus estudos no estuário do rio Bacanga na ilha de São Luís, com a estrutura térmica vertical variando entre 29 a 32 °C e em um estuário tropical de micromaré localizado no sul da Índia, com temperatura de $28,9 \pm 2$ °C (JAYACHANDRAN; BIJOY NANDAN & SREEDEVI, 2012). Portanto, as águas dos estuários da Ilha do Maranhão costumam apresentar estabilidade térmica tanto espacial quanto sazonal.

Em relação as concentrações de OD deste estudo, a abordagem espacial e temporal apresentou média de $\sim 200,00 \mu\text{mol kg}^{-1}$ durante a estação de chuva, provavelmente atreladas ao movimento do fluxo e refluxo da maré que promovem oxigenação (BATOS et al., 2005; WEBB et al., 1980), também pela maior atuação dos ventos nos processos de trocas difusivas entre a atmosfera e a água e/ou processos fotossintéticos, visto que as maiores concentrações foram próximas à superfície da coluna d'água. De acordo com Sem-Gupta & Machaincastillo, (1993), em águas marinhas a taxa de oxigênio dissolvido pode variar entre 0 a $243,92 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (0 a 8 mg L^{-1}), sendo mais comum a variação entre $30,49$ e $182,94 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (1 a 6 mg L^{-1}). Em seus estudos no CEASJ-MA durante o período chuvoso, Azevedo, (2019) obteve concentrações que variaram de $152,83$ a $220,90 \mu\text{mol kg}^{-1}$, em um comportamento espacial, com menores valores nos perfis internos do estuário e o aumento gradual em direção ao oceano adjacente. Os valores médios de OD reportados por Santos, (2018), foram de $146,28$ e de $122,76 \mu\text{mol kg}^{-1}$, nas águas estuarinas do CESM. Tendência semelhante aos deste estudo também foi relatada por Abowei, (2010) sobre as condições nas águas do rio Nkoro-Nigéria, com valor médio de $182,94 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (6 mg L^{-1}) durante o período chuvoso. Em estudo realizado por Dias (2007) no estuário do Rio Jaguaribe durante o período chuvoso foram observados valores entre 97 - $204 \mu\text{mol kg}^{-1}$, corroborando com os encontrados neste estudo. Lima, (2019) também observou valores elevados de OD em um ciclo de maré de 13 horas, ao norte do CESM, com mesma ordem de grandeza, durante o período chuvoso. Santos, (2011) encontrou concentrações mais elevadas durante um ciclo de doze horas em um sistema estuarino situado no sudeste do Brasil, com média de $307,34 \mu\text{mol kg}^{-1}$.

Durante a estação de fim da chuva, as concentrações de OD também foram altas, com valores superiores a $200 \mu\text{mol kg}^{-1}$, apesar de suas elevadas cargas de MPS e matéria orgânica dissolvida/particulada oriundas principalmente dos manguezais próximos (CORRÊA et al., 2009) Essas concentrações caracterizam esse ambiente como bem oxigenado, pois os processos

anaeróbicos são relevantes apenas quando os níveis de oxigênio na água são inferiores a $121,96 \mu\text{mol kg}^{-1}$ (4 mg L^{-1}) (ESTEVEES, 1998). Ao longo do presente estudo, os níveis de oxigênio foram praticamente homogêneos na área do CPSL, porém os maiores níveis foram encontrados na superfície, que apresentam esse comportamento evidenciando a entrada de uma massa de água mais fria, salina e com níveis elevados de oxigênio, sugerindo a intrusão da água marinha e uma maior troca com a atmosfera. Duarte dos Santos et al., (2017) em seus estudos no estuário do rio Bacanga, durante a estação de fim da chuva, encontrou valores semelhante aos desse estudo ($198,79 \mu\text{mol kg}^{-1}$). No estuário do rio Jaguaribe, as concentrações de OD mensuradas por Cavalcante (2015) foram de $152,45$ a $243,92 \mu\text{mol kg}^{-1}$ e o autor também relacionou aos processos de mistura gerados pela maré e ventos, que promovem a oxigenação das águas, sendo mais intensos em maré vazante.

Os dados de MPS encontrados neste estudo durante a estação chuvosa, apresentaram concentrações que chegaram a 550 mg L^{-1} . O padrão observado do MPS, durante esse período provavelmente apresenta fontes distintas, pois máximas concentrações foram observadas nos dois níveis de profundidade. As altas concentrações de MPS na camada superficial pode se dar ao transporte feito pelo vento (aerossóis), o que aumenta a concentração desde material na região e junto ao fundo a ressuspensão de sedimento depositados no leito do estuário é devido a ação das correntes. Para a variação espacial a média na primeira e segunda campanha foi de 240 e 150 mg L^{-1} , respectivamente, sempre com maiores valores durante a enchente e tanto na variação espacial quanto temporal as concentrações de fundo se destacaram. Na abordagem temporal, maiores concentrações foram observadas durante o Fundeio II, com média de 210 mg L^{-1} e máximo de 240 mg L^{-1} . Os valores de MPS observadas na região do CPSL durante a abordagem espacial, mostraram uma pluma com dispersão contínua fluindo na direção sul, sentido ilha do Medo durante a enchente e na direção norte na vazante, mostrando que a hidrodinâmica da região rege os níveis de concentração de mps na coluna d'água. Os maiores valores estiveram concentrados nas radiais 4 e 5 durante a fase de enchente, porém essas mesmas radiais apresentaram maiores valores de mps durante a vazante, o que sugere que esse material está sendo retido no estuário.

O CPSL é 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. Porém, a maré e o vento atuantes nessa região, são as variáveis possibilitam que o transporte e a mistura do MPS sejam feitos ao longo da coluna d'água.

As concentrações mensuradas neste estudo corroboram com os dados de Corrêa et al., (2019), que nas águas superficiais do CESM encontrou valores de $59,95$ a $541,47 \text{ mg L}^{-1}$ e no fundo de $77,17$ a $750,18 \text{ mg L}^{-1}$. Luz Santos (2018) em seus estudos no CESM encontrou valor

médio de 332,48 mg L⁻¹ e de 109,9 mg L⁻¹ em um estuário de macromaré da região, que desagua no CESM. Feitosa (1996) e Garlipp (2008) analisaram a variação temporal do MPS e encontraram valores variando entre 65,6 mg L⁻¹ e 74,8 mg L⁻¹ no estuário do rio Goiana-PE e entre 18,4 mg L⁻¹ a 70,5 mg L⁻¹ no estuário do rio Curimataú-RN, na estação seca e chuvosa, respectivamente.

Concentrações de sólidos em suspensão estão relacionadas às variações nas forças oceanográficas, como marés e correntes, que condicionam alterações temporais na textura do substrato; ou mudanças espaciais nas feições deposicionais; ou em virtude das condições climáticas da região (seca ou chuva), que influenciam no maior ou menor aporte fluvial no sistema; ou ainda, relacionado aos processos de remobilização de material anteriormente depositado no fundo, que pode contribuir com altas concentrações de MPS. A Tabela 9 mostra vários trabalhos no Brasil e no Mundo que têm promovido informações sobre a concentração de sólidos em suspensão.

Tabela 9. Quantificação de MPS em vários sistemas a nível global.

Autores	Local	Concentração de MPS
AMOS (1996)	BAÍA DE FUNDY	3500,00 mg L ⁻¹
FRAMINÂM & BROWN (1996)	RIO DA PRATA	200,00 mg L ⁻¹
BRANDLEY & PHILIP (1999)	ESTUÁRIO ANNAN - AUSTRÁLIA	3,00 a 115,00 mg L ⁻¹
DIAS (2005)	ESTUÁRIO DO RIO JAGUARIBE	7,06 a 608,00 mg L ⁻¹
MIRANDA (2012)	ESTUÁRIO DO RIO CAETÉ	190,00 a 461,00 mg L ⁻¹
MONTEIRO (2009)	RIO PARACAUARI	12,14 a 115,66 mg L ⁻¹
FERREIRA (2013)	RIO PARACAUARI	7,10 a 145,70 mg L ⁻¹
BIGGS, 1987	ESTUÁRIO DO RIO AMAZONAS	2000,00 mg L ⁻¹
SILVA DA COSTA (2014)	RIO JACARÉ GRANDE	22,00 a 178,00 mg L ⁻¹
SILVA DA COSTA (2014)	RIO PARÁ	8,00 a 114,40 mg L ⁻¹
SILVA DA COSTA (2014)	RIO TOCANTINS	6,4 a 112,8 mg L ⁻¹
SOUZA ET AL., (2003)	BACIA INFERIOR DO RIO SÃO FRANCISCO	13,00 a 90,00 mg L ⁻¹
ZHANG ET AL., (2007)	ESTUÁRIO CHANGJIANG (RIO YANGTZE)	1500 a 3000 mg L ⁻¹

Ao compararmos as concentrações de MPS encontradas durante a estação de chuva neste estudo, com as concentrações de outros sistemas estuarinos brasileiros, observa-se a mesma ordem de grandeza nas concentrações reportadas por Almeida et al., (2007) para o rio Paraíba do Sul, onde apresentou variações de MPS sazonais, com maiores valores durante a estação chuvosa (59,1 mg L⁻¹). Gomes (2015), em seus estudos em um estuário do setor nordeste da Zona Costeira Amazônica-PA, com concentrações médias de 210 mg L⁻¹ e maiores valores na enchente (410 mg L⁻¹).

A variabilidade nas concentrações de MPS a nível global se altera de acordo com as características de cada ambiente, como no Atlântico Norte, a variação de MPS vai de 0,04 a 1,60 mg L⁻¹, observado por Manheim et al., (1970) e Emery et al., (1974), podendo chegar a 3500 mg

L^{-1} na baía de Fundy, leste do Canadá (AMOS, 1996). No litoral do Pacífico Norte, as concentrações de MPS podem variar de 3,0 a 80,0 $mg L^{-1}$ (UNCLES & SMITH, 2005) e em proporções menores, de 0,03 a 0,94 $mg L^{-1}$, nas águas costeiras do Mediterrâneo (FREITAS & ABRANTES, 2002). No Atlântico Sul, as concentrações de MPS variam de 200 $mg L^{-1}$, no estuário do rio da Prata (FRAMINÁN & BROWN, 1996), podendo chegar a 2000 $mg L^{-1}$, no estuário do rio Amazonas, de acordo com Biggs, (1987). Os valores de mps observados para estuários tropicais são superiores aos observados em estuários de clima temperado (com exceção da baía de Fundy). Entretanto, estão na mesma ordem de grandeza das concentrações de mps observados no Atlântico Sul, estando os maiores valores relacionados à intensificação dos processos erosivos ocorridos em cada região e ao *runoff* superficial, que no período de maior deflúvio, carrega uma maior quantidade de materiais.

Com base nos resultados dos diagramas TS para as estruturas térmicas e salinas observadas na região do CPSL, houve dois cenários distintos, evidenciando a estação chuvosa, com a presença de água costeira (AC) e a estação de fim da chuva com presença de uma água estuarina (AE). Quanto a abordagem temporal, ao longo das 13 horas de amostragem no Fundeio I, observou-se águas com características de AC. Na estação de fim da chuva, foi observado um aumento dos volumes fluviais no sistema estuarino, com valores de salinidade menor e a presença de uma massa de água de rio (AE) com suas respectivas isopícnais menores que 16 ($\sigma_t < 16$), mais quentes e menos salinas, mostrando a competência das bacias de drenagem em diluírem a AC presente neste ambiente.

Os diferentes cenários durante o período chuvoso e final do chuvoso abordados neste estudo, corroboram com os encontrados por Lefèvre et al., (2017), em estudos realizados nas águas do CESM, durante o período de estiagem, sendo observadas características de águas mais frias e mais salinas, neste trabalho os autores abordam que existe uma variação sazonal da isohalina que delimita a frente estuarina (30 $g kg^{-1}$), que durante a estação chuvosa, a frente estuarina localiza-se na região ao largo do CPSL, enquanto que durante a estação de fim da chuva, a frente estuarina encontra-se 40 km estuário a dentro. A distribuição apresentada nesse trabalho é uma clássica distribuição de massas de água em sistemas estuarinos, como descrita por Miranda, Castro e Kjerfve (1998 e 2002).

Quanto a variação espacial do campo de correntes, as maiores intensidades foram na ordem de 2,30 $m s^{-1}$, durante a estação de chuva e fim da chuva, com as velocidades longitudinais sendo as mais energéticas, também apresentando valor máximo da ordem de 2,30 $m s^{-1}$. As radiais 2 e 3, em frente ao Pier IV foram as que apresentaram as maiores velocidades nos dois períodos sazonais. Os vetores das correntes apresentam um caráter giratório devido a presença do contorno sólido

que ocasionou a refração do campo de correntes, cujas intensidades diminuíram em direção ao fundo. Em relação a abordagem temporal, as correntes de vazante foram mais intensas, tanto durante o período chuvoso, na ordem de $1,56 \text{ m s}^{-1}$ e durante a estação de fim da chuva com $1,13 \text{ m s}^{-1}$. Valores obtidos da literatura (FISHER et al., 1979; PEREIRA; WAINER, 2014; AMARAL; ALFREDINI, 2010; BÖCK; ASSAD; LANDAU, 2010), não ultrapassam $2,60 \text{ m s}^{-1}$. Nos estuários, os processos de escoamento assumem características bastante complexas. A oscilação natural do nível do mar e as correntes de enchente e vazante são as características mais notáveis dos movimentos da água nestas regiões (MIRANDA et al., 2002). Os resultados de correntes observadas durante a maré vazante foram bastante representativos e característicos de estuários de macromaré, com uma das maiores amplitudes de marés do Brasil (Souza Filho, 2005) e uma dinâmica que vem sendo estudada para a geração de energia (González-Gorbeña et al., 2015). GOMES et al., (2013) em seus estudos no estuário Caeté, localizado no nordeste paraense, verificaram intensidades menores, durante o segundo semestre do ano (período seco) a velocidade de corrente foi maior durante a maré vazante ($1,14 \text{ m s}^{-1}$).

A instabilidade na coluna d'água durante a estação de chuva mostrou que em 84% do ciclo de 13 horas o Ri_L foi abaixo de 2, indicando uma mistura total na coluna d'água, ou seja, a diferença de salinidade entre o fundo e a superfície foi pequena, caracterizando o estuário como bem misturado, atrelado a velocidade residual de $0,05 \text{ m s}^{-1}$. Mesmo com os dois momentos em que Ri_L variou de 2 a 20, correspondendo aos períodos de estufa de maré e indicando uma maior mistura, não foi observado uma estratificação acentuada com a presença da haloclina, mostrando que a turbulência é suficiente para não gerar uma estratificação acentuada.

De acordo com Mantovanelli et al., (2004), as correntes de maré são as principais atuantes nos processos de mistura e estratificação, ficando secundariamente a descarga de água doce. Além disso, em momentos de maré de sizígia (Fundeio I), há um aumento nas velocidades das correntes devido ao aumento da amplitude da maré, colaborando para o aumento dos processos de mistura. Esse comportamento foi evidenciando no diagrama, que mostrou a classificação do estuário durante a estação de chuva do tipo 1a, ou seja, bem misturado e fracamente estratificado, com a predominância de 100% do processo de difusão turbulenta em relação ao processo e advecção. Pereira et al. (2010) classificou o estuário do rio Caravelas, localizado no extremo sul da Bahia, também como bem misturado e fracamente estratificado (1a). De acordo com Levinson (2010), esse tipo de estuário apresenta a velocidade residual com o sentido de saída do estuário, em toda a coluna d'água e isso foi verificando neste trabalho durante o Fundeio I, a velocidade residual foi no sentido de saída do estuário, predominância das correntes de vazante. O grau de estratificação vai depender nível de energia disponível para gerar mistura na coluna d'água, ou seja, há uma

associação do grau de estratificação com a turbulência gerada pela maré (BARRETO; SCHETTINI, 2014).

Como, nesse tipo de estuário, a maré tem um efeito maior, modulador, os perfis longitudinais de salinidade apresentaram isohalinas praticamente verticais, ou seja, a estratificação vertical é pequena, com isso, o fluxo vertical de sal é muito pequeno e a mistura ocorre, principalmente, na direção longitudinal (DYER, 1973 apud MIRANDA, CASTRO, KJEFVE, 2002).

Diante do cenário de fim das chuvas, o número de Richardson foi acima de 2 em 35% do ciclo de 26 horas na coluna d'água e abaixo de 2 nos outros 65% do tempo. A presença mais acentuada de Ri_L maiores que 2 foi observada nos instantes de estufa da maré, onde as velocidades ficam próximas de zero, e há uma menor mistura turbulenta, além das amostragens serem realizadas em maré de quadratura, ou seja, marés com menores amplitudes, no qual a velocidade residual foi de apenas $0,003 \text{ m s}^{-1}$ (praticamente nula). Com essa diminuição na velocidade das correntes, os processos de mistura dão lugar aos advectivos, gerando uma maior estabilidade vertical, possibilitando assim que as estratificações ganhem evidência, o que corrobora com a classificação do tipo 2a para o Fundeio II, coincidindo com resultados encontrados por outros autores (D'Aquino et al., 2011; Garonce e Quaresma, 2014; Pereira et al., 2010; Alves, 2018), que mostraram a mesma diferença em sizígia e quadratura.

A Descarga fluvial e a deriva de Stokes foram as componentes principais e mais significativas do transporte de sal no CESM, mesmo com a componente fluvial mostrando sentido estuário acima no Fundeio I e Fundeio II, o transporte integrado durante os ciclos mostraram que o estuário funcionou como exportador de sal.

O CESM é um estuário bastante dinâmico e durante a estação de chuva, a sua vazão média estuarina estimada foi da ordem de $5,39 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ com valores mais altos durante a vazante, da ordem de $19,6 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Para a estação de fim da chuva os dados médios de vazão foram $4,42 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, também com máximo na vazante ($7,87 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Essa discrepância entre os máximos das vazões é provavelmente devido ao aporte de chuvas da estação de chuva durante o ano de 2017. A exemplo de outros rios/estuários da região, existe uma forte sazonalidade da vazão, em resposta à variação sazonal do regime de chuvas (Asp et al., 2013). Isso ocorre no estuário do rio Gurupi, esta variação implica numa vazão cerca de 7 vezes maior no período de chuvas (abril/maio $\sim 1.123 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), em comparação ao período de seca (outubro/novembro $\sim 155 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), conforme o trabalho de

Quando comparamos as vazões encontradas neste estudo durante a estação de chuva, com vazões observadas em estuários de macromaré, como o estuário do rio Amazonas, que descarrega

em torno de $1,8 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e do rio Araguari no Amapá $4,0 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, observamos que os valores deste estudo são apenas uma ordem de grandeza menor em relação ao Amazonas e uma ordem de grandeza maior que as do rio Araguari, respectivamente. (OLTMAN, 1968; MULLER-KARGER et al., 1988; CUNHA et al., 2014). Mattos et al., (2016) em seus estudos no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), principal estuário do litoral paranaense apresentou vazões menores as encontradas no CPSL, cerca de $10,1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ durante o primeiro semestre do ano.

Valores próximos também foram observados durante o período chuvoso por Cunha et al., (2014) para o rio Araguari, um dos maiores rios genuinamente amapaense ($4036 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), também influenciados por macro maré, é uma ordem de grandeza menor que as observadas no CPSL. Nos estudos de Souza et al., (2011) em três bacias de drenagem na costa leste do Brasil, durante o período chuvoso dos anos de 90/99, foram observadas vazões de $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e $3000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para os rios Doce e São Francisco, respectivamente. O rio Amazonas, também influenciado por macro maré, apresenta vazões de uma ordem de grandeza maior que os deste estudo ($2,2 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), para estação de chuva (GEYER et al., 1996).

Em seus estudos no CPSL, Santos (2018) apresentou vazão da ordem de $1,03 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na área a qual representa a radial 5 deste estudo, comparando os valores, houve uma redução de 82% da vazão em relação a encontrada neste estudo, durante o período de fim da chuva e sob maré vazante. Ao compararmos as vazões obtidas neste estudo com os apresentados por Dias et al., (2011) para um estuário de mesomaré localizado no semiárido brasileiro, observamos que os valores médios em relação ao largo do CPSL são quatro ordens de grandeza menores ($72,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) durante o segundo semestre. Ao compararmos as vazões deste estudo com as encontradas por Silva (2016), no estuário do rio Buranhém, de micromaré localizado no sul da Bahia, observamos que as vazões durante o final da estação chuvosa são de $14,31 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, quatro ordens de grandeza abaixo das encontradas neste estudo. Já no baixo estuário do rio Goiana-PE/PB, a vazão para o final da estação de chuva é duas ordens de grandeza menor ($1,76 \times 10^2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) e durante a chuva é $4,05 \times 10^2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). O que difere estes ambientes e suas vazões, são o tipo de clima que cada estuário está inserido, como tropical úmido, semiárido para os estuários dos rios São Francisco e Jaguaribe e Amazônico para os rios Araguari e Amazonas, o que implica em fluxos fluviais completamente distintos.

O Volume de Água Total (V_T) para a estação de balanço hídrico positivo apresentou valor médio de $1,20 \times 10^9 \text{ m}^3$ de água e valor máxima de $1,72 \times 10^9 \text{ m}^3$ na enchente e $4,37 \times 10^9 \text{ m}^3$ na vazante, atrelados a percentuais de água doce de 21,27% e 19,89%, respectivamente. Para a estação de fim da chuva, o V_T foi mais baixo, com valor médio de $9,86 \times 10^8 \text{ m}^3$ e máximos em enchente e vazante e P_{ad} 's iguais a $1,60 \times 10^9 \text{ m}^3$ e $1,76 \times 10^9 \text{ m}^3$ e 31,22% e 30,66%, respectivamente.

Ao compararmos o volume de água total mensurado nos estudos de Santos (2018) para a mesma região do CPSL durante o fim da chuva em maré vazante, percebemos que houve uma redução de 50% em relação ao valor médio deste estudo e uma redução de 4% em relação ao percentual de água doce.

O tempo de residência em ambas as marés e períodos sazonais não foram superiores a 2 horas, com média de 1,2 horas durante a estação de chuva e fim da chuva, indicaram uma maior permanência de substâncias orgânicas e inorgânicas durante o ano de 2017, fato corroborado pelos gradientes horizontais de percentual de água doce, que foi maior durante o período de fim de chuva, chegando até 31%. Diante dos resultados deste estudo, não é possível inferir quando o vetor fluvial influencia diminuindo o tempo de residência, no entanto Santo et al., (2018) em seus estudos no CEASJ, mostram que para Pad's até 65% os T_R podem atingir até 5 horas e pad's menores que 60%, os T_R 's apresentam uma média de 2 horas, esse comportamento sugere que para os sistemas estuarino da região maranhense, o ponto de inflexão é um percentual de água doce de 60%.

Além da importância hidrodinâmica, as marés são fundamentais a respeito da ecologia e qualidade de água de um ambiente. Os movimentos oscilatórios das marés podem agir tanto em sentido de auxiliar na expulsão de poluentes da zona costeira; quanto o inverso, proporcionando que o poluente se conserve por mais tempo no local. Kreeke (1988), atenta para a importância das marés em relação ao tempo de residência de regiões estuarinas: “as correntes em estuários e canais estreitos fluem predominantemente numa única direção, no sentido do continente por metade do ciclo de maré (enchente) e no sentido inverso na outra metade do ciclo (vazante). Esse movimento tem uma séria implicação no tempo de residência de poluentes dispostos em estuários e na deposição dos sedimentos, já que esses constituintes podem retornar com a maré enchente”.

Dias et al., (2005), observaram que o tempo residual das águas estuarinas do rio Jaguaribe (CE), em períodos de grandes deflúvios, variaram de 12 horas a 13 dias, mostrando forte dependência dos padrões de circulação e da vazão hídrica total para a região. E que um dos fatores determinantes do tempo de residência, são as vazões, que podem ou não apresentar competência para o rompimento da barreira física imposta pelo regime de marés. O tempo de residência de uma dada região varia de acordo com as condições de circulação encontradas em cada ambiente. Nos estuários das regiões de clima temperado o T_R pode variar de 1 a 8 dias, podendo chegar a 12 dias de acordo com o padrão de circulação atuante em cada região (GÓMEZ-GESTEIRA et al., 2003; WANG et al., 2004; JOUON et al., 2006). Em Baías, como a do Espírito Santo, o T_R pode variar entre 10 e 21 dias, devido a efeitos deflectivos das correntes, segundo Gaze, (2005). Nos meses de pouca ou nenhuma precipitação, onde o percentual de água doce (PAD) é mínimo, prevalece o

domínio de águas marinhas, que facilita a entrada e saída de massas d'água do sistema estuarino, diminuindo o T_R das águas estuarinas (DIAS et al; 2007)

Ao compararmos os valores de fluxos médios de TSS obtidos neste estudo, as descargas observadas por Almeida et al., (2007), em um estuário de micromaré situado no rio Paraíba do Sul (Rio de Janeiro), temos que os fluxos são de três ($1,4 \times 10^1 \text{ Ton.h}^{-1}$) ordens de grandeza maiores em relação aos observados para as estações de chuva.

O cálculo do transporte de MPS em uma seção transversal é fundamental para se compreender a capacidade de exportação e importação de materiais para a região costeira (Dyer et al. 1973). O valor de fluxo médio durante a estação de chuva deste estudo foi da ordem de $540,14 \text{ Ton h}^{-1}$ com máximo de até $1282,68 \text{ Ton h}^{-1}$ durante maré enchente e valor médio e máximo de $1243,99 \text{ Ton h}^{-1}$ e $4167,33 \text{ Ton h}^{-1}$ durante a fase de vazante. O fluxo médio para a estação de fim de chuva foi da ordem de $455,25 \text{ Ton h}^{-1}$, chegando ao valor máximo $632,92 \text{ Ton h}^{-1}$ em maré enchente e durante a vazante, apresentou média de $741,65 \text{ Ton h}^{-1}$ e máxima de $1369,77 \text{ Ton h}^{-1}$. Diante dos elevados valores, foi possível observar que nas radiais 4 e 5 houve uma grande quantidade de mps retido, cerca de 90% do material não é exportado para fora do estuário durante a fase de vazante. O balanço de cargas evidencia esse comportamento, mostrando que as respectivas radiais mostraram valores negativos, isso implica em comportamento importador.

Se os fluxos de TSS do CPSL, forem comparados aos fluxos de ambientes dominados por mesomaré, nos estudos encontrados por Medeiros et al., (2011) e Dias et al., (2011) para os estuários dos rios São Francisco (AL) e Jaguaribe (CE) nas estações de chuva, os fluxos médios encontrados na região deste estudo variam de duas ($4 \times 10^2 \text{ Ton.h}^{-1}$) a quatro ($2,6 \times 10^1 \text{ Ton.h}^{-1}$) ordens de grandeza superior, respectivamente. O estuário do Rio Amazonas pode ser considerado como um *outlier*, devido a sua capacidade de transporte de materiais no gradiente continente-oceano e vazões que chegam a mais de um *Sverdrup* ($1 \text{ Sverdrup} = 10^6 \text{ m}^3$). Entretanto, o estuário do Rio Amazonas, assim como o Complexo Estuarino de São Marcos são influenciados por um regime de macromarés, que associados a um elevado transporte de Ekman devido aos constantes ventos alísios de leste e a dinâmica de uma onda de Kelvin estacionária, na região da Plataforma Continental, eleva o nível de água a mais de 6 metros nas duas regiões, o que torna a comparação das descargas de TSS bastante interessante.

Partindo dessa premissa, durante a estação de chuva os fluxos médios observados neste estudo são maiores quando comparados ao fluxo observado por Filizola & Guyot, (2011) que chegam a $81,621 \text{ Ton.h}^{-1}$ na estação de chuva para o estuário do Amazonas. Ao compararmos os fluxos médios de obtidos neste estudo durante o segundo semestre do ano, as descargas observadas no estuário do rio Paraíba do Sul (Rio de Janeiro) em regime de micro maré, temos que os fluxos

são de três (820 Ton.h^{-1}) ordens de grandeza maiores em relação aos observados por Almeida et al., (2007) durante a estação de seca. Medeiros et al., (2011) e Dias et al., (2011) em seus estudos nos estuários dos rios São Francisco (AL) e Jaguaribe (CE), respectivamente, durante a estação de balanço hídrico negativo, ambos dominados por mesomaré, encontraram fluxos médios de (560 Ton.h^{-1}) e (470 Ton.h^{-1}), sendo ordens de grandeza inferiores às encontradas ao largo do CPSL.

O presente estudo mostrou que na análise sobre o balanço de cargas ao longo das cinco radiais perpendiculares ao fluxo, as radiais 3 e 4 retêm grande parte do material na amostragem realizada durante a estação de chuva, isso é um ponto importante pois essas radiais ficam localizadas em frente ao píer I e III e importantes berços de atracação da região do Porto do Itaqui, o que provavelmente possa diminuir a profundidade local. Cenário similar foi abordado por Santos (2018) em suas análises no biênio 2014/2015, onde observou que na maré vazante a maior porcentagem de mps fica retido nas proximidades dos berços de atracação do Porto do Itaqui, o que formava uma pluma de sedimentos em direção a essas estruturas portuárias.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao categorizar o comportamento das águas estuarinas do CPSL nos distintos períodos sazonais de amostragem e fluxos fluviais, realizados no ano de 2017, temos que, a variação espacial do campo de correntes teve as maiores intensidades na ordem de $2,30 \text{ m s}^{-1}$ para as duas marés e nos dois períodos sazonais, sendo possível observar a ocorrência de uma célula de circulação estacionária, com a minimização das velocidades das correntes em direção ao fundo durante as duas campanhas. Na abordagem temporal a circulação hidrodinâmica mostrou que ambos os fundeios foram dominados pelas correntes de vazantes com velocidades resultantes próximas de zero, foi possível determinar maiores intensidades das correntes durante a fase de vazante, inferindo que as velocidades aumentam ao longo de um ciclo de maré.

Para o melhor entendimento da circulação hidrodinâmica e das massas de água da região do CPSL, baseada em uma melhor distribuição de estações amostrais, a variação espacial da salinidade foi influenciada pela variabilidade semianual da região, com maiores valores no período chuvoso e as menores salinidades durante o final do chuvoso, esse comportamento ocorreu na abordagem espacial e temporal. Apesar da amostragem ter sido realizada em período chuvoso e em maré de sizígia, não podemos deferir o quanto de água oriunda dos processos pluviométricos chegaram no rio Mearim, porem através da relação entre salinidade e temperatura resultando nos índices termohalinos obtidos neste trabalho, podemos sugerir que as águas se mostraram salobras (menos salinas), com média de 26 g kg^{-1} , mostrando a presença somente de Água Estuarina e esse cenário denota um atraso temporal da razão chuva/vazão.

A distribuição das concentrações de Material Particulado em Suspensão nas águas estuarinas do CESM confirma os padrões e tendências gerais identificadas em trabalhos anteriores na mesma região, sazonalmente com concentrações mais elevadas durante o período chuvoso e ao longo do ciclo das marés com menores concentrações e maior variabilidade ao longo da seção ocorrendo nas preamares e concentrações mais elevadas e mais homoganeamente distribuídas na seção na baixa-mar, mesmo assim o estuário mostrou ser bem oxigenado, por se tratar de um ambiente bastante dinâmico, com intensas trocas gasosas com a atmosfera como pode-se observar nas concentrações de OD. De acordo com a estrutura termohalina observada durante os dois períodos amostrais no CESM, foi possível notar que as propriedades estão próximas à homogeneidade vertical e horizontal.

As componentes mais energéticas durante os ciclos de maré nos dois períodos sazonais foram dominadas pelos transportes advectivo, gerado pela descarga fluvial e dispersivos, pela deriva de Stokes e corrente de maré, associadas ao transporte de sal e o componente de descarga fluvial foi a principal forçante no transporte de sal estuário abaixo, permitindo analisar que na

região onde foi realizado os fundeios, o Complexo Estuarino de São Marcos foi caracterizado como exportador de sal para o oceano adjacente.

Em relação a estabilidade da coluna de água, o número de Richardson por camada mostrou comportamento de grande instabilidade vertical de águas bem misturadas na maior parte do tempo. O diagrama de Estratificação-Circulação mostrou que durante o período chuvoso a circulação gravitacional é inexistente, com o transporte de sal estuário acima realizado totalmente por difusão turbulenta e durante a estação de fim da chuva representa um sistema denominado de parcialmente estratificados, onde a circulação gravitacional desempenha grande parte do papel (99%) e o transporte de sal ocorre também por advecção (Kjerfve, 1990).

As maiores vazões para o CPLS, ocorreram durante a fase de maré vazante em ambos os períodos sazonais, na ordem de $7,0 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com percentuais de água doce e tempo de residência mais elevados durante o período o final do balanço hídrico positivo. Os fluxos de material particulado em suspensão foram elevados, da ordem de 10^4 Ton h^{-1} , com maiores valores durante a enchente no período chuvoso e na vazante durante a estação de fim da chuva.

De todo modo, é oportuno reforçar que os fluxos de MPS associado à variabilidade das condicionantes ambientais e mudanças climáticas, modelam a região estuarina, sendo preciso um monitoramento contínuo devido a atividades potencialmente danosas, como possíveis acidentes náuticos ou a derramamentos de óleo ou qualquer contaminante na região que acarrete inutilização ao meio e a região costeira. Os resultados apresentados enfatizaram o quão complexo e dinâmico é o sistema estuarino de São Marcos, no que diz respeito ao entendimento das mudanças que ocorrem no transporte hidrodinâmico e de materiais em estuários regidos por macromaré situados na interface Amazônia Semiárido.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS NO CESM

1. Seria viável o uso de técnicas de modelagem matemática computacional de alto desempenho, que simulem a probabilidade de deposição dos sedimentos na região do CPSL, sendo de fundamental importância para a construção de cenários que permitam entender como essa dinâmica acontece;

2. Realização de trabalhos com uma abordagem temporal, que englobem o uso da análise granulométrica para identificar mais a fundo a composição desses sedimentos, no que se refere a tamanho e espessura do grão;

3. Realização de amostragens que contemplem o período de chuva, transição, estiagem e transição para melhor compreensão da circulação hidrodinâmica e identificar o atraso que é causado na razão chuva/vazão;

4. A delimitação do CESM, verificando até que ponto existe a influência da maré, através de medições de velocidade em diferentes pontos;

5. A comparação dos dados encontrados neste estudo, com os dados das campanhas futuras;

6. Realização de pesquisas na bacia do rio Mearim, em especial, nos principais afluentes que desaguam no CESM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, R., T., Dinâmica Sedimentar no Sistema Estuarino do Piraquê-Açu-Aracruz/ES. (Vitória, ES) 2018. Dissertação (mestrado). Mestrado em Oceanografia Ambiental (UFES).
- AMARAL, R. F.; ALFREDINI, P.; Modelagem Hidrossedimentológica no Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)*, v. 15, n. 2, p 5-14, Abril/2010.
- AMOS, C., 1996. Siliciclastic tidal flats. In: PERILLO, G. M. E. (ed.), *Geomorphology and sedimentology of estuaries* (2nd edition), Elsevier, Amsterdam, 273–306.
- APHA (American Public Health Association) *Standard methods for examination of water and wastewater* 20th ed Washington, Port City Press 2001.
- AURENHAMMER, F.; KLEIN, R. Voronoi diagrams. 1 a. ed. Fern Universitat Hagen: Technical Report, 1989. 92 p.
- AZEVEDO, A C G; CUTRIM, M V J Fitoplâncton costeiro das porções norte-nordeste da ilha de São Luís, MA, Brasil In: SILVA, A C; FORTES, J L O (Orgs) *Diversidade biológica: uso e conservação de recursos naturais do Maranhão v 2* São Luís: UEMA, 2007.
- BERGAMO, A. L.; Características da Hidrografia, Circulação e Transporte de Sal: Barra de Cananéia, sul do mar de Cananéia e baía do Trapandé. Dissertação (Mestrado). Instituto Oceanográfico de São Paulo (IOUSP). São Paulo, 254p. 2000.
- BÉRGAMO, A. L.; MIRANDA, L. B.; CORRÊA, M. A. Estuário: Programas para processamento e análise de dados hidrográficos e correntográficos Relatório Técnico do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. v.49, p 1–16, 2002.
- BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto Gurupi: relatório final de etapa. Brasília, 1977. p. 24.
- CARVALHO MARCHESINI SANTOS ET CARVALHO, 2004 M.E. Carvalho Marchesini Santos, M S.S. Carvalho Paleontologia das Bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís Ministério De Minas E Energia Secretaria de Minas e Metalurgia, Cprm. Serviço Geológico do Brasil, 211 p (2004).
- CASTIGLIA, M. C. C. P. Disposição subaquática de rejeitos de drenagem: o caso do complexo lagunar de Jacarepaguá. Rio de Janeiro, Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – COPEE/UFRJ, 2006).
- CAVALCANTI, L. F., AZEVEDO-CUTRIM, A. C. G., OLIVEIRA, A. L. L., FURTADO, J. A., ARAÚJO, B. DE O., (2018). Structure of microphytoplankton community and environmental variables in a macrotidal estuarine complex, São Marcos Bay, Maranhão - Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 66(3), 283-300.
- COSTA, A. S.; DOS SANTOS, N. A.; BRAGA, C. C. Rainfall diagnosis in different time scales in Maranhão using the wavelet transform. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, [S.l.], v. 6, n. 6, p. 295-304, sep. 2016.
- CHAGAS, F. M. Dinâmica das ondas de areia na Baía de São Marcos (Ponta da Madeira/MA): Observações e modelagem numérica. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) Instituto Oceanográfico da USP. 93 p. 2013.
- CLARK, R. B. 2001. "Marine Pollution". 5ª ed. Oxford: University Press.
- CORRÊA, M. C. SEREJO, J. H. RANGEL, T. P. Oliveira B Almeida M Dias F Rezende C. Caracterização biogeoquímica da matéria orgânica em um estuário de macromaré localizado na interface Amazônia-semiárido no nordeste do Brasil. *Geochimica Brasiliensis*. 2019 vol: 33 (1) pp: 107-120.
- COSTA NETO LX. 1997. Evolução geológica-geomorfológica recente da plataforma continental interna ao largo do delta do Rio Açu, Macau - RN. Programa de pós-graduação em geologia e geofísica marinha da Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 214 pp.

- COSTA, A. S.; DOS SANTOS, N. A.; BRAGA, C. C. Rainfall diagnosis in different time scales in Maranhão using the wavelet transform. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, [S.l.], v. 6, n. 6, p. 295-304, September/2016.
- COUCEIRO, M. A. A.; SCHETTINI, C. A. F. Estudo da Dinâmica dos Sedimento em Suspensão do estuário do rio Araranguá (SC): Possíveis efeitos da drenagem ácida da atividade de mineração de carvão. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 29 n. 2, p. 251-266, 2010.
- CUNHA, Alan Cavalcanti da et al. Evento extremo de chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio Araguari, Amapá, Brasil. *Rev. bras. meteorol.*, São Paulo, v. 29, n. spe, p. 95-110, Dec. 2014.
- D'AQUINO, C.A.; Neto, J.S.A.; BARRETO, G.A.M.; Schettini, C.A.F. Caracterização Oceanográfica e do transporte de sedimento em suspensão no estuário do rio Mampituba, SC. *Revista Brasileira de Geografia Física*. Nº 29(2), p. 217-230,2011.
- DIAS, F. J. S. Hidrodinâmica das descargas fluviais para o estuário do Rio Jaguaribe (CE). 125 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará - Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR, Fortaleza, 2007.
- DIAS, F. J. S.; CASTRO, B. M.; LACERDA, L.D. Continental shelf water masses off the Jaguaribe River (4S), northeastern Brazil. *Continental Shelf Research*, v. 66, p. 123-155, 2013.
- DIAS, F. J. S.; CASTRO, B. M.; LACERDA, L. D.; MIRANDA L. B.; MARTINS R. V. et al. Physical characteristics and discharges of suspended particulate matter at the continent-ocean interface in an estuary located in a semiarid region in northeastern Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 180, p. 258–274, 2016.
- DIAS, F. J. S.; SOARES, T. C. M.; LACERDA, L. D.; MARINS, R. V. 2011. Balanço de massa do material em suspensão na interface continente-oceano do estuário do rio Jaguaribe (CE) durante um período de grande descarga fluvial. In: XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica e III Simpósio de Geoquímica dos Países do MERCOSUL, 2011, Gramado, RS. *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica e III Simpósio de Geoquímica dos Países do MERCOSUL*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2011. v. 1.
- DINIZ, L. G. R., Jesus, M. S., Dominguez, L. A. E., Fillmann, G., Vieira, E. M., & Franco, T. C. R. S. First Appraisal of water contamination by antifouling booster biocide of 3rd Generation at Itaquí Harbor (São Luiz - Maranhão – Brazil). *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 25(2), 380–388. 2014.
- DÖBEREINER, C. Aggregation and deposition of fine particles in the Tay estuary. Scotland, UK, 1982. 151 p. Tese (Doutorado em Filosofia) – Faculdade de Ciências, Universidade de Dundee
- DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. S. P. 1996. Regional assessment of long-term trend of costal erosion in Northeastern Brazil. *An. Acad. Bras. Cienc.* 68: 355- 371.
- DYER, K. R. *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*. Willey, New York, 342 p, 1986.
- DYER, K. R. *Estuaries: a physical introduction*, 2. ed. New York, John Wiley & Sons, 140 p, 1997.
- DYER, K. R. Fine sediment particle transport in estuaries. In: DRONKERS J & LEUSSEN WV (Eds.). *Physical Processes in Estuaries*. New York, Springer-Verlag, p. 295-310, 1988.
- DYER, K. *Estuarine sediment transport and deposition*, In: Pye, K. *Sediment Transport and Depositional Processes*. Blackwell Scientific Publication, Oxford, p. 193-218, 1974.
- EL-ROBRINI, M.; VALTER MARQUES, J.; SILVA, M. A. M. AL. DA; ELROBRINI, M. H. S.; FEITOSA, A. C.; TAROUCO, J. E. F.; SANTOS, J. H. S. DOS; VIANA, J. R. Maranhão. In: MUEHE, D. (Ed.). *Erosão e Propagação do Litoral Brasileiro*. Brasília: p. 87–130, 2006.
- EMERY, K.O.; LEPPLE, F.; TONER, L.; UCHUPI, E.; RIOUX, R.H.; POPLE, W.; HULBURT, E.M. 1974. Suspended matter and other properties of surface waters of the North-eastern Atlantic Ocean. *Journal Sedimentary Petrology* 44, 1087–1110.

- EMERY, W. J.; THOMSON, R. E. Data analysis methods in physical oceanography. 3 ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2001, 634 p.
- FAULKNER, B. The control of surface water runoff from new development – UK National policy in need of review In: Urban Water, Vol. 1, Issue 3, September 1999, pg. 207 – 215.
- FITZGERALD, D. M., KNIGHT J. C. High Resolution Morphodynamics and Sedimentary Evolution of Estuaries. Coastal Systems and continental margins. 2005.
- FORTUNATO, A.B.; CLÍMACO, M.; OLIVEIRA, F.; OLIVEIRA, A.; SANCHO, F.; FREIRE, P. Dinâmica Fisiográfica da Orla Costeira: Estudos de Reabilitação e Proteção Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management, vol. 8, núm. 1, pp. 45-63, 2008.
- FRAMINÁN, M. B.; BROWN, O. B., 1996. Study of the Río de la Plata turbidity front, Part 1: Spatial and temporal distribution. Continental Shelf Research, 16, 1259– 1282.
- FREITAS, P. S. & ABRANTES, F. 2002. Suspended particulate matter in the Mediterranean water at the Gulf of Cadiz and off the southwest coast of the Iberian Peninsula. Deep-Sea Research II 49 (2002) 4245–4261.
- FRENCH, J. R.; BURNINGHAM, H.; BENSON, T. Tidal and meteorological forcing of suspended sediment flux in a muddy mesotidal estuary Estuaries Coasts, 31, pp. 843-859, 2008.
- GARCIA, P. D. Caracterização hidrossedimentológica das correntes de maré e do transporte de sedimentos associado à área portuária do Maranhão. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP. 261 p. 2007.
- GARONCE, F.A.A.; QUARESMA, V.S. Hydrodynamic aspects at Vitória Bay mouth, ES. Anais da Academia Brasileira de Ciências. V. 86(2), p. 555-570, 2014.
- GONZÁLEZ, C. J.; ÁLVAREZ, Ó.; REYES, J.; ACEVEDO, A. Two-dimensional modeling of hydrodynamics and sediment transport in the San Pedro tidal creek (Cadiz Bay): morphodynamical implications. Ciencias Marinas, v. 36, n. 4, p. 393-412, 2010.
- GOMES, José Diego, Caracterização hidrodinâmica do estuário do rio Gurupi. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Bragança, Programa de Pós-Graduação em Biologia Ambiental, Bragança 2015.
- GUALBERTO, Lílian Poliana Sousa. Plataforma Continental do Maranhão: Distribuição Espacial e Análise Textural da Cobertura Sedimentar Superficial. 2002. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Pará, Bélem, 2002.
- GUALBERTO, Lílian Poliana Sousa; EL-ROBRINI, Maâmar. Faciologia da cobertura sedimentar superficial da Platafor
- HAMILTON, P. & M. RATTRAY 1978. Theoretical aspects of estuarine circulation. In: Estuarine Transport Processes, ed. B. Kjerfve. Belle W. Baruch Library in Marine Science, n°. 7, University of South Carolina Press, Columbia, South Carolina, pp. 37-73.
- HANSEN, D V; RATTRAY, M New dimensions in estuary classification Limnology and Oceanography, v 11, n 3, p 319-326, 1996.
- GONZÁLEZ-GORBEÑA, E., ROSMAN, P. C. C., & QASSIM, R. Y. (2015). Assessment of the tidal current energy resource in São Marcos Bay, Brazil. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 1(4), 421–433.
- IADC/CEDA. “Environmental aspects of dredging”. Guide 3 (Investigation, interpretation and impact). ISBN 90-75254-08-3. 1997.
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Precipitação históricas para o Complexo Estuarino de São Marcos (CESM). Em (<http://www.inmet.gov.br>) Acesso em 05 de junho de 2018.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Nacional de Domicílios – Pnad, 2010. Disponível em < [http //:www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em 02 de março. 2018.

- IOC; SCOR; IAPSO. The international thermodynamic equation of seawater—2010: calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56. In: Manual and Guides. UNESCO, 2010.
- JENNERJAHN, T.C.; BASTIAAN, A.; SOUZA, W.F.L.DE; CARVALHO, E.V.; MOLLENHAUER, G.; HOBNER, M. The tropical Brazilian continental margin. In: LIU, K. - K.; ATKINSON, L.; QUINONES, R.; TALAUE-MCMANUS, L. (Ed.). Carbon and nutrient fluxes in continental margins: a global synthesis. Berlin: Springer Verlag, p. 427–442, 2010.
- KJERFVE B, PROEHL JA, SCHWING FB, SEIM HE & MAROZAS M. Temporal and spatial considerations in measuring estuarine water fluxes. In: KENNEDY VS (Ed.). Estuarine Comparisons. New York, Academic Press, p. 37-51, 1982
- KJERFVE, B. Velocity Averaging in Estuaries Characterized by Large Tidal Range to Depth Ratio. *Estuar. coast. mar. Sci.*, v.3, p. 311-323, 1975.
- KJERFVE B. & McKELLAR Jr. H. N. Time series measurements of estuarine material fluxes. In: KENNEDY VS (Ed.). *Estuarine Perspectives*. New York, Academic Press, p. 341-357, 1980.
- KJERFVE B. & WOLAVER T. G. Sampling optimization for studies of tidal transport in estuaries. In: *American Fisheries Society Symposium*, 4., vol. 3, p. 26-33, 1988.
- KLEIN, J. T. R; NICHOLLS, J. R.; MIMURA N. Coastal Adaptation to Climate Change: Can the Ippc Technical Guidelines Be Applied? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 4: 239–252, 1999, 28, pp. 182 – 187, 1999.
- LACERDA, L. D.; MARINS, R. V. River damimng and changes in mangrove distribution. *ISME/Glomis. Eletronic Journal*, v. 2, n. 1, p. 1–4, 2002.
- LACERDA, L. D. Estimativas de carga de nitrogênio, fósforo e metais pesados de interesse ambiental para as bacias inferiores do litoral do estado do Ceará. Relatório técnico. In: *Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE) da Zona Costeira do Estado do Ceará. Semace/Labomar*. 2005.
- LANA, P. C., CAMARGO, M. G., BROGIM, R. A., ISAAC, V. J., 1996. O bentos da costa brasileira: avaliação crítica e levantamento bibliográfico (1858-1996). FERMAR, Rio de Janeiro.
- LEE, Y.G., AN, K.-G., HA, P.T., LEE, K.-Y., KANG, J.-H., CHA, S.M., CHO, K.H., LEE, Y.S., CHANG, I.S., KIM, K.-W., KIMJ, J.H., 2009. Decadal and seasonal scale changes of an artificial lake environment after blocking tidal flows in the Yeongsan Estuary region, Korea. *Sci. Total Environ.* 407, 6063e6072.
- LIU, W. C.; CHAN, W. T.; YOUNG, C. C. Modeling fecal coliform contamination in a tidal Danshuei River estuarine system. *The Science of the Total Environment*, v. 502, p. 632-640, 2015.
- MEDEIROS, J.P. 2016. Influência da Salinidade na dispersão, diversidade de peixes e na pesca no estuário do no Apodi/Mossoró (RN). Natal, 38p. Monografia de conclusão de curso, Curso de Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- MEYBACK, M.; HOROWITZ, A. J.; GROSOBOIS, C. The geochemistry of Seine River Basin particulate matter: distribution of an integrated metal pollution index. *Science of the Total Environment*. 328. 219-236, 2004.
- MANHEIM, F.; MEADE, R.; BOND, G.1970. Suspended matter in the surface waters of the Atlantic continental margin from Cape Cod to the Florida Keys. *Science* 167, 371–376
- MARANHÃO (NUGEO). Bacias hidrográficas: subsídios para o planejamento e a gestão territorial. Universidade Estadual do Maranhão/Núcleo Geoambiental, São Luís: UEMA, 2011.

- MARTINS, L. R., COUTINHO, P. N., 1981. The Brazilian Continental Margin. *Earth-Science Reviews* [online] 17. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90007-6). Acesso: 10 jan. 2015.
- MEHTA, A.J. & PARTHENIADES, E. An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 13, n. 4, p. 361-381, 1975.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Caderno da Região hidrográfica Nordeste Ocidental. Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Recursos Hídricos – Brasília: MMA, 2006.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO FILHO B. M. Aplicação do Diagrama T-S estatístico-volumétrico à análise de massas de água da plataforma continental do Rio Grande do Sul. *Bolm Inst Oceanogr (São Paulo)* 28 (1): 185-200. 1979.
- MIRANDA, L. B. & CASTRO, B. M. 1995. Variabilidade da circulação e do transporte de volume no Canal de São Sebastião (SP). *Publicação esp. Inst. Oceanogr., S. Paulo*, 11(1-9).
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M. & KJERFVE, B. 1998. Circulation mixing due to tidal forcing in the Bertioga Channel, São Paulo, Brazil. *Estuaries*, 21(2):204-214.
- MIRANDA, L. B. Análise de massas de água da plataforma continental e da região oceânica adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) e Ilha de São Sebastião (SP). Tese de Livre-Docência. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, 123 p, 1982.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. Princípios de oceanografia física de estuários São Paulo: Edusp 417 p, 2002.
- MIRANDA, L. B.; BÉRGAMO, A. L.; CASTRO, B. M. 2005. Interactions of river discharge and tidal modulation in a tropical estuary, NE, Brazil. *Ocean Dynamics*. DOI 10.1007/s10236-005-0028-z. 12p.
- MONTES, M. L. Zoneamento Geoambiental do Estado do Maranhão. IBGE, Diretoria de Geociências, Salvador, 44p. 1997.
- MORAIS, J. O.; 1977. Processos de sedimentação na Baía de São Marcos, estado do Maranhão, Brasil. *Arquivos de Ciências do Mar*, 17(2): 153-164.
- MOSSINI, E. Gestão ambiental portuária: estudo de conflitos socioambiental. Mestrado em gestão de negócios. Universidade Católica de Santos. Santos, 2005.
- NASCIMENTO, M. C.; RIBEIRO JÚNIOR, C.E.; AGUIAR NETTO, A.O. Relatório técnico da campanha de avaliação das mudanças socioambientais decorrentes da regularização das vazões no baixo Rio São Francisco. CBHSF, Maceió, AL, 175p, 2013.
- NASCIMENTO, F.C.A. Padrões climáticos associados à periodicidade de eventos extremos de precipitação no Estado do Maranhão. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 108p. 2014.
- NICOLODI, J.L; PETERMANN, R. M. Mudanças Climáticas e a Vulnerabilidade da Zona Costeira do Brasil: Aspectos ambientais, sociais e tecnológicos. *Revista de Gestão Costeira Integrada* (ISSN 1646-8872), 10:151- 177, Itajaí, SC, Brasil, 2010.
- NICHOLS MM. Effects of fine sediment resuspension in estuaries. In: MEHTA AJ (Ed.). *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies. Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*. New York, Springer-Verlag, 14: 5-42, 1986.
- NIMER, E. & BRANDÃO, A.M.P. 1989. Balanço Hídrico e Clima da Região dos Cerrados. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro: IBGE, 166p.
- NITTROUER CA, KUEHL SA, STERNBERG RW, FIGUEIREDO AG & FARIA LEC. 1995. An introduction to the geological significance of sediment transport and accumulation on the Amazon continental shelf. *Mar. Geol.*, 125: 177-192.
- NUGEO/LABGEO Bacias Hidrográficas e climatologia no Maranhão Relatório Técnico Universidade Federal do Maranhão 2016.
- OFFICER, C. B. *Physical Oceanography of Estuaries and Associated Coastal Waters* Wiley, London (1976), p. 546, 1976.

- OLIVEIRA, R. C. B. DE. MARINS, R. V. Trace metals dynamics in sol and estuarine sediment as a major factor controlling contaminants contribution to the aquatic environment: Review. *Revista Virtual de Química*, v. 3, n. 2, 2011.
- PEREIRA, L.C.C., MONTEIRO, M.C., GUIMARÃES, D.O., MATOS, J.B. AND COSTA, R.M. Seasonal effects of wastewater to the water quality of the Caeté river estuary, Brazilian Amazon. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 82, n.2, pp.82, 467-478, 2010.
- POFF, N. L.; ALLAN, J. D.; BAIN, M. B.; KARR, J. R.; PRESTEGAARD, K. L.; RICHTER, B. D.; SPARKS, R. E.; STROMBERG, J. C. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *Bioscience*, v. 47, n. 11, p. 769-784, 1997.
- PONTES, Paulo Henrique Parente. Identificação e caracterização das massas d'água da Plataforma Continental do Maranhão, durante os períodos seco (novembro, 1997) e chuvoso (junho, 1999). 2007. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
- PONTES, Paulo Henrique Parente; EL-ROBRINI, Maâmar. Massa d'água da Plataforma Continental do Maranhão, durante o período seco (novembro, 1997). *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, [S.I.], v. 21, n. 1, p.17-24, jan. 2008.
- PRANDLE, D. Relationships between tidal dynamics and bathymetry in strongly convergent estuaries. *Journal of Physical Oceanography*, v. 33, n. 12, p. 2738–2750, 2003.
- PRANDLE, D. *Estuaries: dynamics, mixing, sedimentation and morphology*. Cambridge: University Press. 236 p, 2009.
- REBOITA, M S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, p.185-204, 2010.
- ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, J. B. M.; EL-ROBRINI, M. Caracterização climática da faixa litorânea PA-MA-PI-CE.
- SALOMÃO, M. S. M. B.; MOLISANI, M. M.; OVALE, A. R. C.; REZENDE, C. E.; LACERDA, L. D.; CARVALHO, C. E. V. Particulate heavy metal transport in the lower Paraíba do Sul River basin, southeastern, Brazil. *Hydrological Processes*. Vol. 15. (4). 587-593, 2001.
- SALOMONI, S. E.; ROCHA, O.; LEITE, E. H. Limnological characterization of Gravataí River, Rio Grande do Sul. *Acta Limnological Brasiliensis*, v. 19, p. 1-14, 2007.
- SAMARITANO, L; CHAGAS, F M; BERNARDINO, J C M; SIEGLE, E; TESSLER, M G; UEMURA, S 2013 Hydrodynamic modeling over a sand wave field ar São Marcos Bay, Brazil In *Marine and river Dune Daynamics – MARID IV Burgues – Belgium* 241-247 pg.
- SANTOS, V. S. Caracterização hidrodonâmica e fluxos de sedimentos em suspensão no Complexo Portuário de São Luís - MA durante a atividade de dragagem. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Oceanografia. Universidade Federal do Maranhão. São Luís: 114f, 2018.
- SANTOS, V. H. M. Caracterização das condições oceanográficas em estuários de macromaré: Complexo Estuarino Arraial-São José (MA). Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Oceanografia. Universidade Federal do Maranhão-UFMA. São Luís: 140 p. 2018.
- SCHUBEL, J.R. & CARTER, H.H. The estuary as a filter for fine-grained suspended sediment. In: KENNEDY, V. S. (Coord.), *The estuary as a filter*. New York, Academic Press, p. 81-105, 1984.
- SEBASTIAN, L.S, Sander, B.O, Simelton, E., Zheng, S., Hoanh, C.T, Tran, N. Buu., C.B., Quyen, C.L & Ninh, N.D, 2016. The drought and salinity intrusion in the Mekong River Delta of Vietnam-Assessment report Vietnam, 55p.
- SHETTINI, C. A. F. Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí=açú. SC. RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos, b. 7, p. 123-142, 2002.
- SCHETTINI C. A. F., PEREIRA FILHO J. & SPILLERE L. Caracterização oceanográfica e biogeoquímica dos estuários dos Rios Tavares e Defuntos, Reserva extrativista de Pirajubaé, Florianópolis, SC. *Notas Téc. Facimar*, 4: 11–28, 2000.

- 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 Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra Dissertação de Mestrado 115p, 2016.
- SILVA, L. C. F.; ALVARENGA, J. B. R. Levantamento do estado da arte dos recursos vivos marinhos do Brasil - Oceanografia Física da Região Nordeste. Ministério do Meio Ambiente. 200 p. 1994.
- STRICKLAND, J.D.H.; PARSONS, T.S. A practical handbook of seawater analysis Bull Fish Res Board Can, v 167, p 1-205, 1972.
- STRIDE, R. K. Diagnóstico da pesca artesanal marinha do Estado do Maranhão, CORSUP/EDUFMA, São Luís, 1992, 205p.
- SYVITSKI, J.P.; VOROSMARTY, C. J.; KETTNER, A. J.; GREEN, P. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean Science, 308 (2005), p. 376e380.
- STUMPF, R.P.; HAINES, J.W. Variations in tidal level in the Gulf of Mexico and implications for tidal wetlands. Estuarine Coastal Shelf Science. 998, 46, 165–173, 1998.
- TEIXEIRA, S.G.; SOUZA FILHO, PEDRO W.M. Mapeamento de Ambientes Costeiros Tropicais (Golfão Maranhense, Brasil) Utilizando Imagens de Sensores Remotos Orbitais. Revista Brasileira de Geofísica (impresso) v. 27, p. 69-82, 2009.
- TOWNEND, I.; FLETCHER, C.; KNAPPEN, M.; ROSSINGTON, K. A. Review of salt marsh dynamics. *Water and Environment Journal*, v. 25, n. 4, p. 477-488, 2011.
- TREPANIER, S.; RODRIGUEZ, M. A.; MAGNAN, P. Spawning migrations in landlocked Atlantic salmon: time series modelling of river discharge and water temperature effects. *Journal of Fish Biology*, v. 48, n. 5, p. 925-936, 1996.
- UNCLES, R. J.; SMITH, R.E. A Note on the Comparative Turbidity of Some Estuaries or the Americas. *Journal of Coastal Research*, 2005(214): 845-852. Published By: Coastal Education and Research Foundation. URL: <https://doi.org/10.2112/016-NIS.1>
- UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO. Centro De Ciências Agrárias. Núcleo Geoambiental. Bacias Hidrográficas E Climatologia No Maranhão / Universidade Estadual do Maranhão. - São Luís, 2016. 165 p.
- VALLE-LEVINSON, A. Contemporary Issues in Estuarine Physics Cambridge University Press, Cambridge (2010), p. 315.
- VILA-CONCEJO, A. SHORT, A. D. PEREIRA, L. C. C. Coastal Morphodynamic Processes on the Macrotidal Beaches of Pará Under Tidally-Modulated Wave Conditions. *The State of Paraná Beaches* (pp.95-124), 2016.
- XU, Z., Ma, J. & Hu., Y. 2019. Saltwater intrusion function and preliminary application in the Yangtze River Estuary, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 1:118-136.
- WOLANSKI, E.; KING, W.; GALLOWAY, D. 1997. Salinity intrusion in the fly river estuary, Papua New Guinea. *Journal of Coastal Research*, 13(4):993-994.
- WRI, World Resources Institute, 2003. Watersheds of the World. Washington, IUCN/IWMI/RCB/WRI, 1 CD-ROM.
- ZEMBRUSKI, S. Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. In: PROJETO REMAC. Geomorfologia da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes. Rio de Janeiro: PETROBRAS. CENPES. DINTEP (Série REMAC no 7). p 129–177. 1979.