



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

VÍVIAN SALLES SANTOS

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA E FLUXOS DE SEDIMENTOS
EM SUSPENSÃO NO COMPLEXO PORTUÁRIO DE SÃO LUÍS (MA)
DURANTE A ATIVIDADE DE DRAGAGEM

SÃO LUÍS
2018

Santos, Vívian Salles. Caracterização hidrodinâmica e fluxos de sedimentos em suspensão no Complexo Portuário de São Luís - MA durante a atividade de dragagem / Vívian Salles Santos. - 2018. 114 p.

Orientador(a): Francisco José da Silva Dias.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Correntes. 2. Dragagem. 3. Transporte de sedimentos. I. Dias, Francisco José da Silva. II. Título.

VÍVIAN SALLES SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA E FLUXOS DE SEDIMENTOS EM
SUSPENSÃO NO COMPLEXO PORTUÁRIO DE SÃO LUÍS (MA) DURANTE A
ATIVIDADE DE DRAGAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Maranhão para obtenção do título de Mestre em Oceanografia.

Linha de Pesquisa: Dinâmica de Sistemas Costeiros e Oceânicos

Orientador: Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias

SÃO LUÍS

2018

VÍVIAN SALLES SANTOS

**Caracterização hidrodinâmica e fluxos de sedimentos em
suspensão no Complexo Portuário de São Luís (MA) durante a
atividade de dragagem**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Oceanografia da
Universidade Federal do Maranhão para
obtenção do título de Mestre em
Oceanografia.

Aprovada em 27/03/2018

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Francisco José da Silva Dias (ICMar/UFMA)

Dr. Audalio Rebelo Torres Júnior (ICMar/UFMA)

Dr. Marcelo Dottori (IO-USP)

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Itaan Santos, por ser meu melhor amigo, herói e eterno incentivador, pelo amor e dedicação incondicionais. Sem você, meu pai, eu jamais conseguiria ser o que sou e, menos ainda, conquistar tudo o que conquistei até hoje. Obrigada por acreditar em mim! Você me inspira e me faz ser um ser humano melhor, ou pelo menos tentar ser, todos os dias! Te amo profundamente!

Ao ser superior que eu acredito: Deus. Obrigada por me permitir ficar de pé e continuar!

Ao meu professor/orientador, Francisco Dias, por ter acreditado, inúmeras vezes mais do que eu, que eu conseguiria chegar até o fim dessa longa e sofrida jornada. Pela excelente orientação, pelo estímulo e incentivo e por todos os ensinamentos. Pelo prazer de trabalhar com o senhor. Pelo esforço atroz na busca de uma infraestrutura fantástica (recursos físicos e financeiros) para que a realização desse trabalho fosse possível. Pela paciência e compreensão em todos os meus momentos ruins (que não foram poucos). Minhas eternas gratidão, admiração e respeito!

Ao professor Audalio Torres, pelo estímulo, pelos ensinamentos e pela credibilidade. Por, juntamente com o professor Francisco Dias, proporcionar uma infraestrutura fantástica que possibilitou a realização desse trabalho. Minhas eternas gratidão, admiração e respeito!

À minha madrastra, Viramy Almeida, por, juntamente com meu pai e meus irmãos, ter me dado todo o apoio que precisei ao longo de tantos anos. Juntas somos mais fortes!

Aos melhores irmãos do mundo, Kirlyan Santos e Yuram Santos, vocês são maravilhosos! Obrigada por estarem sempre comigo, por não me abandonarem, por me entenderem, me amarem e por fazerem dos nossos momentos os melhores e mais risonhos. Amo vocês!

Aos Santos, pelas palavras, pelo incentivo, pelo exemplo, pela inspiração e por ser a melhor família que eu poderia ter!

Aos Salles, por depositarem em mim tanta confiança.

À família LHiCEAI. Não se constrói um castelo sozinho e eu não sou diferente disto. Esse trabalho é resultado de um trabalho em equipe. Equipe que eu tive o prazer de fazer parte, de trabalhar, de ajudar. Equipe que eu tenho orgulho! A

conclusão desse trabalho não seria possível sem o apoio e a ajuda de cada um de vocês! Vocês fizeram os meus dias serem mais leves. Vinícius Maciel, o que seria de mim e daqueles programas enlouquecedores se não fosse tu me ensinando? Valeu pela parceria!; Hugo Pereira, tua calma é invejável. Obrigada por tantas vezes ter me salvado nas minhas, sempre, emergentes questões! Vanessa Aroucha, Jefferson Horley e Igor Hamid, vocês que me salvaram daquele MPS e daquelas análises granulométricas. Sozinha eu teria pirado! As instruções sempre foram muito bem aceitas. Extremamente agradecida!; Erllen Dairlane, você é uma ótima ouvinte! Pôs fim nas minhas manhãs silenciosas e compartilhou das minhas escolhas musicais e cantorias agradavelmente.

Ao Rômulo "Ogro" Soares e ao Júlio "Bebê" Martins, devo um agradecimento especial, além de toda a parte técnica: obrigada pela interminável paciência comigo, por tolerarem toda a minha chatice e por sempre me incentivarem! Vocês ajudaram a vencer todas as batalhas que eu travei contra o mau humor e a intolerância nos nossos dias de trabalho.

Às minhas melhores amigas, Ana Beatriz e Helen Roberta, além de suas respectivas famílias. Obrigada pela amizade, pelo amor, pelo apoio, pela dedicação e por serem as irmãs-amigas que a vida me deu!

Àqueles que torceram e torcem muito por mim: Claudia Costa, Alba Amazonas, Sara & Ramon Padilha, Wallace & Bruna...Vocês aguentaram minhas distância e ausência sem me deixar sozinha. Muitíssimo obrigada! Vocês estarão sempre no meu coração!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro através de bolsa de pesquisa a mim concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Maranhão (FAPEMA) pelos auxílios individuais (Infraestrutura 03894/15; Universal 00112/16) e institucional (PRONEM 079/2016) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio individual (Universal 471924/2013-0) concedidos ao professor Francisco José da Silva Dias.

RESUMO

O Complexo Portuário de São Luís (CPSL) é o maior e mais importante complexo portuário da costa Norte-Nordeste brasileira e o segundo maior da América Latina em termos de movimentação de cargas. Necessita, portanto, que seu calado operacional seja mantido, através de atividades de dragagem, em profundidades compatíveis para o desempenho de suas atividades. O objetivo deste trabalho foi a caracterização da circulação hidrodinâmica e do transporte de sedimentos em suspensão na região ao largo do Complexo Portuário de São Luís (CPSL), em três períodos distintos: pré-dragagem, 25% e 75% do material dragado e pós-dragagem. Os dados de correntes foram adquiridos utilizando um ADCP de 500 MHz (SONTEK/YSI) e a estrutura termohalina e o oxigênio dissolvido foram adquiridos utilizando-se um CTD (EXO2/YSI) como unidade autônoma. A circulação hidrodinâmica da região apresentou velocidades máximas que variaram de $2,68 \text{ m.s}^{-1}$ a $3,76 \text{ m.s}^{-1}$ durante os períodos chuvoso e seco, respectivamente. Foi possível identificar, no CPSL, a presença de duas massas de água: água estuarina (AE) e água costeira (AC). Os fluxos de sedimento em suspensão estiveram diretamente atrelados à evolução da atividade de dragagem, apresentando variação de 40 mg.L^{-1} a 852 mg.L^{-1} . Os valores de transporte de volume variaram de $3,5 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $12,2 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, onde o aumento desse transporte no pós-dragagem é justificado pelo aporte fluvial observado. Durante as três primeiras campanhas foi possível observarmos a perda da influência da massa de água fluvial, devido a minimização das precipitações, onde a massa de água marinha exerceu maior influência. O volume de água na região do CPSL variou de $0,8 \times 10^9 \text{ m}^3$ a $2,3 \times 10^9 \text{ m}^3$ durante o período amostral. O tempo de residência (TR), durante o período chuvoso (quarta campanha) chegou a 2 horas, enquanto que no período de estiagem os valores de TR foram de, aproximadamente, 0,5 horas. Os gradientes de densidade provocam um barramento incapaz de ser rompido pelo MPS que, associado a tempos de residência maiores e aos possíveis derramamentos de contaminantes na região estudada, podem causar efeitos ecológicos e socioambientais irreversíveis para a região.

ABSTRACT

The São Luís Port Complex (CPSL) is the largest and most important port complex on the North-Northeast coast of Brazil and the second largest in Latin America in terms of cargo handling. Therefore, its operational depth need to be maintained, through dredging activities, at depths compatible for the performance of the activities. The aim of this study was to characterize the hydrodynamic circulation and sediment transport in São Luis Port Complex (CPSL) in three different periods: pre-dredging, 25% and 75% of the dredged material and post-dredging. Current data were acquired using a 500 MHz ADCP (SONTEK / YSI) and the thermohaline structure and dissolved oxygen were acquired using a CTD (EXO2 / YSI) as the autonomous unit. The hydrodynamic circulation of the region presented maximum velocities ranging from 2.68 m.s^{-1} to 3.76 m.s^{-1} during the rainy and dry periods, respectively. It was possible to identify in the presence of two water bodies, in the CPSL: estuarine water (EW) and coastal water (CW). The suspended sediment fluxes were directly associated to the evolution of the dredging activity, ranging from 40 mg.L^{-1} to 852 mg.L^{-1} . The volume transport values ranged from $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ to $12.2 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, and the increase of the flows over the post-dredging is explained by the observed fluvial contribution. During the first three campaigns, it was possible to observe the loss of influence of the fluvial water mass, due to the minimization of precipitations, where the marine water mass had greater influence. The volume of water off the CPSL ranged from $0.8 \times 10^9 \text{ m}^3$ to $2.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ during the sampling period. The residence time (RT) during the rainy season (fourth season) reached 2 hours, while in the dry season RT values were approximately 0.5 hours. Density gradients cause a barrier that cannot be broken by the MPS, which, along with longer residence times and possible contaminant spills in the studied region, can cause irreversible ecological and socioenvironmental effects for the region.

LISTA DE ABREVIATURAS

AC – Água Costeira

ADCP – *Acoustic Doppler Current Profiler*

AE – Água Estuarina

AT – Água Tropical

BM – Baixa-mar

BSM – Baía de São Marcos

CESM – Complexo Estuarino de São Marcos

CPSL – Complexo Portuário de São Luís

CTD – *Conductive-Temperature-Depth*

IADC - *International Association of Dredging Companies*

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

LABFIC – Laboratório de Ficologia

LHICEAI – Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores

MPS – Material Particulado em Suspensão

OD – Oxigênio Dissolvido

PAD – Percentual de Água Doce

PCA – Plataforma Continental Adjacente

PM – Preamar

Q_f – Descarga fluvial

S – Salinidade

T – Temperatura

TD – Taxa de Descarga

TEOS-10 - *Thermodynamic Equations of Sea Water*

TR – Tempo de Residência

T_v – Transporte de Volume

u – Componente longitudinal da velocidade

v – Componente transversal da velocidade

V_{fw} – Volume de Água Doce

VT – Volume Total

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

ZM – Zona de Mistura

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Períodos das campanhas amostrais, condições de maré e fases da lua durante o período amostral	26
Tabela 2: Valores das velocidades verticais médias para as radiais das campanhas realizadas durante todo o período amostral	40
Tabela 3: Valores das velocidades longitudinais para as radiais das campanhas realizadas durante todo o período amostral.....	41
Tabela 4: Valores das velocidades transversais para as radiais das campanhas realizadas durante todo o período amostral.....	41
Tabela 5: Variação dos valores de temperatura, salinidade, densidade e oxigênio dissolvido para todo o período amostral.....	66
Tabela 6: Características das massas de água observadas neste estudo.....	77
Tabela 7: Variação dos valores de material particulado em suspensão referente a todo o período amostral.....	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.....	22
Figura 2: Médias históricas das precipitações pluviométricas para a região do CESM entre os anos de 1971 e 2013, onde abril é o mês que apresenta máximo pluviométrico (Painel A). Média das precipitações pluviométricas referente ao período amostral (dezembro/2014, janeiro, fevereiro e junho/2015), bem como os meses de maiores índices pluviométricos do período (março, abril e maio/2015) (Painel B).....	24
Figura 3: Localização das radiais correntográficas e estações hidrográficas na região ao largo do Complexo Portuário de São Luís para a primeira campanha.....	27
Figura 4: Localização das radiais correntográficas e estações hidrográficas ao largo do Complexo Portuário de São Luís para as segunda, terceira e quarta campanhas.....	27
Figura 5: Representação do comportamento da maré durante a primeira campanha. As linhas tracejadas referem-se aos períodos de aquisição dos dados do campo de corrente de cada radial. A: Radial A; B: Radial B e C: Radial C.....	28
Figura 6: Representação do comportamento da maré durante a segunda campanha. As linhas tracejadas referem-se aos períodos de aquisição dos dados do campo de corrente de cada radial. A: Radial A e B: Radial B.....	28
Figura 7 Representação do comportamento da maré durante a terceira campanha. As linhas tracejadas referem-se aos períodos de aquisição dos dados do campo de corrente de cada radial. A: Radial A e B: Radial B.....	29
Figura 8: Representação do comportamento da maré durante a quarta campanha. As linhas tracejadas referem-se aos períodos de aquisição dos dados do campo de corrente de cada radial. A: Radial A e B: Radial B.....	29
Figura 9: ADCP acoplado à prancha, rebocado na popa da embarcação.....	30
Figura 10: Representação da grade curvilínea utilizada para mostrar o comportamento das variáveis de estado e do oxigênio dissolvido.....	33
Figura 11: CTD/EXO2 com grade de proteção.....	34
Figura 12: Garrafa de Van Dorn utilizada na coleta de água para aquisição do MPS na área de estudo.....	36
Figura 13: Representação visual de um modelo de transporte.....	37

Figura 14: Distribuição espacial do campo de correntes (m.s^{-1}), durante a primeira campanha.....	43
Figura 15: Distribuição espacial do campo de correntes (m.s^{-1}), durante a segunda campanha.....	45
Figura 16: Distribuição espacial do campo de correntes (m.s^{-1}), durante a terceira campanha.....	47
Figura 17: Distribuição espacial do campo de correntes (m.s^{-1}), durante a quarta campanha.....	49
Figura 18: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}), para a radial A da primeira campanha na região ao largo do CPSL. Painel A: Velocidade média total; Painel B: Componente longitudinal; Painel C: Componente transversal.....	51
Figura 19: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}), para a radial A da primeira campanha na região ao largo do CPSL. Painel A: Velocidade média total; Painel B: Componente longitudinal; Painel C: Componente transversal.....	52
Figura 20: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}), para a radial A da primeira campanha na região ao largo do CPSL. Painel A: Velocidade média total; Painel B: Componente longitudinal; Painel C: Componente transversal.....	53
Figura 21: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}), para a radial A da segunda campanha na região ao largo do CPSL. Painel A: Velocidade média total; Painel B: Componente longitudinal; Painel C: Componente transversal.....	55
Figura 22: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}), para a radial B da segunda campanha na região ao largo do CPSL. Painel A: Velocidade média total; Painel B: Componente longitudinal; Painel C: Componente transversal.....	56
Figura 23: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}), para a radial A da terceira campanha na região ao largo do CPSL. Painel A: Velocidade média total; Painel B: Componente longitudinal; Painel C: Componente transversal.....	58

Figura 24: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}), para a radial B da terceira campanha na região ao largo do CPSL. Painei A: Velocidade média total; Painei B: Componente longitudinal; Painei C: Componente transversal.....	59
Figura 25: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}), para a radial A da quarta campanha na região ao largo do CPSL. Painei A: Velocidade média total; Painei B: Componente longitudinal; Painei C: Componente transversal.....	61
Figura 26: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}), para a radial B da quarta campanha na região ao largo do CPSL. Painei A: Velocidade média total; Painei B: Componente longitudinal; Painei C: Componente transversal.....	62
Figura 27: Anomalias da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) referentes a todo o período amostral. Primeira campanha (painei A), segunda campanha (painei B), terceira campanha (painei C) e quarta campanha (painei D)	70
Figura 28: Anomalias da salinidade (g.kg^{-1}) referentes a todo o período amostral. Primeira campanha (painei A), segunda campanha (painei B), terceira campanha (painei C) e quarta campanha (painei D)	72
Figura 29: Anomalias da densidade (kg.m^3) referentes a todo o período amostral. Primeira campanha (painei A), segunda campanha (painei B), terceira campanha (painei C) e quarta campanha (painei D)	74
Figura 30: Anomalias da densidade ($\mu\text{mol.kg}^{-1}$) referentes a todo o período amostral. Primeira campanha (painei A), segunda campanha (painei B), terceira campanha (painei C) e quarta campanha (painei D)	75
Figura 31: Diagrama TS-espalhado referente às quatro campanhas amostrais na região ao largo do CPSL.....	76
Figura 32: Anomalias do MPS (mg.L^{-1}) referentes a todo o período amostral. Primeira campanha (painei A), segunda campanha (painei B), terceira campanha (painei C) e quarta campanha (painei D).....	83
Figura 33: Variação do transporte de volume nas seções transversais ao escoamento durante as quatro campanhas amostrais.....	84
Figura 34: Representação visual do MPS (Ton.h^{-1}), por unidade de área, na região ao largo do CPSL, durante a primeira campanha, para as radiais A (painei A), B (painei B) e C (painei C).....	87
Figura 35: Representação visual do MPS (Ton.h^{-1}), por unidade de área, na região ao largo do CPSL, durante a segunda campanha, para as radiais A (painei A) e B (painei B)	88

Figura 36: Representação visual do MPS (Ton.h^{-1}), por unidade de área, na região ao largo do CPSL, durante a terceira campanha, para as radiais A (painel A) e B (painel B)	89
Figura 37: Representação visual do MPS (Ton.h^{-1}), por unidade de área, na região ao largo do CPSL, durante a quarta campanha, para as radiais A (painel A) e B (painel B)	90
Figura 38: Evolução temporal dos fluxos de MPS (Ton.h^{-1}) para a região do CPSL.....	91
Figura 39: Tempo de residência e percentual de água doce nas radiais A e B durante o período amostral.....	95
Figura 40: Proposta de nova malha amostral para o aprimoramento o conhecimento da circulação hidrodinâmica e das massas de água da região ao largo do CPSL.....	99

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA	18
2. HIPÓTESE E OBJETIVOS	20
2.1. OBJETIVO GERAL.....	20
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3. ÁREA DE ESTUDO	21
3.1. LOCALIZAÇÃO	21
3.2. ASPECTOS CLIMÁTICOS	23
3.3. ASPECTOS HIDROGRÁFICOS E MARÉS	25
4. MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1. AQUISIÇÃO DOS DADOS	26
4.2. MALHA AMOSTRAL E COMPORTAMENTO DA MARÉ	26
4.3. CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE CORRENTES	29
4.3.1. <i>Decomposição da velocidade</i>	30
4.3.2. <i>Remoção de dados espúrios</i>	30
4.3.3. <i>Gradeamento especial e vertical dos campos de corrente</i>	31
4.4. ESTRUTURA TERMOHALINA E OXIGÊNIO DISSOLVIDO.....	31
4.4.1. <i>Aquisição dos dados</i>	31
4.4.2. <i>Tratamento estatístico dos dados</i>	34
4.4.3. <i>Tratamento estatístico dos dados</i>	35
4.5. TRANSPORTE DE VOLUME POR UNIDADE DE ÁREA	36
4.6. MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS)	36
4.7. FLUXOS INSTANTÂNEOS DE MPS	37
4.8. INTERAÇÕES CONTINENTE-OCEANO.....	38
4.8.1. <i>Volume de água total</i>	38
4.8.2. <i>Volume de água total</i>	38

4.8.3. <i>Tempo de residência</i>	39
4.9. CÁLCULO DAS ANOMALIAS	39
5. RESULTADOS	40
5.1. CORRENTES NO CPSL	40
5.1.1. <i>Circulação espacial</i>	42
5.1.2. <i>Circulação ao longo da vertical</i>	50
5.2. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS VARIÁVEIS DE ESTADO E DO OXIGÊNIO DISSOLVIDO	66
5.3. MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS)	79
5.3.1. <i>Distribuição espacial do MPS por gravimetria</i>	79
5.4. TRANSPORTE DE VOLUME	84
5.5. FLUXOS DE MPS	86
5.6. INTERAÇÕES CONTINENTE-OCEANO.....	93
6. CONCLUSÕES	97
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
APÊNDICE	106

1. INTRODUÇÃO

A natureza abrigada dos sistemas estuarinos, muitas vezes, fornece configurações adequadas para a instalação de portos e sua infraestrutura, oferecendo benefícios econômicos significativos na maioria das grandes cidades mundiais. No entanto, a atividade portuária pode gerar impactos ambientais decorrentes da implantação da estrutura portuária, das operações de carga e descarga e do aumento do fluxo de embarcações em regiões costeiras. Dentre os aspectos causadores de impactos associados à atividade portuária, constam a construção de estruturas portuárias (marítimas e terrestres), as operações de transferência de produtos, a operação de máquinas, equipamentos e veículos portuários, os resíduos, efluentes e água de lastro das embarcações, os serviços acessórios, além das dragagens de aprofundamento e manutenção da passagem navegável, onde as mudanças no padrão de uso do solo no entorno dos empreendimentos alteram a dinâmica natural dos sedimentos e nutrientes (Machiwa, 1992; Vandermeulen, 1996; Wang & Pinard, 2002).

Para o entendimento de tais processos é necessária a compreensão da hidrodinâmica estuarina e da dinâmica de transporte de sedimentos, uma vez que estes desempenham papel fundamental na manutenção da funcionalidade dos sistemas estuarinos. O conhecimento da dinâmica de sedimentos em suspensão, influenciada por correntes de maré, ventos e ondas (Oviatt & Nix, 1975; Black, 1998; Allan & Duffy, 1998) é essencial para a quantificação dos fluxos de materiais no gradiente continente-oceano, bem como para a determinação do destino dos poluentes associados (Regnier & Wollast, 1993). A ressuspensão e o transporte de sedimentos de fundo podem influenciar na produtividade de ambientes de águas rasas (Cloern & Nichols, 1985; Christiansen et al., 1997; Morin e Morse, 1999), através do enriquecimento da coluna de água por nutrientes preteritamente depositados no sedimento (Tengberg et al., 2003), impactando diretamente na disponibilidade de luz (Anthony et al., 2004; Devlin et al., 2008) e nos níveis de oxigênio dissolvido.

Portanto, o entendimento dos processos de transporte e a dinâmica deste material em sistemas estuarinos é de grande importância para o andamento de projetos de dragagem (Liu et al., 2002; Lopes et al., 2006; Droppo et al., 2011; Andutta, et al., 2014). Mecanismos que controlam a ressuspensão e disposição de sedimentos finos dentro de estuários dominados por macromaré são bastante complexos (Andutta

et al., 2014; Ali et al., 2010). Segundo a IADC (*International Association of Dredging Companies*), um dos grandes problemas da atividade de dragagem é o descarte do sedimento dragado que, em sua maioria, é lançado dentro do próprio sistema estuarino, como minimização dos custos operacionais. Isto significa dizer que o material permanece no sistema influenciando, assim, as taxas de transporte de sedimentos e, conseqüentemente, o desenvolvimento morfológico do estuário. Ao escolher um local de descarte, critérios hidromorfológicos, bem como aspectos de conservação e manutenção do ecossistema têm que ser considerados.

Do ponto de vista da evolução morfológica, o descarte do material dragado e seu posterior transporte e deposição é um efeito desejado para o sistema estuarino, entretanto a volta do material dragado ao canal de acesso é algo que deve ser evitado, pois isso levaria a uma maior frequência das dragagens de manutenção. 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. Um exemplo deste processo é o transporte de sedimentos a montante da região portuária, causados pela oscilação das marés e da influência dos processos baroclínicos no fluxo de água e transporte de sedimentos na zona de mistura do estuário. Ambos são fatores cruciais para o transporte de sedimentos e são a principal causa de potenciais ciclos de deposição de sedimentos, que têm em sua composição partículas minerais, que variam de areia grossa a fina, silte e argila; matéria orgânica e diferentes tipos de materiais como pedras, madeira, pedaços de metais, vidros, etc. (Castiglia, 2006; Monteiro, 2008).

A ação das dragas e a sucção do material do leito de rios e canais, geram impactos negativos de efeitos diretos e indiretos sobre organismos e habitats. O efeito indireto ocorre devido à movimentação de contaminantes (metais pesados, substâncias orgânicas) e nutrientes durante a suspensão do sedimento, podendo haver alteração na qualidade da água e na química global do estuário (Torres, 2000). Os contaminantes presentes nos resíduos e rejeitos de sedimentos oriundos da dragagem são, basicamente, compostos orgânicos halogenados, plásticos, mercúrio, cádmio, petróleo, óleos, substâncias radioativas e algumas outras substâncias. Antes da atividade de dragagem, tais substâncias estavam depositadas no sedimento sem a presença de oxigênio (compartimento anóxico) e quando alocadas em ambiente oxíco tornam estas substâncias disponíveis, aumentando de forma substancial o seu

poder deletério sobre o meio.

Ou seja, o maior potencial de impacto ambiental durante a atividade de dragagem, seja para o aumento de calado ou para manutenção do mesmo, resulta na disposição de material dragado em local inadequado e do aumento do material particulado em suspensão (induzindo, muitas vezes, à dispersão de contaminantes). Ao ser avaliada a necessidade de dragagem, o gestor portuário deve investigar a aplicação de medidas combinadas para o reaproveitamento imediato e, caso não exista a possibilidade de aproveitamento imediato deste material, o órgão ambiental responsável deve exigir da autoridade portuária responsável, um estudo de caracterização do sedimento dragado e do escoamento hidrodinâmico para que assim possa ser formado um mosaico de condições que propiciem um melhor gerenciamento dessa atividade tão impactante para a região estuarina.

O transporte de sedimentos em sistemas estuarinos e baías até a região costeira é controlado pelo aporte fluvial de sedimentos oriundos da bacia de drenagem devido ao *run-off* superficial e pela circulação hidrodinâmica nestes ambientes. Esta circulação é gerada, basicamente, por maré, descarga de água doce, forças de gradiente de pressão barotrópica e baroclínica, hidrodinâmica costeira ao largo destes ambientes e devido à transferência de momentum ao fluido (Miranda et al., 2002). A circulação hidrodinâmica e as características dos sedimentos representam um papel importante na dinâmica sedimentar. O processo de floculação dos sedimentos finos aumenta potencialmente a sua velocidade de decantação e, por consequência, a sua retenção no estuário, o que torna estes ambientes filtros de materiais na transição continente-oceano (Miranda et al., 2002).

1.1. Justificativa

É crescente a necessidade de se estabelecer como os estuários em regiões tropicais respondem às mudanças no uso e ocupação dos solos de suas bacias de drenagem e ao desenvolvimento das diversas atividades que ali ocorrem, já que estes fatores podem aumentar a pressão sobre a eficiência dos terminais portuários. A construção de navios capazes de deslocar cargas cada vez maiores tem exigido calados muito grandes, obrigando o agente portuário a demandar por canais de acesso cada vez mais profundos.

Logo, o conhecimento da circulação hidrodinâmica e da dinâmica que ela exerce sobre o transporte e a deposição de sedimentos em suspensão é de

fundamental importância para que os agentes responsáveis (públicos e/ou privados) possam tomar decisões quanto à necessidade e frequência que os procedimentos de dragagem de aprofundamento e/ou manutenção possam ser realizados. Este tipo de atividade apresenta um potencial de impacto muito grande, resultante do descarte do material dragado em local inadequado e do aumento do material particulado em suspensão (MPS) (induzindo, por vezes, a dispersão de contaminantes), levando os níveis de oxigênio dissolvido na coluna de água a níveis críticos, onde o corpo hídrico pode chegar a um estado de hipóxia. A hipóxia em ambientes estuarinos pode levar a perda total ou parcial de estoques pesqueiros e da biota local associada, tendo uma ação direta sobre a população ribeirinha, a qual possui uma dependência cultural desse recurso, bem como necessita dele para sua subsistência.

2. HIPÓTESE E OBJETIVOS

A minimização dos fluxos fluviais e o avanço da intrusão salina, associados a eventos de dragagem, têm aumentado as concentrações de MPS na região ao largo do Complexo Portuário de São Luís (CPSL), um estuário de macromaré localizado na interface Amazônia-Semiárido.

2.1. Objetivo geral

O presente estudo visa a caracterização da circulação hidrodinâmica e do transporte de sedimentos em suspensão na região ao largo do Complexo Portuário de São Luís (CPSL), em três períodos distintos: pré-dragagem, 25% e 75% do material dragado e pós-dragagem.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar a variação espacial do campo de correntes da região do CPSL;
- Caracterizar a variação espacial da estrutura termohalina e do oxigênio dissolvido na região do CPSL;
- Caracterizar o transporte de volume (vazões) na região do CPSL;
- Determinar a variação das concentrações do material particulado em suspensão (MPS) na região do CPSL;
- Quantificar os fluxos instantâneos de MPS na região do CPSL;
- Quantificar as interações continente-oceano na região do CPSL.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização

O Estado do Maranhão possui área superficial da ordem de 331.983,29 km², sendo o oitavo maior Estado brasileiro e o segundo do Nordeste em extensão territorial (IBGE, 2002). Está localizado entre os paralelos 1°01' e 10°21' Sul e os meridianos 41°48' e 48°50' Oeste. Ao Norte limita-se com o Oceano Atlântico (639,5 km), ao Sul e Sudoeste com o Tocantins (1.060 km), a Oeste com o Pará (798 km) e a Leste e Sudeste limita-se com o Piauí (1.365 km).

O Complexo Estuarino de São Marcos (CESM), denominado comumente de Baía de São Marcos (BSM), é o corpo receptor de vários estuários de pequena extensão (Silva, 2016). O CESM localiza-se no extremo norte do Estado do Maranhão, entre os paralelos 2°38' e 3°05' Sul e meridianos 44°26' e 44°59' Oeste. Possui largura de, aproximadamente, 45 km no seu limite norte em direção à Plataforma Continental Adjacente (PCA), 13 km em sua meia extensão, aumentando para 25 km no seu limite sul ao iniciar-se a Ilha dos Caranguejos (Moraes, 1977) (Figura 1). A profundidade média da região do CPSL, durante o período deste estudo foi de, aproximadamente, 20 metros podendo variar até profundidades de 40 metros.

De acordo com o Plano Mestre do Porto do Itaqui (2015), este porto movimenta cerca de 15 milhões de toneladas por ano. Desse total: 52% são graneis sólidos, 45% graneis líquidos (derivados de petróleo) e 3% estão divididos entre cargas soltas e contêineres. Algumas das cargas dos graneis sólidos (importadas e exportadas) no Porto do Itaqui são ferro-gusa, carvão, cobre, clínquer, escoria, soja, fertilizantes, arroz e milho.

Em trabalho pioneiro, Moraes (1977) fez uma primeira caracterização físico-geomorfológica do CESM mostrando uma intensa mistura de águas marinhas, bem como as águas provenientes da drenagem continental, características de sistemas estuarinos, onde ao sul da Ilha dos Caranguejos foi observada a isohalina limítrofe entre água doce e a estuarina (5 g.kg⁻¹) em maré enchente, propagando-se até a metade da Ilha dos Caranguejos em maré vazante. Usando derivadores lagrangeanos, este mesmo autor observou que, nas proximidades do CPSL, existia uma divisão do escoamento (Canal Principal e Canal do Boqueirão) provocado pela Ilha do Medo. No Canal do Boqueirão as velocidades médias foram de 2,5 m.s⁻¹,

enquanto que no Canal Principal do CESM, as correntes variaram de $8,07 \text{ m.s}^{-1}$, em maré vazante, a $8,47 \text{ m.s}^{-1}$ em maré enchente, durante maré de sizígia. Para a maré de quadratura, os valores foram 35% e 20% menores em maré enchente e vazante, respectivamente. Vale ressaltar que valores de correntes tão elevados para o CESM se deve ao tipo de derivador utilizado, onde grande parte da velocidade de deslocamento do mesmo pode ser creditado ao efeito associado do vento.

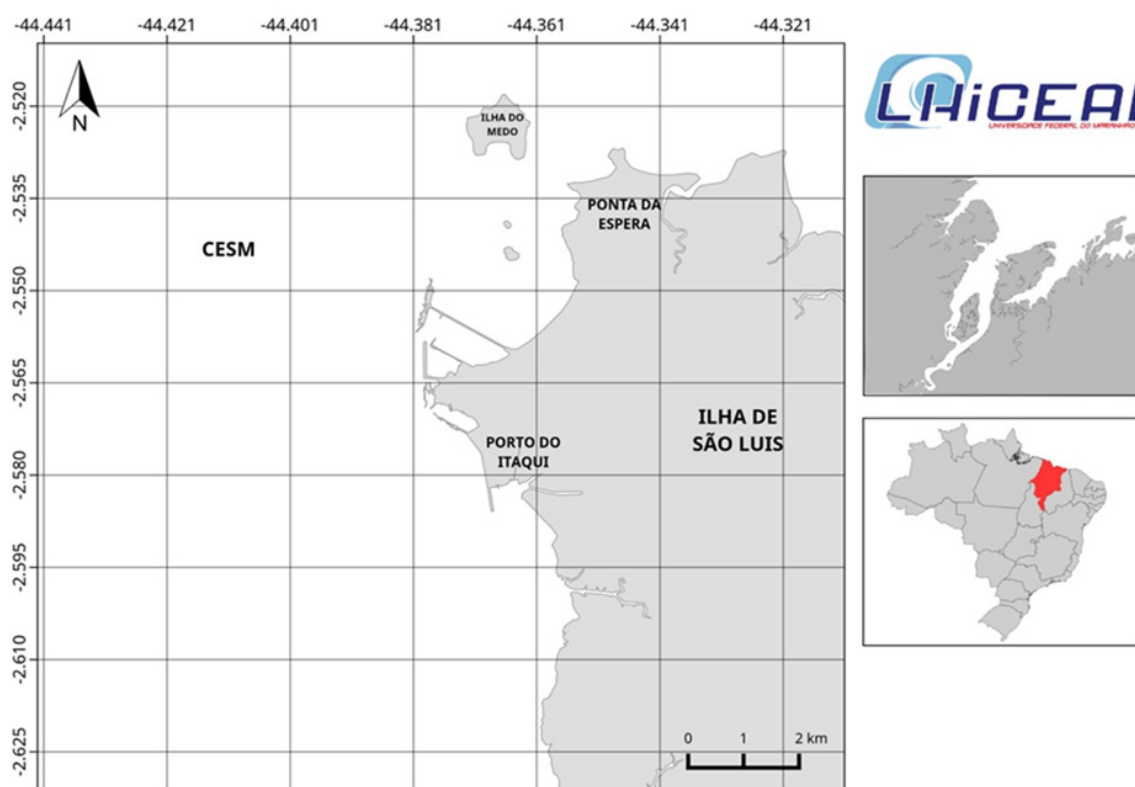


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo

Chagas (2013) estudando a formação de ondas de areia ("*Sand Waves*") no CESM, utilizou um modelo hidrodinâmico no modo barotrópico. A modelagem das correntes mostrou que as maiores velocidades foram observadas no Canal Principal e no Canal do Boqueirão (estreitamento entre a Ilha do Medo e a Ponta da Madeira), onde a presença de uma formação rochosa ao Sul da Ilha do Medo (Cabeço do Mearim) divide o escoamento entre os dois canais, corroborando com os resultados de Moraes (1977). A presença do Cabeço do Mearim favorece a formação de vórtices (via teoria de Von Kármán) ao sul da Ilha do Medo, com sentidos horário, em maré

vazante, e anti-horário, em maré enchente. Comportamento, este, também evidenciado por Amaral (2006) e Garcia (2007).

3.2. Aspectos climáticos

De acordo com o Atlas do Maranhão (2002), o Estado do Maranhão possui características climáticas transicionais entre o clima amazônico (quente e úmido) e o semiárido nordestino (quente e seco), onde o CESM apresenta as mesmas características. No Estado não existem estações bem definidas, podendo-se considerar apenas um período seco (balanço hídrico negativo) e outro chuvoso (balanço hídrico positivo), não sendo estes formados em nível estadual e nem em períodos homogêneos. De acordo com o Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão (NUGEO/UEMA), em um contexto médio, para todo o Estado, chove cerca de 1.600 mm anualmente e o norte maranhense é a área com os maiores totais anuais de chuva, podendo chegar a 2.700 mm (UEMA, 2016)

As chuvas são controladas pela ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), onde os ventos alísios de nordeste, que fazem parte desse complexo sistema, durante o primeiro semestre do ano trazem essa massa de ar ocasionando as chuvas na região. Para o segundo semestre do ano, a ZCIT enfraquece, ficando sob o domínio de ventos de sudeste, que retiram essa massa de ar da região e ocasiona o período de estiagem.

Historicamente, o período de maiores precipitações ocorre entre os meses de dezembro a maio, sendo o quadrimestre fevereiro-março-abril-maio o mais chuvoso, representando 63% do total anual que corresponde a 1.557 mm. O quadrimestre agosto-setembro-outubro-novembro é o mais seco, representando apenas 10% deste total anual, caracterizando um regime fluvial tropical (UEMA, 2002). Durante o período amostral (dezembro/2014, janeiro/2015, fevereiro/2015 e junho/2015) a precipitação média acumulada variou entre 29,2 mm a 106,7 mm, ficando abaixo do esperado para todo o período. Porém os meses de março, abril e maio ficaram dentro da média histórica, o que refletiu num maior aporte fluvial para o último mês amostral (Figura 2).

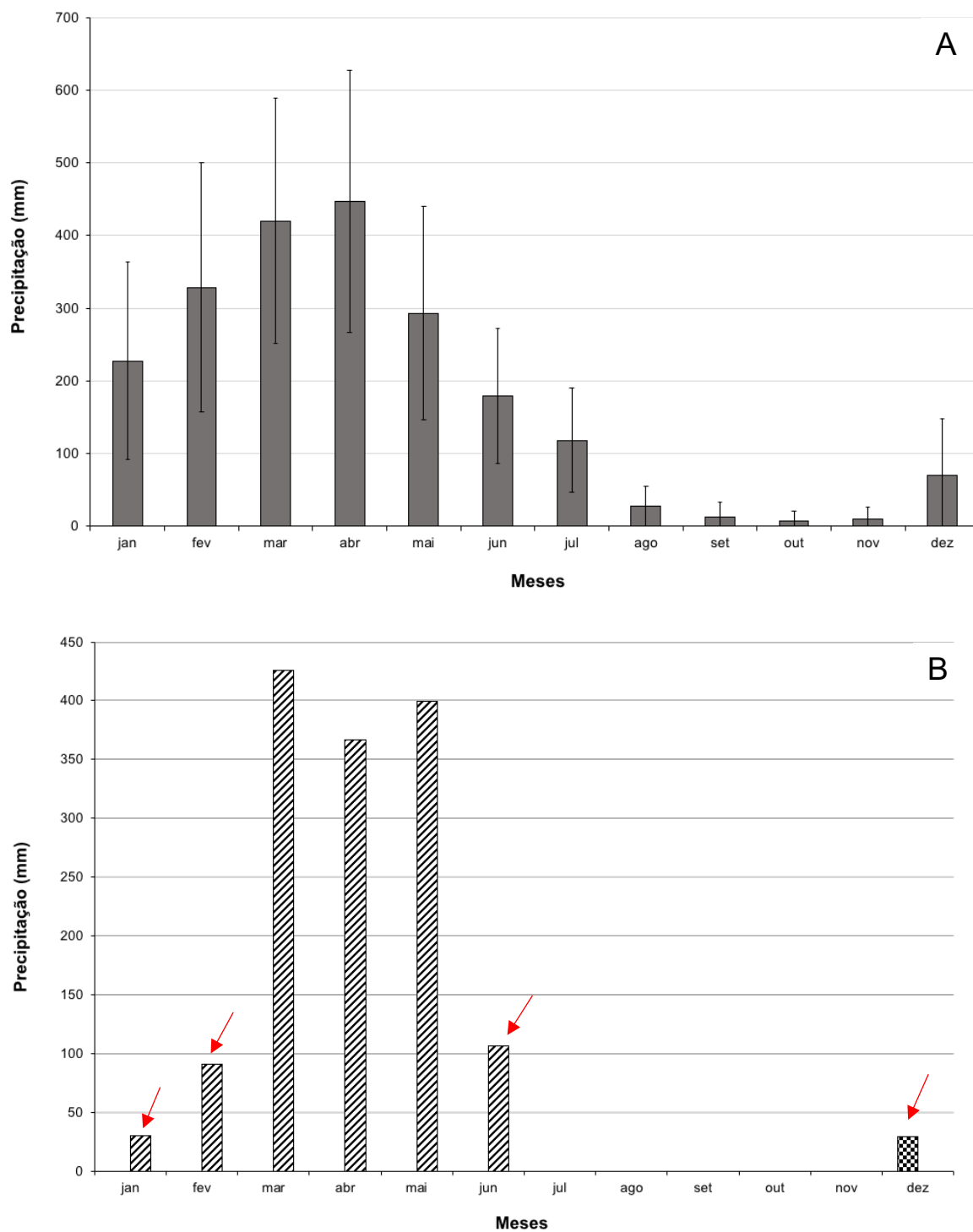


Figura 2: Médias históricas das precipitações pluviométricas para a região do CESM entre os anos de 1971 e 2013, onde abril é o mês que apresenta máximo pluviométrico (Painel A). Média das precipitações pluviométricas referente ao período amostral (dezembro/2014, janeiro, fevereiro e junho/2015), bem como aos meses de maiores índices pluviométricos do período (março, abril e maio/2015) (Painel B).

O regime térmico do Estado é caracterizado por temperaturas médias anuais superiores a 22 °C, devido à sua localização na região Equatorial, onde a temperatura é normalmente elevada e uniforme ao longo do ano (IBGE,2003). No

Norte do Estado, a temperatura média anual é de 26,1 °C. Durante o primeiro semestre há o predomínio de chuvas, logo, as temperaturas são mais amenas devido à grande cobertura de nuvens que reduz a chegada de radiação solar direta na superfície. Por outro lado, durante o segundo semestre há o predomínio de céu claro, sem nuvens, o que contribui para uma maior incidência da radiação solar na superfície resultando em temperaturas mais elevadas, em média 31,5 °C (UEMA, 2002).

3.3. Aspectos hidrográficos e marés

A bacia hidrográfica do Mearim é a maior do Estado, com 99.059,68 km², equivalente a 29,84% da área total do território maranhense e possui vazão média total de 557 m³ e escoamento total, superficial e subterrâneo nos valores de 17.570 km³.ano⁻¹, 14.140 km³.ano⁻¹ e 3.430 km³.ano⁻¹, respectivamente (MMA, 2006; UEMA, 2016).

O principal rio é o Mearim, que nasce na Serra da Menina, entre os municípios de Formosa da Serra Negra, Fortaleza dos Nogueiras e São Pedro dos Crentes, numa altitude aproximada de 650 m; percorre longo trecho na direção sudeste-nordeste até o município de Esperantinópolis e, após receber as contribuições do rio Flores, rumo para o norte até desembocar no Complexo Estuarino de São Marcos, entre a capital São Luís e o município de Alcântara. Durante o percurso de 832,18 km de extensão recebe vários afluentes, tendo como destaque os rios Pindaré e Grajaú (NUGEO/UEMA, 2016).

Feitosa (1989) afirmou que a maré do CESM é do tipo mista, com predominância semidiurna, pois esta apresenta duas baixa-mares (BM) e duas preamares (PM) com intervalos diferentes, onde o tempo de duração da maré vazante é quase sempre maior que o tempo de duração da maré enchente. A amplitude média nessa região é de 4,6 m, podendo atingir 8 m quando das grandes sizígias, porém em 75% do tempo, as amplitudes de maré são inferiores a 5,5 m, o que caracteriza o CESM como um estuário de macromaré.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Aquisição dos dados

No biênio 2014/2015, durante a obra da dragagem de aprofundamento da região ao largo do CPSL, foram realizadas quatro campanhas, para aquisição de dados, em três períodos distintos: pré-dragagem (1ª campanha), 25% e 75% de material dragado (2ª e 3ª campanhas, respectivamente) e pós-dragagem (4ª campanha). Estas campanhas contaram com o apoio do Laboratório de Ficologia (LABFIC/UFMA), coordenado pelo professor Dr. Marco Valério Jansen Cutrim e do Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores (LHiCEAI/UFMA), coordenado pelos professores Dr. Francisco José da Silva Dias e Audalio Rebelo Torres Júnior.

As campanhas amostrais foram realizadas a bordo de um catamarã de médio porte durante estações de seca e fim de chuva, em eventos de marés de quadratura e sizígia (Tabela 1).

Tabela 1: Períodos das campanhas amostrais, condições de maré e fases da lua durante período amostral.

CAMPANHA	DATA	HORA DE INÍCIO E FIM	MARÉ	FASE DA LUA
1ª campanha	22/12/2014	07:12 - 13:18	Quadratura	Minguante
2ª campanha	21/01/2015	07:53 - 13:57	Sizígia	Nova
3ª campanha	10/02/2015	10:33 - 16:51	Quadratura	Minguante
4ª campanha	22/06/2015	10:56 - 17:16	Quadratura	Crescente

4.2. Malha amostral e comportamento da maré

A malha amostral (Figuras 3 e 4) foi determinada com base no Programa de Monitoramento Ambiental da Atividade de Dragagem do CPSL, proposta pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recurso Naturais (SEMA).

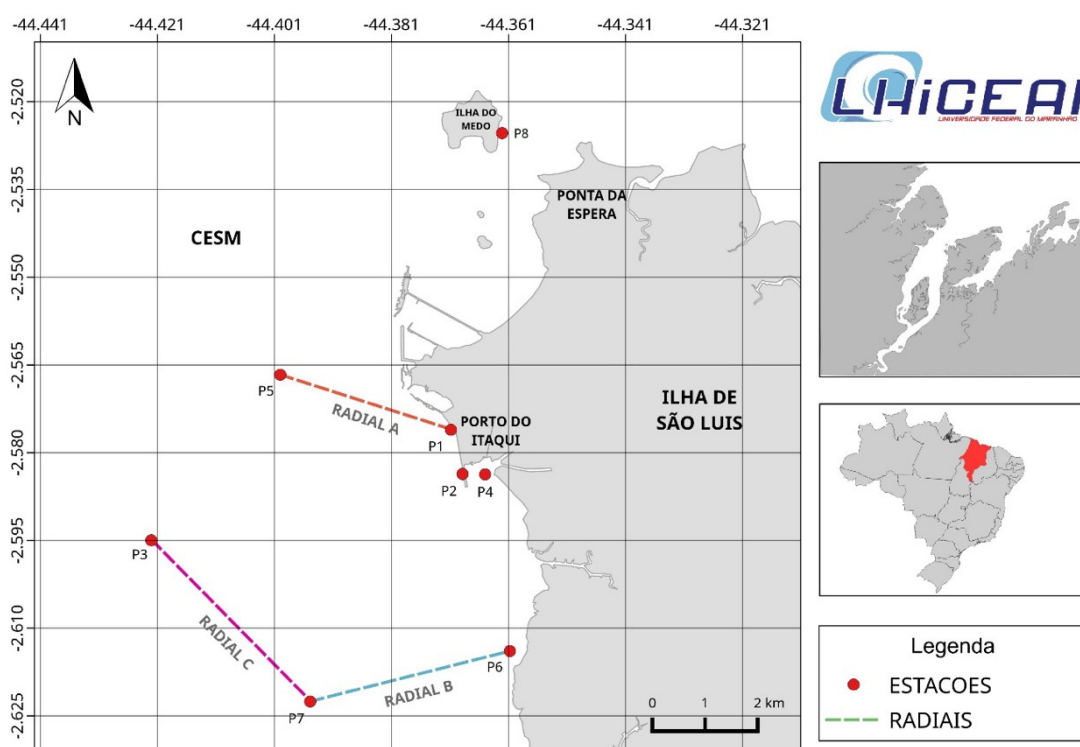


Figura 3: Localização das radiais correntográficas e estações hidrográficas na região ao largo do Complexo Portuário de São Luís para a primeira campanha.

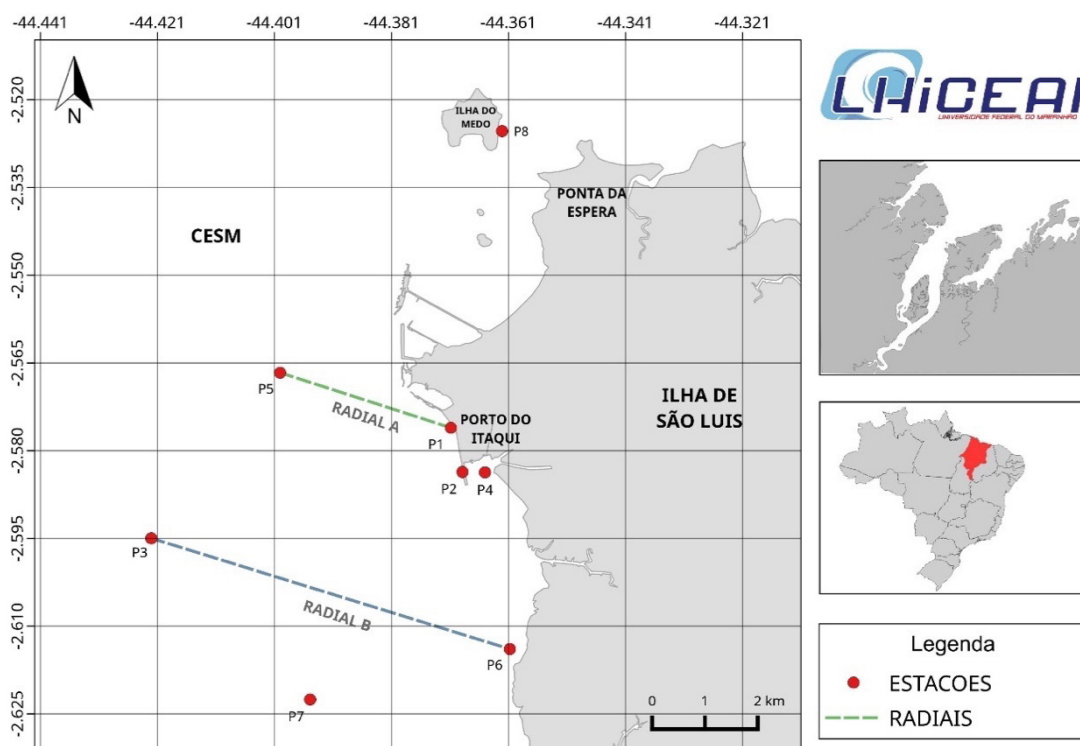


Figura 4: Localização das radiais correntográficas e estações hidrográficas na região ao largo do Complexo Portuário de São Luís para as segunda, terceira e quarta campanhas.

As seções transversais ao escoamento foram assim divididas: três radiais correntográficas para a primeira campanha e duas radiais correntográficas para as três campanhas posteriores, em evento de maré vazante (Figuras 5, 6, 7 e 8).

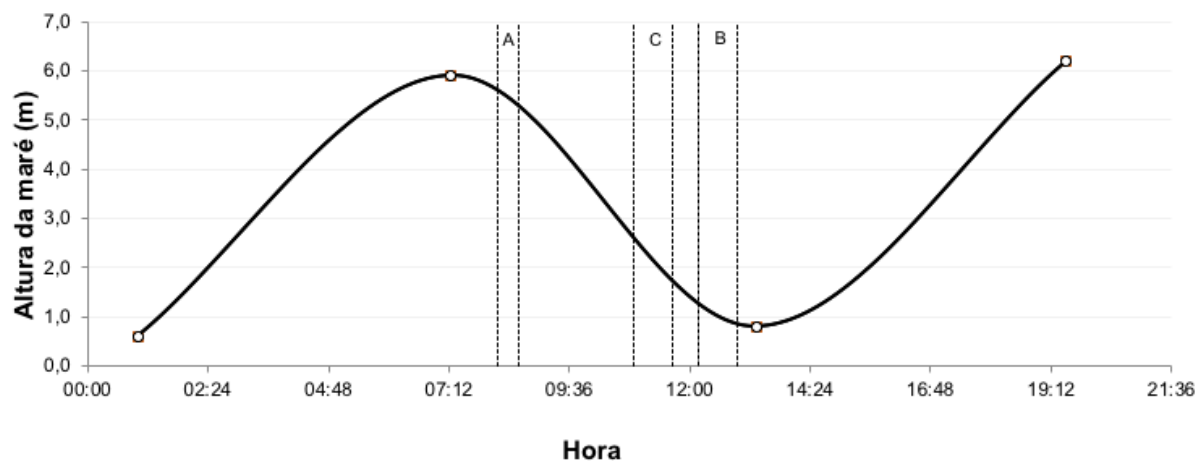


Figura 5: Representação do comportamento da maré durante a primeira campanha. As linhas tracejadas referem-se aos períodos de aquisição dos dados do campo de corrente de cada radial. A: Radial A; B: Radial B e C: Radial C.

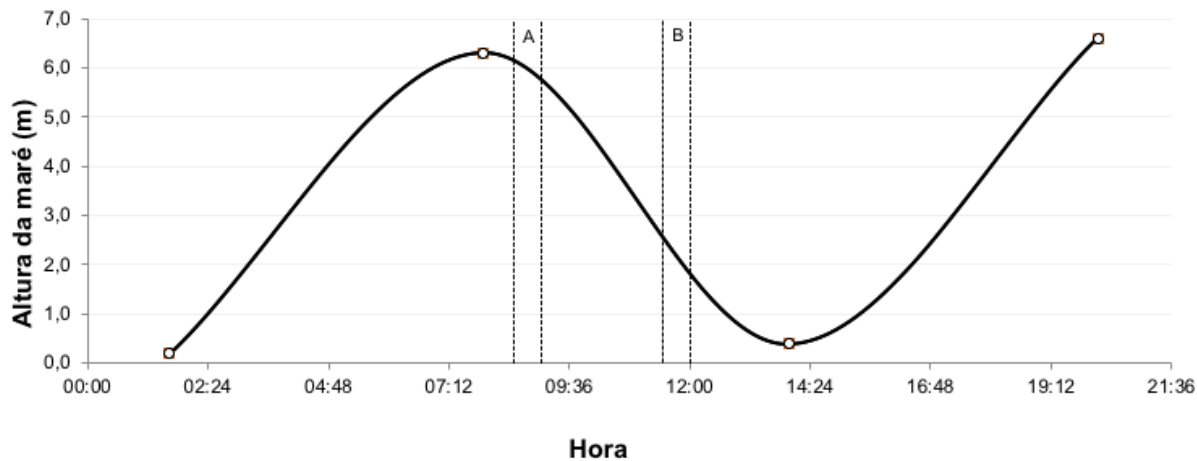


Figura 6: Representação do comportamento da maré durante a segunda campanha. As linhas tracejadas referem-se aos períodos de aquisição dos dados do campo de corrente de cada radial. A: Radial A e B: Radial B.

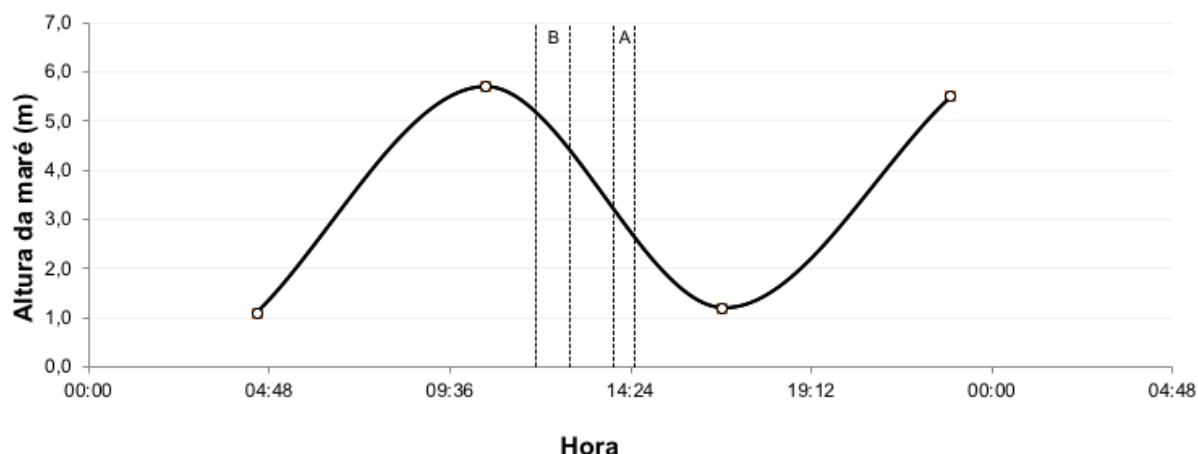


Figura 7: Representação do comportamento da maré durante a terceira campanha. As linhas tracejadas referem-se aos períodos de aquisição dos dados do campo de corrente de cada radial. A: Radial A e B: Radial B.

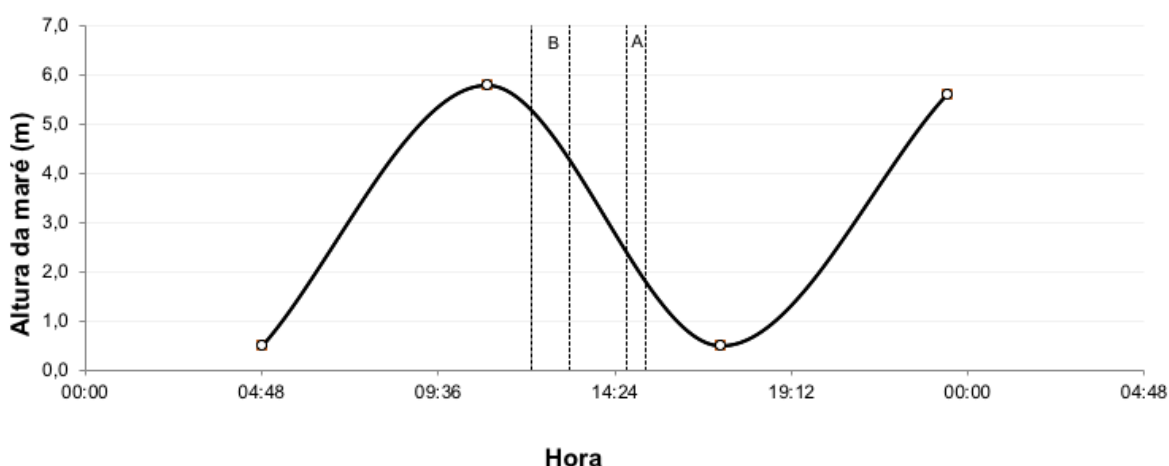


Figura 8: Representação do comportamento da maré durante a quarta campanha. As linhas tracejadas referem-se aos períodos de aquisição dos dados do campo de corrente de cada radial. A: Radial A e B: Radial B.

4.3. Caracterização do campo de correntes

Os dados dos campos de corrente foram adquiridos com o auxílio de um sensor de movimentos de fluidos baseado em acústica submarina, o *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) fabricado pela SONTEK/YSI com frequência de 500 kHz, em seções transversais ao escoamento, rebocado em uma prancha preso na popa da embarcação (Figura 9), com velocidade não superior a 2 nós. A aquisição dos dados foi feita a cada 5 segundos (*Burst interval*), acoplado a um sistema *Bottom Tracking* que usa o fundo como referencial. A extensão vertical de cada célula foi de 1 m, com distância de branco de 1,5 m e alcance máximo de 80 m.



Figura 9: ADCP acoplado à prancha, rebocado na popa da embarcação. Fonte: Silva (2016).

4.3.1. Decomposição da velocidade

O vetor velocidade foi decomposto nas componentes longitudinal (u , *Along Channel*) e transversal (v , *Cross Channel*), utilizando-se:

$$r = (d \pm \gamma) \quad (1)$$

onde r é a componente reduzida em relação ao eixo escolhido; d é a componente em relação ao norte magnético e γ é o ângulo do eixo longitudinal.

Partindo da equação 1, Miranda et al. (2002) propôs que a correção final da direção θ fosse dada por:

$$\theta = 90^\circ - (dd \pm D) \pm \gamma \quad (2)$$

onde θ é a direção da corrente; dd é a direção da corrente medida pelo ADCP e D é a correção pela declinação magnética. O ângulo utilizado para todos os perfis foi de 45° .

4.3.2. Remoção de dados espúrios

A velocidade vertical foi um dos parâmetros de diagnóstico utilizado para validar a qualidade dos dados, haja visto que ela é muito pequena quando comparada com a velocidade horizontal (Bergamo et al., 2002). Desta forma, os perfis que tiveram

valores de velocidade maiores que os horizontais foram removidos. Além disso, os vetores de velocidade que apresentaram magnitudes superiores a 4 m.s^{-1} foram considerados espúrios, sendo descartados.

Sob o ponto de vista físico foi utilizado um filtro subjetivo, descartando dados que apresentaram mudanças bruscas e isoladas na direção ou magnitude da velocidade.

4.3.3. Gradeamento especial e vertical dos campos de corrente

Para os campos de correntes foi utilizada uma grade horizontal, cujos vértices coincidem com as coordenadas e início e fim de cada radial. A condição de contorno de não-escorregamento junto ao fundo foi aplicada para melhor representar a realidade, onde transformamos os dados do domínio (x, y, t) para o domínio (x, y, t_0) .

Após a construção dos componentes horizontais das correntes e calculados os valores das velocidades paralelas e transversais, a direção do escoamento do CPSL, foi inserida na grade para as radiais, sendo delimitadas pela i -ésima profundidade de cada ponto.

4.4. Estrutura termohalina e oxigênio dissolvido

4.4.1. Aquisição dos dados

Para a obtenção da distribuição espacial da estrutura termohalina da região ao largo do CPSL, foi criada uma grade curvilínea (Figura 10) com distância média nas direções x e y de 300 m, a fim de contemplarmos os gradientes horizontais (∇_H) de salinidade, temperatura e densidade na região. A grade criada foi baseada na técnica de elementos finitos, usando polígonos de Voronoi como faces delimitadoras.

Em cada estação hidrográfica foi realizado um perfil da superfície ao fundo para aquisição de dados de condutividade e temperatura, com o auxílio de um CTD (YSI/EXO2) (Figura 10). O CTD tem sensores de temperatura com amplitude de medida entre -5° e 40°C ; condutividade com amplitude de medição entre 0 e $90 \text{ }\mu\text{m.cm}^{-1}$, oxigênio dissolvido com amplitude de medição $\pm 0,1 \text{ mg/L}$ e pressão com amplitude de medida entre 0 e 300 dbar. A frequência de aquisição dos dados, pelo CTD, foi de 15 Hz, a uma velocidade de descida de 1 m.s^{-1} . Estes dados foram tratados segundo a TEOS-10 (*Thermodynamic Equations of Sea Water*).

O CTD foi utilizado como uma unidade autônoma, sendo os dados armazenados na memória do equipamento e, quando o CTD era retirado da água os dados eram descarregados, passando por controle de qualidade inicial. Foram eliminados dados inconsistentes (provenientes de erros sistemáticos e aleatórios) e estas lacunas foram preenchidas através do uso de uma interpolação linear: apenas os perfis que tiveram um nível de interpolação menores que 5% foram considerados na análise. Apenas os dados obtidos durante a descida do CTD foram considerados, pois o processo de subida do aparelho é considerado mais turbulento que o processo de descida, gerando perturbações na estratificação da coluna d'água.

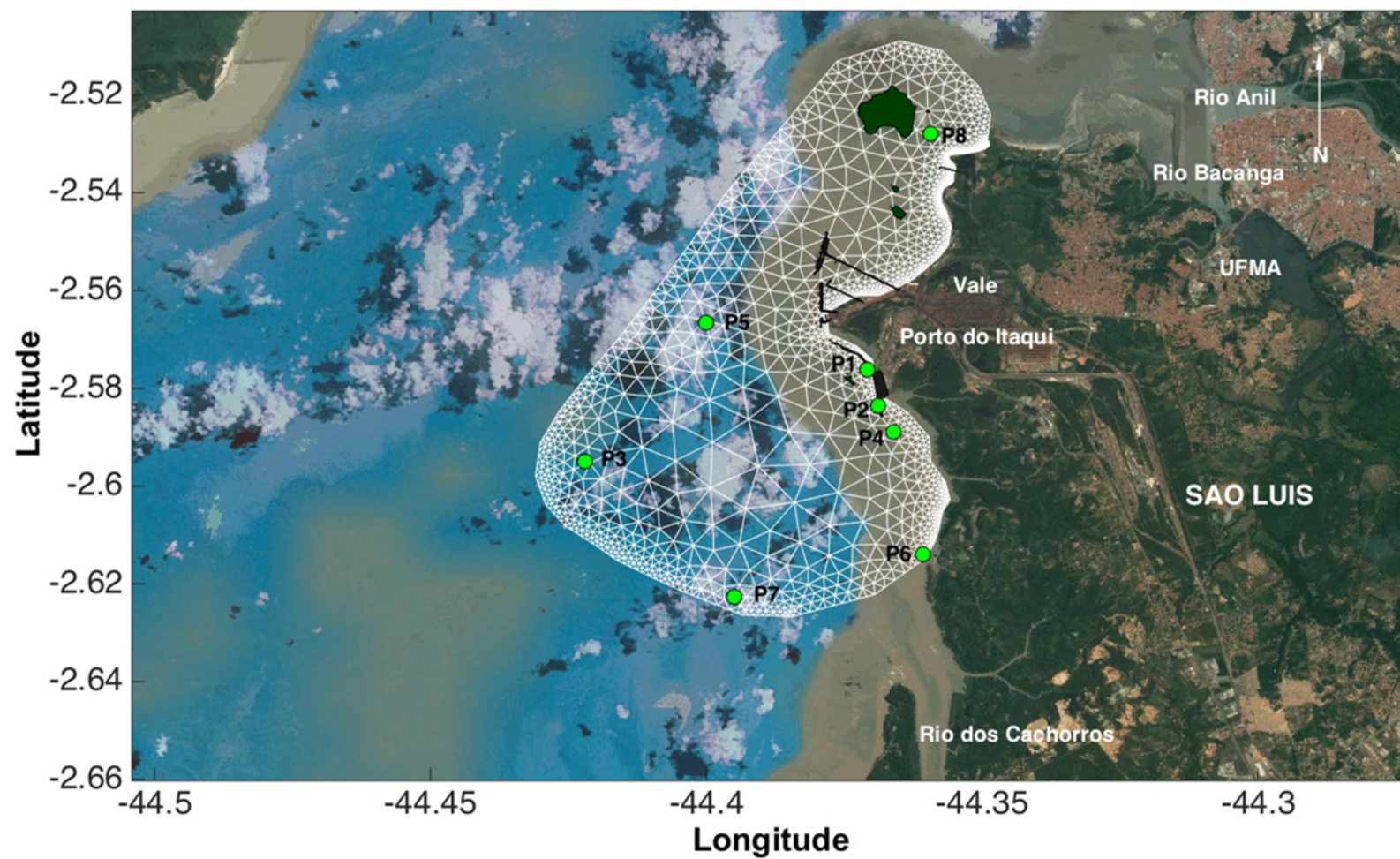


Figura 10: Representação da grade curvilínea utilizada para mostrar o comportamento das variáveis de estado e oxigênio dissolvido.



Figura 11: CTD/EXO2, com grade de proteção.

4.4.2. Tratamento estatístico dos dados

Para uma melhor análise dos dados, os perfis hidrográficos realizados com o CTD foram divididos em blocos de 0,5 m de espessura, desde a superfície até o fundo. Em cada bloco, os dados que diferiram da média em ± 3 vezes o desvio padrão do bloco foram eliminados (Emery e Thompson, 1998).

A utilização do CTD em uma velocidade de descida de 1 m.s^{-1} e frequência de aquisição de dados de 15 hz, permitiu a aquisição de 15 dados de temperatura e condutividade por metro de coluna d'água. No entanto, devido ao jogo da embarcação e a operação manual do cabo que desceu o CTD, não foi possível garantir um equiespaçamento vertical entre as amostras no momento da amostragem. Sendo assim, foi calculada uma média vertical para cada 0,5 m de coluna d'água, o que resultou em perfis equiespaçados verticalmente.

Com a realização do equiespaçamento vertical e a retirada dos valores espúrios, os valores dos dados de temperatura e salinidade foram recalculados utilizando um procedimento conhecido na literatura como "filtragem por janela móvel", para cada 0,5 m de água. Os valores retirados neste procedimento foram 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. Este procedimento é necessário, pois os dados de CTD são extremamente

ruidosos. Entretanto, esse procedimento deve ser usado com o cuidado necessário para que gradientes importantes das propriedades não sejam atenuados.

Optou-se por utilizar uma janela de 1 m para os pontos amostrais. A janela utilizada neste estudo foi a *Hanning*, a qual promove uma distribuição de pesos de caráter gaussiano, privilegiando a medida central.

A densidade (σ_t) foi calculada de acordo com metodologia proposta por Miranda et al., 2002, através da equação 3:

$$\sigma_t = \rho(S, T, P_{atm}) - 10^3 \quad (3)$$

onde: $\rho(S, T, P_{atm})$ é a densidade da água do mar com salinidade (S) e temperatura (T) a uma pressão atmosférica.

4.4.3. Tratamento estatístico dos dados

Foi construído o diagrama T-S espalhado que, no plano, TS representam observações de salinidade e temperatura (Miranda, 1982; Miranda, 1985), postos na ordenada e na abcissa do diagrama cartesiano, respectivamente (Miranda et al., 2002). Para a estimativa da área horizontal e vertical de influência de um dado par TS (temperatura e salinidade), foi levada em consideração a isotropia na distribuição das estações hidrográficas.

A distância vertical para cada par TS foi definida como:

$$d_i \begin{cases} \frac{h_{i+1}-h_i}{2} & \text{se } i = 1 \\ \frac{h_{i+1}-h_{i-1}}{2} & \text{se } i < 1 < n \\ Z - h_i + \frac{h_i-h_{i-1}}{2} & \text{se } i = n \end{cases} \quad (4)$$

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

4.5. Transporte de volume por unidade de área

O transporte de volume (T_v) ou vazão estuarina nas seções transversais ao fluxo médio da área $A = A(x,Z)$ ao largo do CPSL foram calculados através da integração numérica:

$$T_v = \iint_A \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad (5)$$

onde: $\vec{v} = \vec{v}(x, Z, t)$ é o vetor velocidade; $\vec{n}$ é o versor normal à seção A; t é o instante amostral; x é a distância horizontal da seção; z é a profundidade. Essa quantidade física foi calculada em unidades do Sistema Internacional (SI) (m^3s^{-1}). Maiores detalhes a cerca desta metodologia podem ser obtidos em Miranda et al. (2002).

4.6. Material particulado em suspensão (MPS)

O Material Particulado em Suspensão (MPS) foi amostrado a partir de 5 litros de água, coletada com uma garrafa de *Van Dorn* (Figura 12), lastreada com chumbo de 10 kg para controlar a estabilidade e o prumo vertical.



Figura 12: Garrafa de *Van Dorn* utilizada para coleta de água para aquisição do MPS na área de estudo. Fonte: Autora.

Durante os percursos realizados na área de estudo, foram coletadas amostras de água em superfície e fundo. As profundidades de coleta foram definidas

utilizando-se a profundidade máxima das correntes, tendo como base o ADCP. Considerou-se como superfície, a lâmina de água situada 0,5 m abaixo da superfície e como fundo o último metro acima do fundo.

Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em garrafas de polietileno de 500 mL e mantidas sob refrigeração a 4 °C até a chegada ao laboratório.

Os teores de MPS foram obtidos, por gravimetria, através da diferença de pesos antes e após o processo de filtragem em filtros de fibra de vidro (Milipore AP040), como descrito na equação 6 (Strickland e Parsons, 1972).

$$MPS (mg.L^{-1}) = \frac{(B-A) \times 1000}{\text{volume da amostra (mL)}} \quad (6)$$

onde:

A = peso do filtro (mg);

B = peso do filtro + resíduo seco (mg).

4.7. Fluxos instantâneos de MPS

A quantificação do volume de água que passa em uma determinada região do CPSL (vazões) é importante para que seja possível mensurar a competência do fluido no transporte de um determinado material na coluna d'água. Esta estimativa é dada pelos dados coletados com o ADCP, o qual estima a velocidade das correntes de acordo com a velocidade do deslocamento das partículas do fluido.

O transporte de MPS pode ser estimado considerando as correntes e as concentrações dos sólidos em suspensão, a saber:

Considere-se uma superfície A, na Figura 13, através da qual o constituinte *m* é transportado por um dado campo de velocidade.

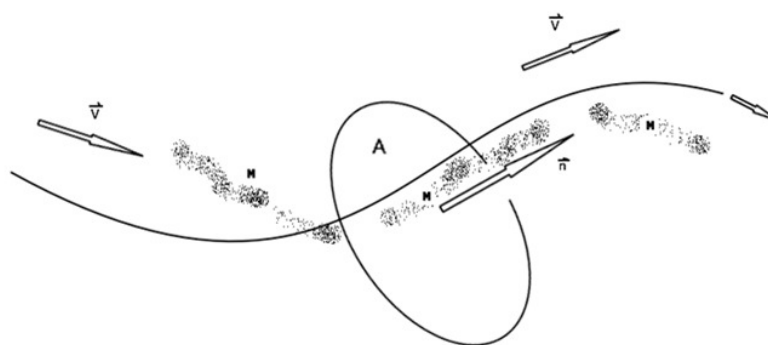


Figura 13: Representação visual de um modelo de transporte. Fonte: LHiCEAI (2014).

A formulação para a equação de transporte do constituinte é dada por:

$$Q = \iint \vec{n} \cdot m \cdot dx \cdot dy \quad (7)$$

onde: m é a concentração do constituinte; $\vec{n}$ é o componente da velocidade normal à superfície A ; dx e dy são os elementos infinitesimais em direções ortogonais tangentes à superfície no ponto que contém a base do vetor $\vec{n}$.

No caso das seções do CPSL, a estimativa do transporte pode ser substituída por uma representação no espaço discreto da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^{nx} \sum_{k=1}^{nz} (v_{i,k} \cdot \varphi_{i,k} \cdot \delta x_i \cdot \delta z_k) \quad (8)$$

onde: i, k são os índices na direção horizontal e vertical, respectivamente; $v_{i,k}$ é a normal da velocidade na direção normal à superfície; $\varphi_{i,k}$ o constituinte; $\delta x_i, \delta z_k$ são o comprimento dos elementos de área na horizontal e na vertical, respectivamente.

4.8. Interações continente-oceano

4.8.1. Volume de água total

O volume de água total (dv) foi calculado a partir do T_v , em m^3 :

$$dv = \int_0^T |T_v| \quad (9)$$

onde: T é o tempo em segundos de meio ciclo de maré.

4.8.2. Volume de água total

O volume de água doce que existe na massa de água estuarina, Vfw , em m^3 , foi obtido a partir da equação 10. A partir disto, considerando-se o volume de água total, foi determinado o percentual de água doce (Pad) para o período estudado.

$$Vfw = \frac{1}{v} \int \frac{S_o - S_e}{S_o} dv \quad (10)$$

onde: S_o é a salinidade observada regionalmente para a água do mar ($36,2 \text{ g.kg}^{-1}$) e S_e é a média aritmética da salinidade medida *in situ* para a seção do canal estuarino.

4.8.3. Tempo de residência

O tempo de residência (TR) para as substâncias orgânicas e/ou inorgânicas transportadas e retidas no sistema estuarino, é a razão entre o volume de água doce (V_{fw}) contido no estuário e o T_v , como demonstrado:

$$T_R = \frac{V_{fw}}{T_v} \quad (11)$$

4.9. Cálculo das anomalias

O cálculo das anomalias foi definido através da diferença dos valores encontrados de temperatura ($\emptyset T$), salinidade ($\emptyset S$), densidade ($\emptyset \sigma_t$), oxigênio dissolvido ($\emptyset OD$) e material particulado em suspensão ($\emptyset MPS$), de acordo com a equação:

$$\emptyset P = \nabla P_{sup} - \nabla P_{fun} \quad (12)$$

onde: $\emptyset P$ é a anomalia (SI) da propriedade; ∇P é o gradiente horizontal de uma propriedade qualquer na superfície e no fundo, respectivamente. $\emptyset P > 0$ mostram que os gradientes horizontais de superfície são mais importantes; e quando $\emptyset P < 0$ são os gradientes horizontais de fundo que ganham importância.

5. RESULTADOS

5.1. Correntes no CPSL

Visando a caracterização do padrão de circulação na região ao largo do Complexo Portuário de São Luís (CPSL), a vetorização das correntes foi realizada a partir dos valores médios interpolados das componentes longitudinal (u) e transversal (v) ao escoamento, obtidos vários perfis de ADCP ao longo de cada uma das radiais amostrais. Ressalva-se que a atividade de dragagem é passiva ao escoamento do fluido e, portanto, não influi na hidrodinâmica da região estudada.

Por convenção adotaremos $u > 0$ (positivo) para as velocidades, já que todo o período amostral foi realizado somente em maré vazante. As Tabelas 2, 3 e 4 sumarizam os dados de velocidades médias, longitudinais e transversais das correntes para as radiais nos períodos pré-dragagem (1ª campanha), durante a atividade de dragagem (2ª e 3ª campanhas) e pós dragagem (4ª campanha).

Tabela 2: Valores das velocidades verticais médias para as radiais das campanhas realizadas durante todo o período amostral. MIN corresponde aos valores mínimos; MAX corresponde aos valores máximos; MED corresponde aos valores médios das velocidades e DESV são os respectivos desvios padrão.

VELOCIDADES MÉDIAS (m.s⁻¹)				
Radial A				
	1ª campanha	2ª campanha	3ª campanha	4ª campanha
MIN	0,16	0,02	0,02	0,02
MAX	2,33	3,76	2,38	2,68
MED	1,28	1,02	1,02	0,95
DESV	0,3	0,02	0,03	0,06
Radial B				
MIN	0,9	0,01	0,01	0,01
MAX	2,13	2,35	1,79	2,81
MED	0,53	0,53	0,55	0,94
DESV	0,2	0,03	0,02	0,06
Variação do nível de água (m)				
	5,6	6,4	4,6	5,3

Tabela 3: Valores das velocidades longitudinais para as radiais das campanhas realizadas durante todo o período amostral. MIN corresponde aos valores mínimos; MAX corresponde aos valores máximos; MED corresponde aos valores médios das velocidades e DESV são os respectivos desvios padrão.

VELOCIDADES LONGITUDINAIS (m.s⁻¹)				
Radial A				
	1ª campanha	2ª campanha	3ª campanha	4ª campanha
MIN	0,8	0,23	0,01	0,01
MAX	2,3	3,35	2,24	2,47
MED	1,19	0,71	0,90	0,74
DESV	0,2	0,04	0,02	0,08
Radial B				
MIN	0,3	0,18	0,02	0,01
MAX	2,0	1,28	1,51	2,63
MED	0,27	0,28	0,43	0,51
DESV	0,3	0,01	0,02	0,06

Tabela 4: Valores das velocidades transversais para as radiais das campanhas realizadas durante todo o período amostral. MIN corresponde aos valores mínimos; MAX corresponde aos valores máximos; MED corresponde aos valores médios das velocidades e DESV são os respectivos desvios padrão.

VELOCIDADES TRANSVERSAIS (m.s⁻¹)				
Radial A				
	1ª campanha	2ª campanha	3ª campanha	4ª campanha
MIN	0,4	0,04	0,01	0,01
MAX	1,2	2,73	1,58	1,85
MED	0,2	0,34	0,37	0,45
DESV	0,1	0,03	0,01	0,05
Radial B				
MIN	0,78	0,10	0,01	0,01
MAX	1,3	2,18	1,72	2,59
MED	0,18	0,33	0,27	0,71
DESV	0,2	0,04	0,02	0,06

Ao compararmos as velocidades das quatro campanhas (pré-dragagem, 25% da dragagem, 75% da dragagem e pós-dragagem) podemos observar que as velocidades totais médias apresentaram valores máximos da ordem de 2,68 m.s⁻¹ na radial A e 2,81 m.s⁻¹ na radial B, exceto na radial A da segunda campanha que apresentou valores de velocidades máximas 28% maiores (3,76 m.s⁻¹) e na radial B da terceira campanha, a qual apresentou uma redução de 36% (1,79 m.s⁻¹) em relação ao máximo valor para esta radial. Em relação às velocidades médias, a ordem de grandeza foi de 1 m.s⁻¹ para a radial A e de 0,55 m.s⁻¹ para a radial B. Para a radial A, observamos um aumento de 28% (1,28 m.s⁻¹) na primeira campanha, em relação às posteriores.

As velocidades da componente longitudinal apresentaram valores máximos da ordem de $2,47 \text{ m.s}^{-1}$ para a radial A e de $2,63 \text{ m.s}^{-1}$ na radial B. Assim como observado para as velocidades integradas, a segunda campanha para a radial A apresentou um incremento de 26% ($3,35 \text{ m.s}^{-1}$), enquanto que nas velocidades médias observamos um aumento de 33% ($1,19 \text{ m.s}^{-1}$) na primeira campanha em relação ao valor médio global ($0,80 \text{ m.s}^{-1}$). Para a radial B, observamos um aumento de 12% para os valores máximos e para as velocidades médias na primeira campanha, em relação às demais campanhas. As velocidades médias observadas para a radial A foram 45% e 46% maiores que as observadas na radial B, para os valores integrados e longitudinais, respectivamente.

5.1.1. Circulação espacial

A circulação espacial do campo de correntes, durante as quatro campanhas amostrais, é esquematicamente dividida em três níveis de referência: superfície, meia água e fundo.

Durante o período de pré-dragagem, podemos ter observado que a variação do campo de correntes em superfície (Figura 14-A) ocorre de forma quase uniforme para a radial A, com velocidade média de $1,28 \text{ m.s}^{-1}$, enquanto que nas radiais B e C os valores médios observados foram da ordem de $0,53 \text{ m.s}^{-1}$ e $0,61 \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente. Para a radial C, as maiores velocidades ($2,33 \text{ m.s}^{-1}$) ocorreram em direção ao canal principal do CESM, na região próxima ao P3, enquanto que nas proximidades do P7 observa-se uma inversão do campo de correntes, estuário acima. Para a radial B, nas proximidades do P6, também é observada uma inversão do campo de correntes. A inversão das correntes, nas radiais B e C, se repetiram em meia água (Figura 14-B) e junto ao fundo (Figura 14-C), o que nos leva a sugerir uma circulação estacionária na região, com características de um vórtice, cujas linhas de corrente apresentam um caráter espiralado, diminuindo de intensidade da superfície ao fundo.

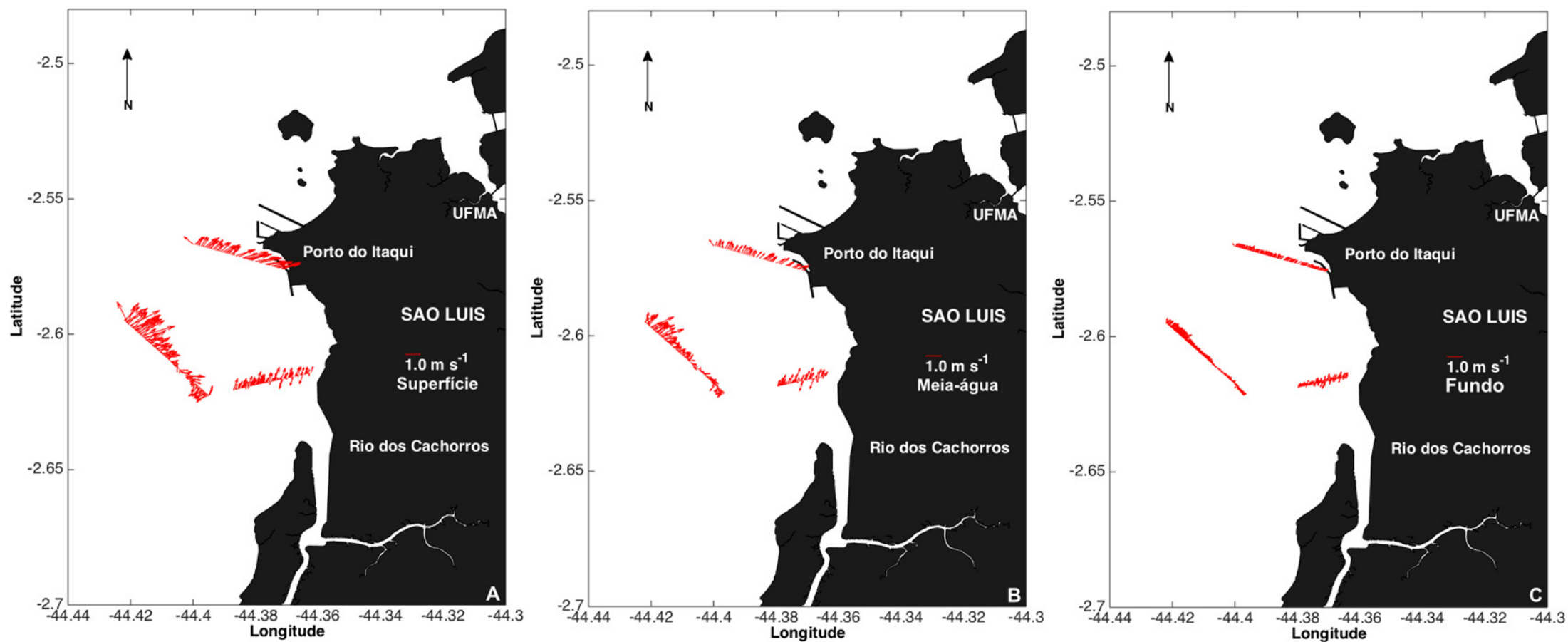


Figura 14: Distribuição espacial do campo de correntes (m.s⁻¹) durante a primeira campanha. Paine A: superfície; Paine B: meia-água e Paine C: fundo.

Com 25 % da obra de dragagem de aprofundamento em andamento, os campos de velocidades, em superfície, na radial A, ocorreram de forma quase uniforme (Figura 15-A), com velocidade média de $1,02 \text{ m.s}^{-1}$, enquanto que na radial B, os valores médios observados foram de $0,53 \text{ m.s}^{-1}$. Ao serem comparados os valores das velocidades médias para as duas radiais em relação à primeira campanha, observa-se uma redução de 21% destas da radial A e para a radial B, porém a ordem de grandeza foi mantida.

Os maiores valores de velocidade, para a radial A, na superfície, ocorreram nas proximidades do P5, enquanto que próximo ao contorno (P1), observamos uma pequena inversão do campo de velocidade. Esta inversão também foi observada na radial B, entre o P6 e a metade da extensão da radial, que coincide com a parte abrigada pelo continente. A direção preferencial das correntes, nas duas radiais, foi N-NE e a presença do contorno sólido pode causar a refração dos campos de correntes, que assume um movimento giratório no sentido horário. Este comportamento se propagou em meia água (Figura 15-B) e no fundo (Figura 15-C), cujas máximas velocidades foram de $1,02 \text{ m.s}^{-1}$ e $0,6 \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente.

Assim como ocorrido na primeira campanha, observamos que as linhas de corrente apresentam um caráter giratório, cujas intensidades diminuíram em direção ao fundo, nos fazendo sugerir a presença de um vórtice na região, através do ganho de vorticidade imposto pela presença do contorno rígido, o que pode causar um aumento do arrasto na região de atracação dos navios nos berços e píeres do CPSL. Também foi observado que a condição de contorno de não-escorregamento foi respeitada, pois as velocidades decrescem exponencialmente em direção ao fundo.

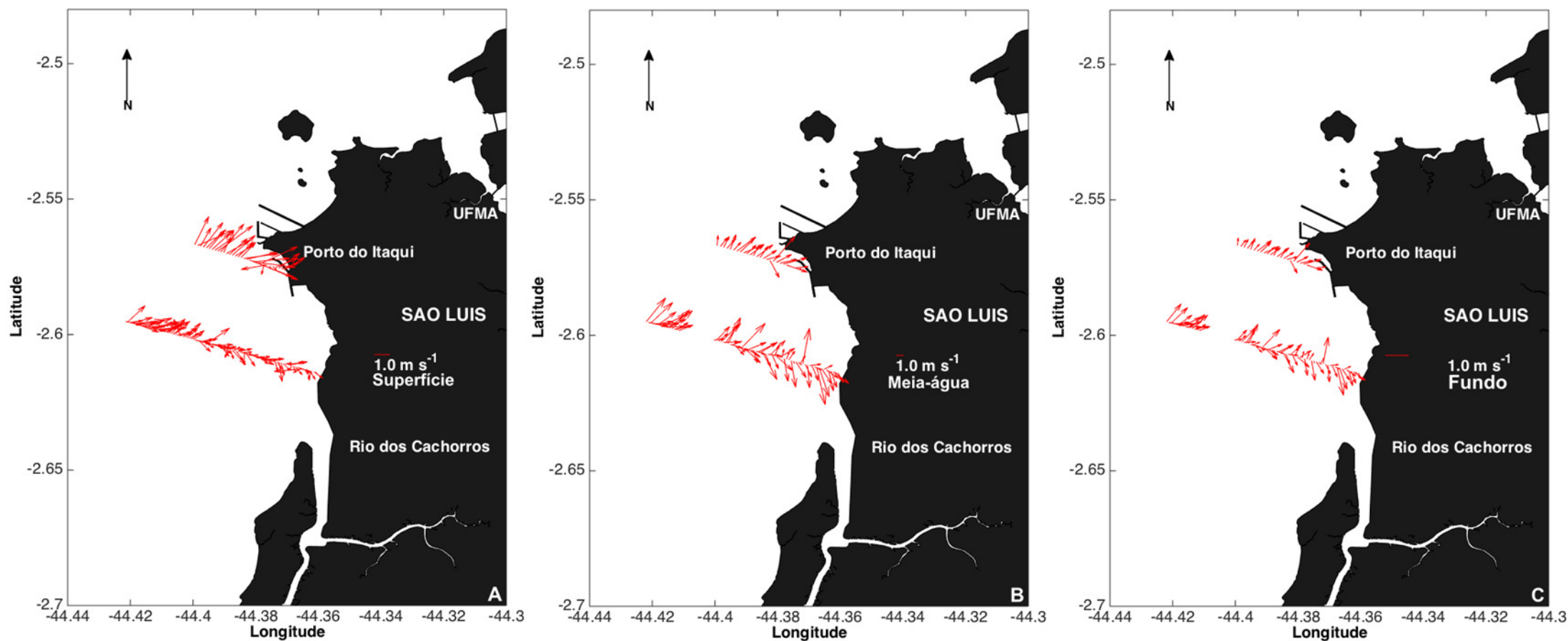


Figura 15: Representação da distribuição espacial do campo de correntes (m.s⁻¹) durante a segunda campanha. Painel A: superfície; Painel B: meia-água e Painel C: fundo.

Assim como observada nas duas campanhas iniciais (pré-dragagem e 25% do material dragado), a distribuição espacial das correntes com 75% do material dragado, em superfície, para a radial A, teve velocidade média observada de $1,02 \text{ m.s}^{-1}$, enquanto que na radial B os valores médios observados foram de $0,55 \text{ m.s}^{-1}$. Ao compararmos os valores das velocidades médias observadas na radial A, durante o período de 75% de material dragado, com as velocidades observadas nas duas campanhas anteriores (pré-dragagem e 25% do material dragado) para esta mesma radial observamos uma redução de 21% em relação à primeira campanha e mantida a mesma ordem de grandeza da segunda campanha. Já para a radial B, a ordem de grandeza foi mantida para as três campanhas.

Da mesma forma que foi observado para as duas campanhas iniciais, as maiores velocidades ($2,38 \text{ m.s}^{-1}$) para a radial A, em superfície (Figura 16-A), ocorreram nas proximidade do P5, que corresponde ao fluxo do canal principal do CESM. Este comportamento também foi observado na região do P3 até a metade da radial B, onde os valores chegaram a $1,79 \text{ m.s}^{-1}$. Nas proximidades do contorno sólido (P6) a inversão do campo de correntes, observada nas campanhas anteriores, ocorreu quase que totalmente. A direção preferencial das correntes, nas duas radiais, foi N-NE e a presença do contorno sólido gerou novamente a inversão do campo de correntes, assumindo um movimento giratório no sentido horário. Este comportamento se propagou em meia água (Figura 16-B) e no fundo (Figura 16-C), cujas velocidades máximas foram de $0,97 \text{ m.s}^{-1}$ e $0,54 \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente.

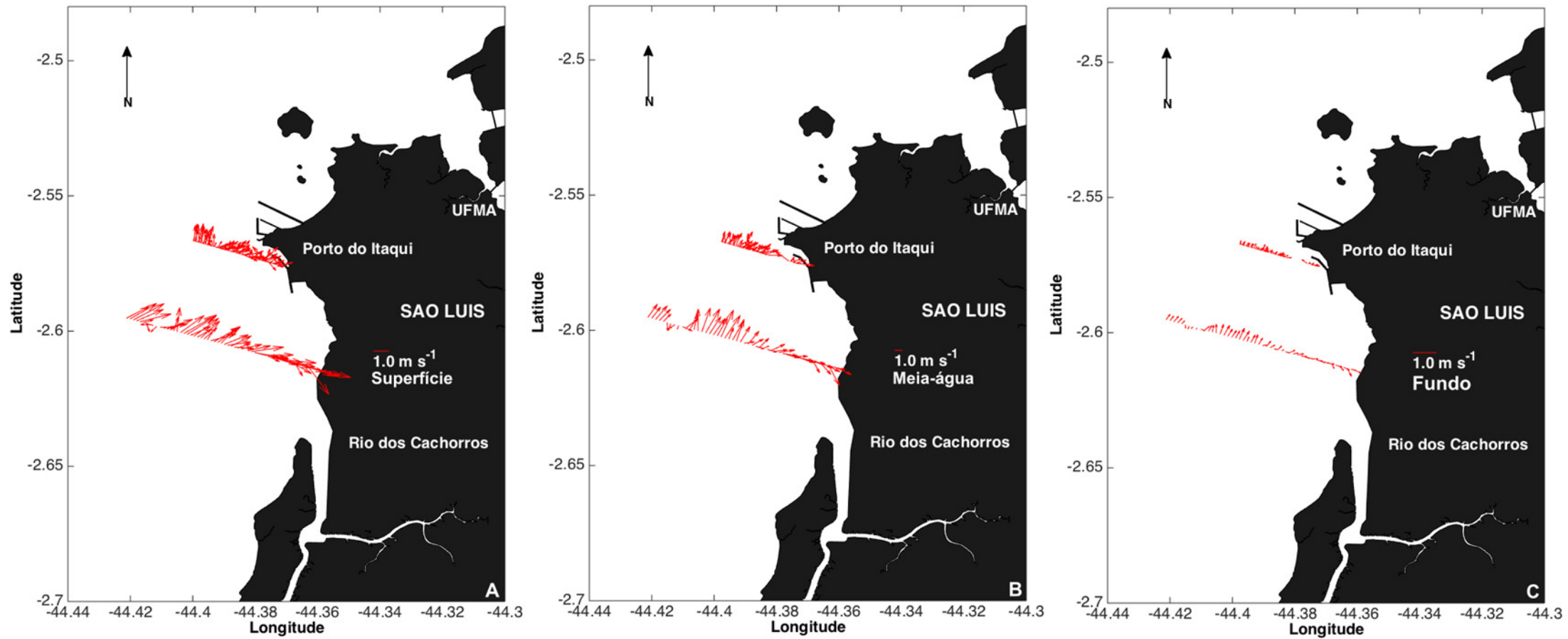


Figura 16: Representação da distribuição espacial do campo de correntes (m.s^{-1}) durante a terceira campanha. Painel A: superfície; Painel B: meia-água e Painel C: fundo.

Após a conclusão da obra de dragagem, a variação espacial do campo de correntes em superfície, para a radial A, apresentou velocidade média de $0,95 \text{ m.s}^{-1}$, enquanto que na radial B os valores médios observados foram de $0,94 \text{ m.s}^{-1}$. Ao compararmos os valores das velocidades médias do período de pós-dragagem, com as campanhas anteriores (pré-dragagem 25% e 75% do material dragado), observa-se um decréscimo de 25% em relação à primeira campanha e 7% para as segunda e terceira campanhas.

As maiores velocidades ocorreram na radial B ($2,81 \text{ m.s}^{-1}$), em superfície (Figura 17-A), nas proximidades do P6 em direção à desembocadura do rio dos Cachorros. Nas proximidades do P1 e P2 (radial B), as velocidades chegaram a $2,68 \text{ m.s}^{-1}$. Da mesma forma, nas campanhas iniciais, próximo ao contorno sólido, observamos novamente uma inversão do campo de correntes. A direção preferencial das correntes se repete, assim como a presença do contorno sólido, para todas as campanhas anteriores, sendo a primeira N-NE e a segunda ocasionando a refração do campo de correntes, que assume um movimento giratório no sentido horário. Este comportamento se propagou em meia água (Figura 17-B) e no fundo (Figura 17-C), cujas velocidades máximas nestas profundidades foram de $0,95 \text{ m.s}^{-1}$ e $0,52 \text{ m.s}^{-1}$, nesta sequência.

O comportamento das linhas de corrente se repete da mesma maneira como nas três campanhas anteriores, onde estas apresentam um caráter espiralado com intensidades diminuindo em direção ao fundo, sugerindo, mais uma vez, a presença de um contorno rígido. O contorno sólido reitera o efeito do aumento do arrasto na região de atracação dos navios na região ao largo do CPSL e também observa-se que a condição de contorno de não-eskorregamento é mantida, pois nota-se as velocidades decrescendo exponencialmente em direção ao fundo.

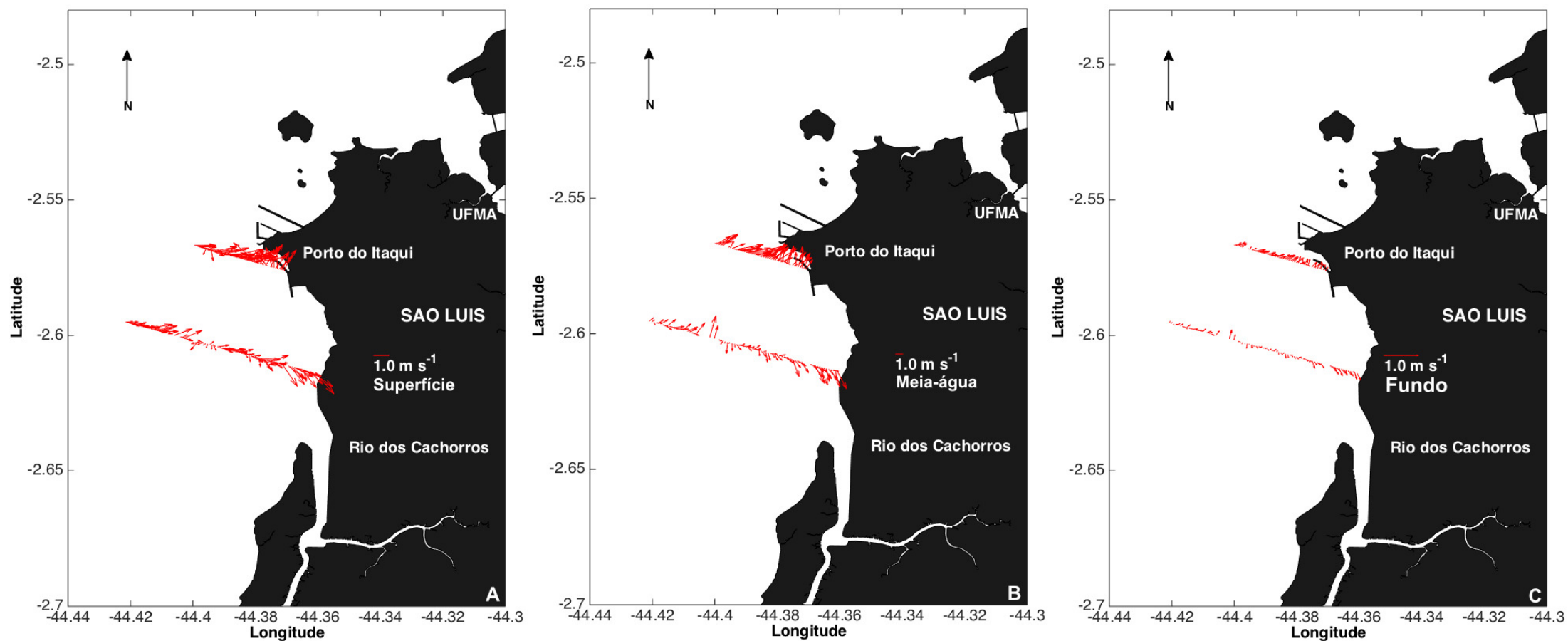


Figura 17: Representação da distribuição espacial do campo de correntes (m.s⁻¹) durante a segunda campanha. Painel A: superfície; Painel B: meia-água e Painel C: fundo.

5.1.2. Circulação ao longo da vertical

Na primeira campanha (pré-dragagem) foram observados núcleos de maiores velocidades entre a superfície até a profundidade de 20 m, nas proximidades do ponto P3 (radial C). Para estes núcleos, foram obtidas velocidades máximas de até $2,33 \text{ m.s}^{-1}$ e valores médios de $1,28 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 18-A). Para a componente longitudinal (Figura 18-B), observou-se que o escoamento é bem mais intenso, onde os núcleos de máximas velocidades são evidenciados, correspondendo a 98,7% da intensidade da corrente total. Para a componente transversal ao escoamento (Figura 18-C) resta a importância de 1,3% da intensidade total do escoamento.

Para a radial B, foi observada a menor velocidade média ($0,53 \text{ m.s}^{-1}$), com pequenos núcleos de máxima velocidade no canal de navegação ($2,13 \text{ m.s}^{-1}$) (Figura 19-A). Para a componente longitudinal (Figura 19-B), as velocidades estuário abaixo foram mais significativas, quando comparadas com a radial A, onde a velocidade máxima corresponde a 93,9% da velocidade total observada. A circulação lateral (Figura 19-C) mostra a degradação das velocidades, correspondendo a 61% da velocidade média total.

Na região de descarte do material dragado (P3) foi notado um núcleo de máxima velocidade, chegando a $2,66 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 20-A). Já a componente longitudinal (Figura 20-B), correspondeu a 97,7% da intensidade total da corrente, enquanto que a velocidade máxima da componente transversal (Figura 20-C) foi de apenas 2,3% da velocidade total.

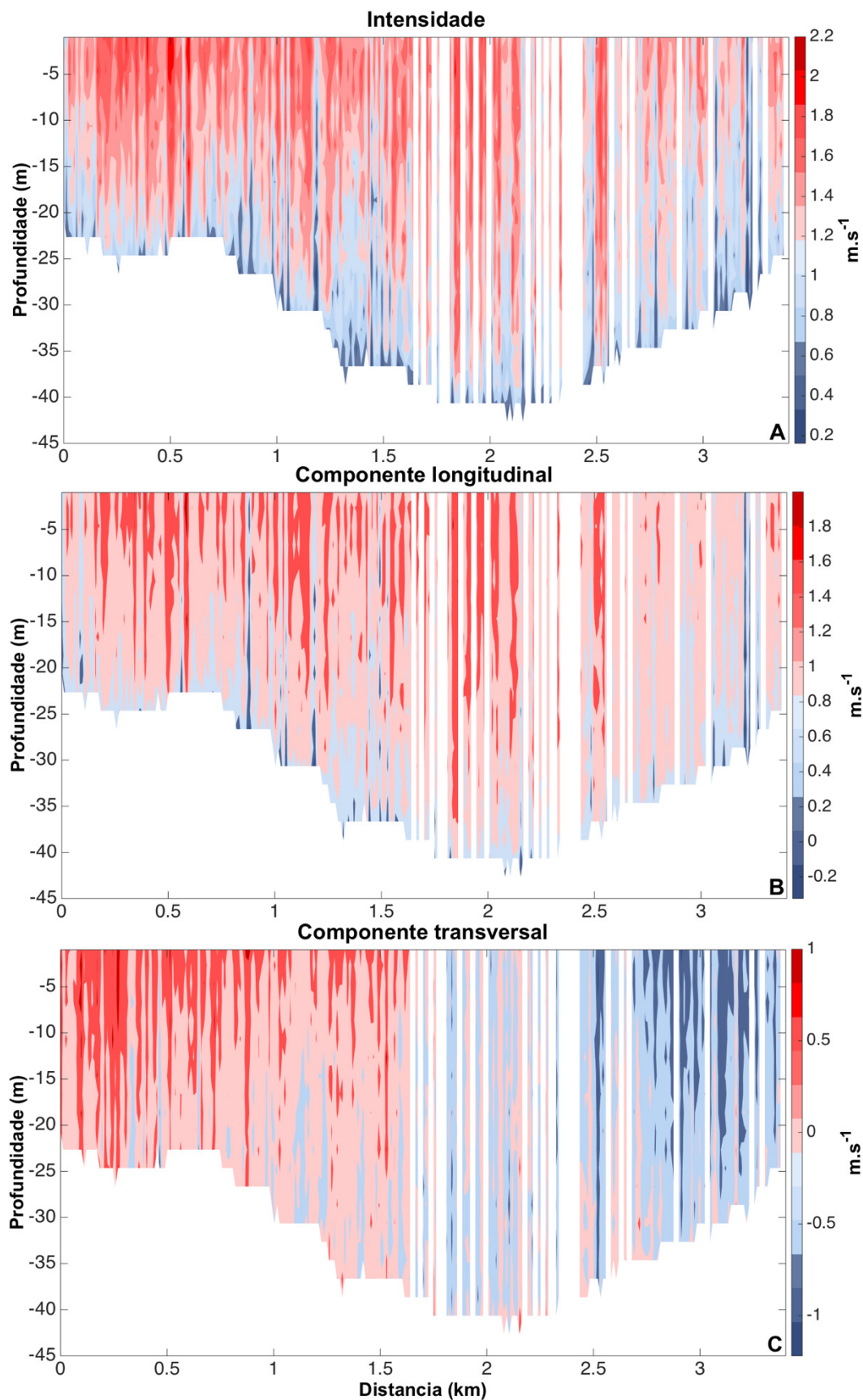


Figura 18: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}) para a radial A da primeira campanha, na região ao largo do CPSL. Painei A: Intensidade; Painei B: Componente longitudinal; Painei C: Componente transversal

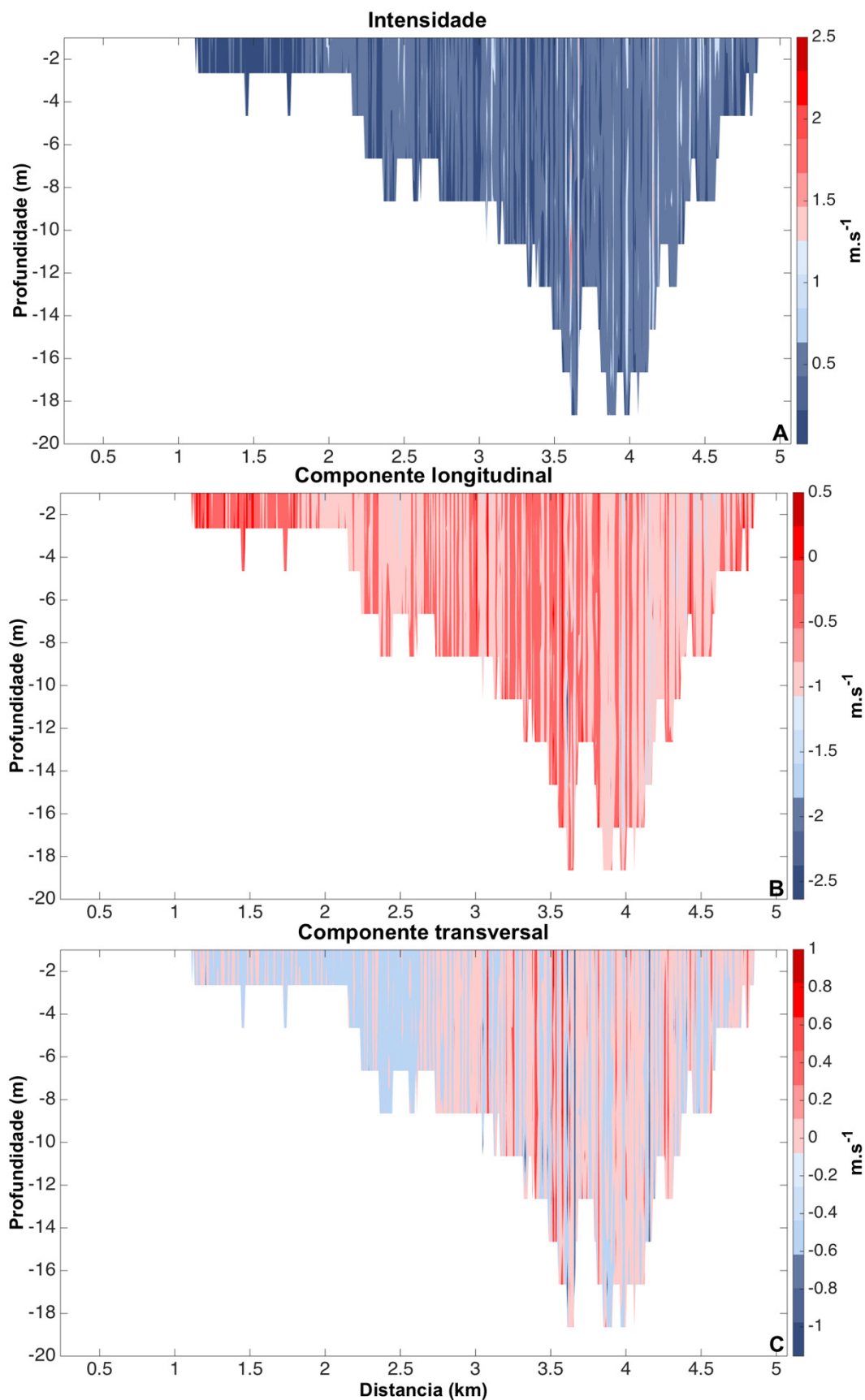


Figura 19: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}) para a radial B da primeira campanha, na região ao largo do CPSL. Painei A: Velocidade total; Painei B: Componente longitudinal; Painei C: Componente transversal.

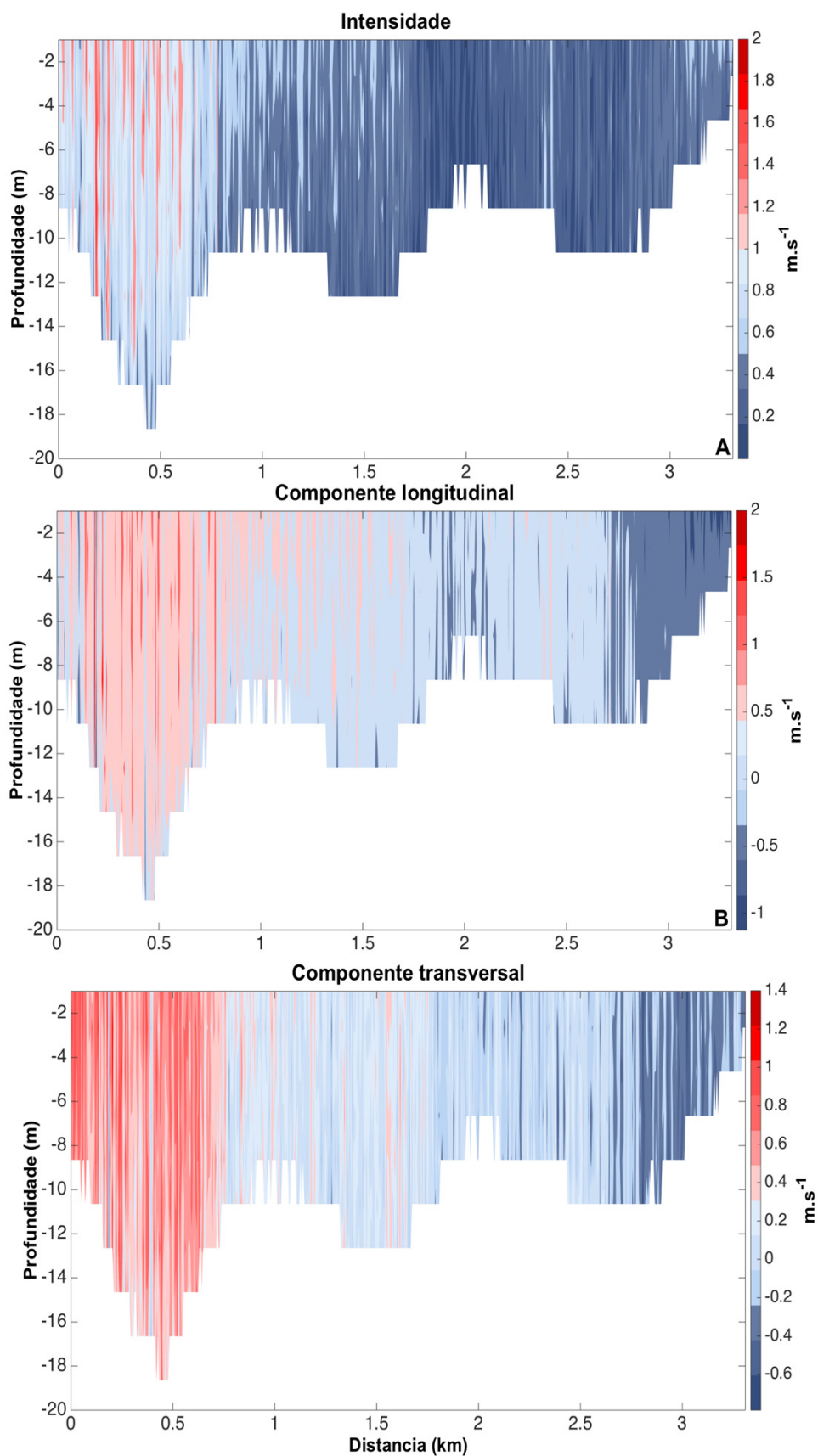


Figura 20: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}) para a radial C da primeira campanha, na região ao largo do CPSL. Painel A: Velocidade total; Painel B: Componente longitudinal; Painel C: Componente transversal.

Com 25% do material dragado foram observados núcleos de maiores velocidades entre a superfície até a profundidade de 25 m para a radial A (Figura 21-A). Para estes núcleos tivemos velocidades máximas de até $3,76 \text{ m.s}^{-1}$ e valores médios de $1,02 \text{ m.s}^{-1}$. Visualizando a componente longitudinal (Figura 21-B), o escoamento é bem mais intenso, onde os núcleos de máximas velocidades são evidenciados para a mesma região, correspondendo a 89% da intensidade da corrente total. Para a componente transversal ao escoamento (Figura 21-C) resta uma importância de 11% da intensidade total do escoamento.

Para a radial B, a velocidade média foi da ordem de $0,53 \text{ m.s}^{-1}$, onde os valores máximos chegaram a $2,35 \text{ m.s}^{-1}$, com o escoamento apresentando tendência de vazante (Figura 22-A). Para a componente longitudinal (Figura 22-B), observamos que as velocidades estuário acima são mais significativas próximas ao P6, onde a velocidade média corresponde a 55% da velocidade total observada. A componente transversal (Figura 22-C) apresenta elevada importância nesta campanha, cujas velocidades médias corresponderam a 85% da velocidade total.

Comparando o comportamento hidrodinâmico desta campanha, realizada durante a atividade de dragagem, em janeiro de 2015, com a campanha realizada antes do início das atividades, observa-se claramente uma maior relevância da circulação lateral (transversal) ao escoamento, apresentando um acréscimo de 9,7% e 34% em relação à campanha realizada em dezembro de 2014. Este acréscimo em relação às velocidades máximas, muito provavelmente, está ligado à maré de sizígia (altura do nível de água $\sim 6,1 \text{ m}$) durante a campanha realizada em janeiro de 2015, em detrimento da maré de quadratura (altura do nível de água $\sim 3 \text{ m}$) observada em dezembro de 2014 que, associado a um maior transporte de Ekman, pode gerar correntes de maré mais intensas em vazante e ganho de vorticidade próximo aos contornos.

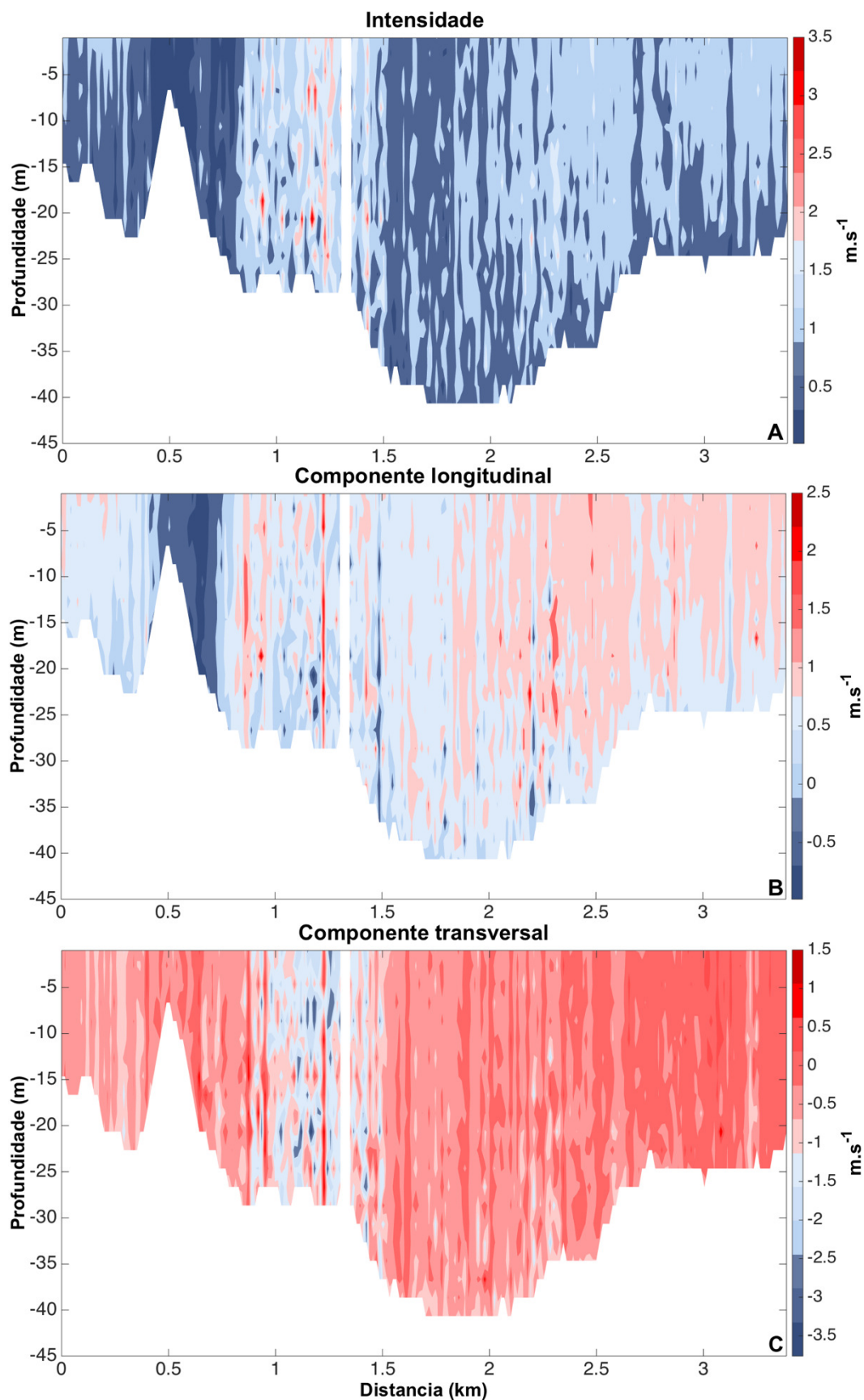


Figura 21: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}) para a radial A da segunda campanha, na região ao largo do CPSL. Painei A: Velocidade total; Painei B: Componente longitudinal; Painei C: Componente transversal.

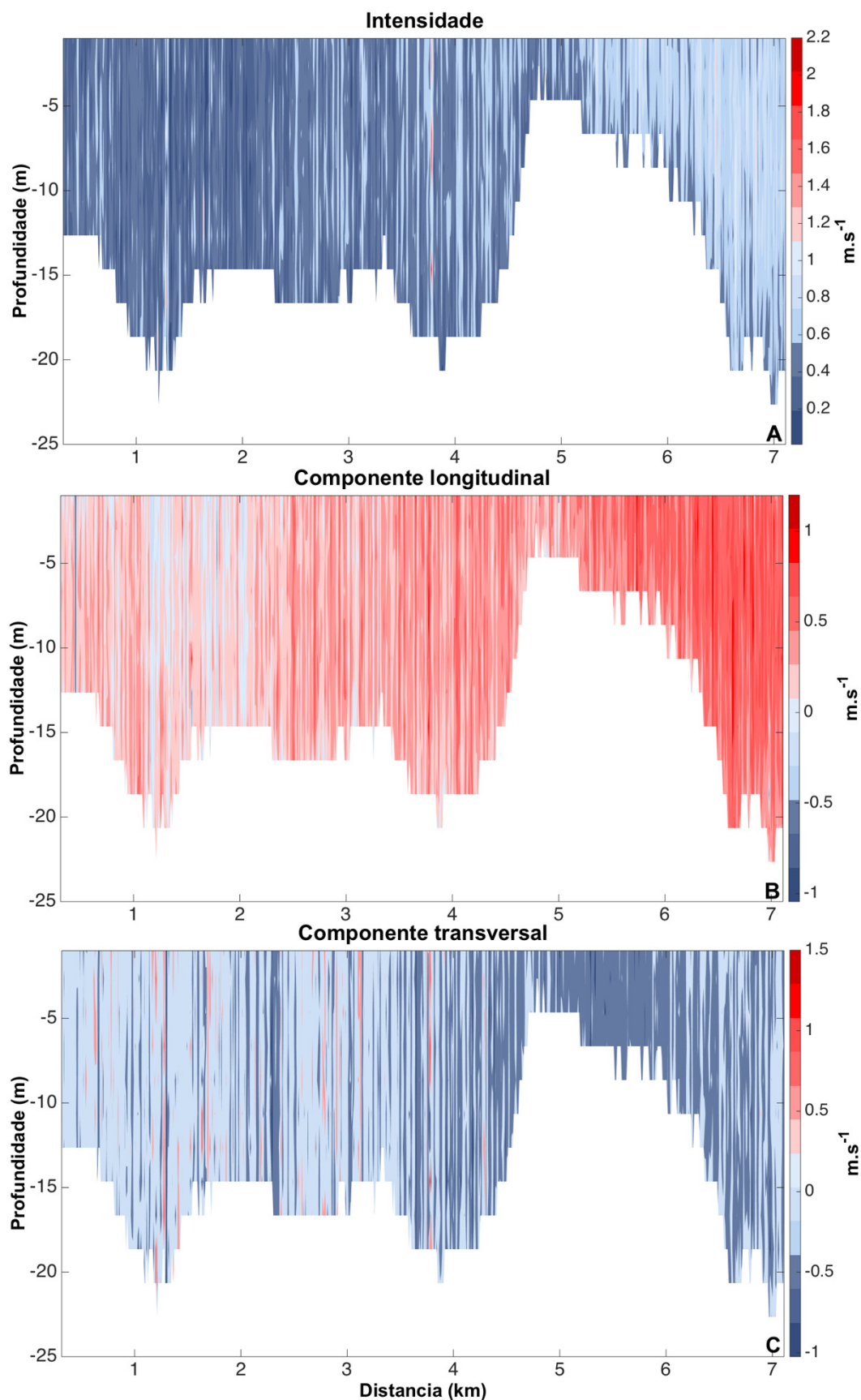


Figura 22: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}) para a radial B da segunda campanha, na região ao largo do CPSL. Painel A: Velocidade total; Painel B: Componente longitudinal; Painel C: Componente transversal.

Com o avançar da obra de dragagem (75% do material dragado), na radial A, foi possível a visualização de núcleos de máximas velocidades entre a superfície até a profundidade de 17 m (Figura 23-A), nas proximidades do ponto P5 e 1,5 km a leste deste. Para estes núcleos tivemos velocidades máximas de $2,38 \text{ m.s}^{-1}$ e valores médios de $1,02 \text{ m.s}^{-1}$. A 500 m do P5 observou-se uma diminuição brusca da profundidade, onde as velocidades decrescem a menos de 1 m.s^{-1} . Visualizando a componente longitudinal (Figura 23-B), o escoamento é bem mais intenso, onde os núcleos de máximas velocidades são evidenciados para a mesma região, correspondendo a 94,1% da intensidade da corrente total. Para a componente transversal (Figura 23-C) ao escoamento resta uma importância de 66% da intensidade total do escoamento.

Para a radial B, a velocidade média foi da ordem de $0,55 \text{ m.s}^{-1}$, onde os valores máximos chegaram a $1,79 \text{ m.s}^{-1}$ com o escoamento apresentando tendência de vazante (Figura 24-A). Assim como observado durante a segunda campanha amostral (25% do material dragado), a componente longitudinal (Figura 24-B) apresentou velocidades estuário acima mais significativas próximas ao P6, onde a velocidade máxima corresponde a 84,3% da velocidade total observada. A circulação lateral apresenta elevada importância nesta campanha (Figura 24-C), cujas velocidades corresponderam a 96% da velocidade total, corroborando com a dinâmica sugerida durante a segunda campanha.

Comparando o comportamento hidrodinâmico desta campanha com as duas campanhas anteriores (pré-dragagem e 25% do material dragado), observa-se um decréscimo de 43,2% da importância da circulação transversal ao escoamento em relação à segunda campanha e um pequeno acréscimo (10,1%) em relação à primeira campanha. Este decréscimo em relação às velocidades máximas da segunda campanha e a manutenção da ordem de grandeza em relação à primeira campanha, provavelmente, está ligado à maré de sizígia (altura do nível de água $\sim 6,4 \text{ m}$) durante a segunda campanha, em detrimento da maré de quadratura observada nas primeira e terceira campanhas.

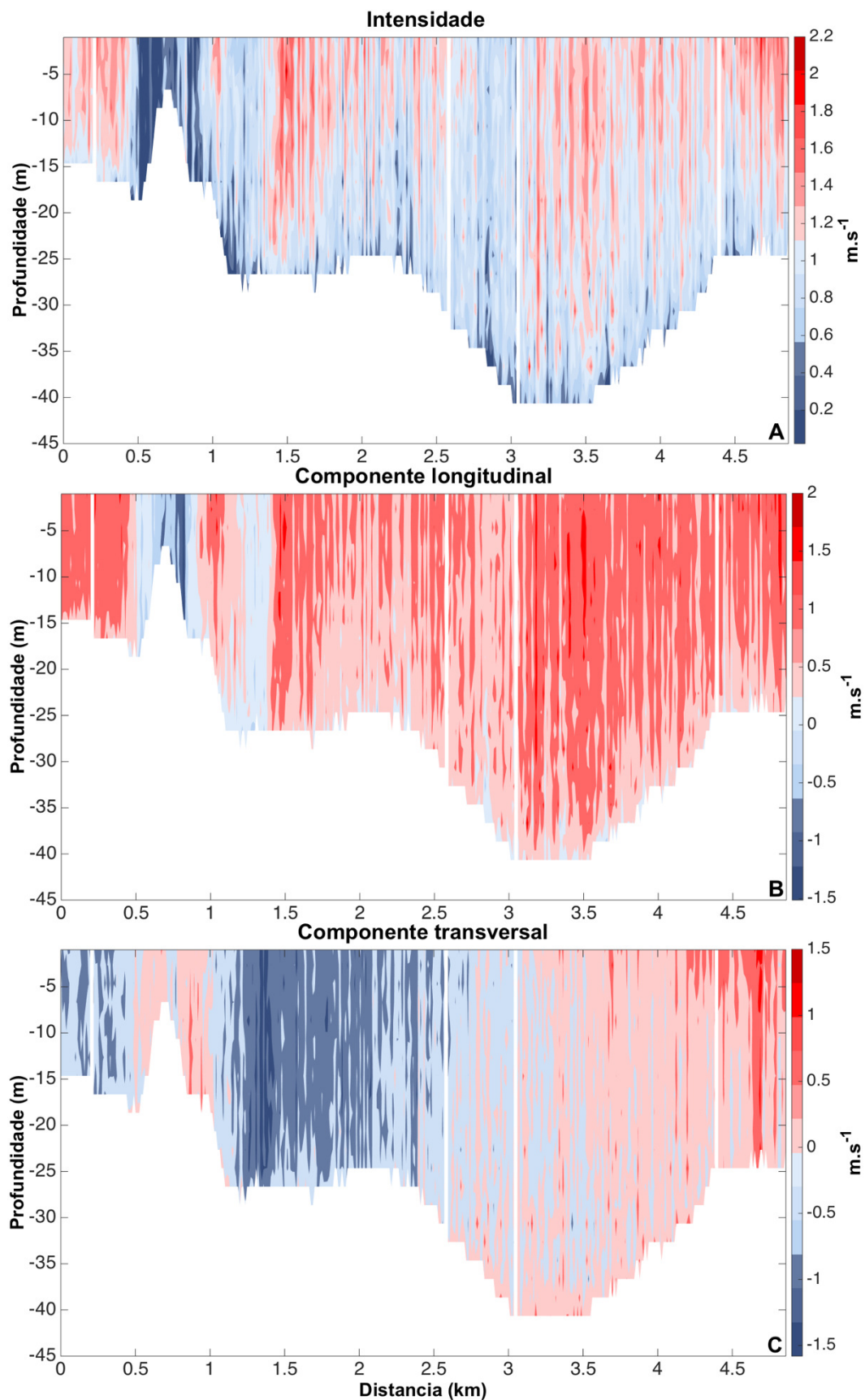


Figura 23: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}) para a radial A da terceira campanha, na região ao largo do CPSL. Painel A: Velocidade total; Painel B: Componente longitudinal; Painel C: Componente transversal.

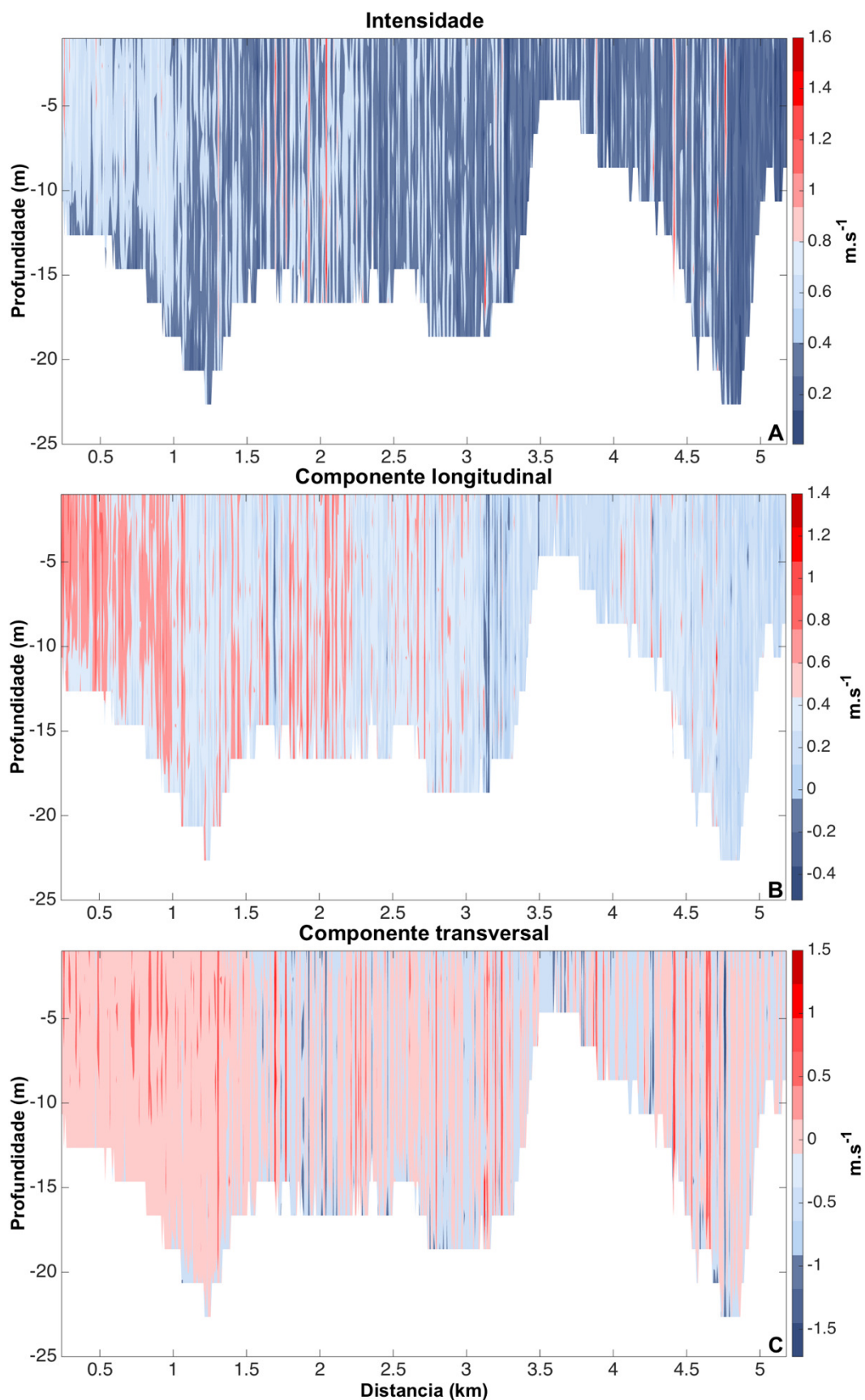


Figura 24: Distribuição vertical do campo de velocidades (m.s^{-1}) para a radial B da terceira campanha, na região ao largo do CPSL. Painel A: Velocidade total; Painel B: Componente longitudinal; Painel C: Componente transversal.

Na campanha de campo realizada no período pós-dragagem (Figura 25-A) os núcleos de maiores velocidades (até 2 m.s^{-1}) ocorreram entre a superfície e a profundidade de 30 m nas proximidades do P5 e a 2 km a leste deste. Para estes núcleos ocorreram velocidades máximas de até $2,68 \text{ m.s}^{-1}$ e valores médios de $0,95 \text{ m.s}^{-1}$. A 500 m do P5 foi observada uma diminuição brusca da profundidade, cujas velocidades decrescem a menos de $0,8 \text{ m.s}^{-1}$. Visualizando a componente longitudinal (Figura 25-B) notou-se que o escoamento é bem mais intenso, onde os núcleos de máximas velocidades são evidenciados para a mesma região, correspondendo a 78% da intensidade da corrente total. Para a componente transversal (Figura 25-C) ao escoamento a importância foi de 59% da intensidade total deste. Este comportamento foi observado em todas as campanhas amostrais realizadas.

Para a radial B, a velocidade média foi da ordem de $0,94 \text{ m.s}^{-1}$, onde os valores máximos chegaram a $2,81 \text{ m.s}^{-1}$ (Figura 26-A). Assim como observado durante as campanhas iniciais, a componente longitudinal (Figura 26-B) apresentou velocidades estuário acima mais significativas próximas ao P6, onde a velocidade máxima corresponde a 94% da velocidade total observada. A circulação lateral (Figura 26-C) apresentou elevada importância nesta campanha amostral, cujas velocidades máximas correspondem a 80% da velocidade total, confirmando a dinâmica sugerida para as campanhas anteriores.

Ao serem comparados os comportamentos hidrodinâmicos da campanha de pós-dragagem com as três campanhas anteriores (pré-dragagem, 25% e 75% do material dragado), observa-se que as velocidades médias totais apresentaram a mesma ordem de grandeza (1 m.s^{-1}) para a radial A e tiveram um acréscimo de 41% em relação às campanhas anteriores para a radial B. Este acréscimo em relação às velocidades máximas das três campanhas iniciais para a radial B e a manutenção da ordem de grandeza para a radial A estão diretamente relacionados com a maré de quadratura da campanha realizada no período de pré-dragagem, assim como nas campanhas de 25% e 75% do material dragado.

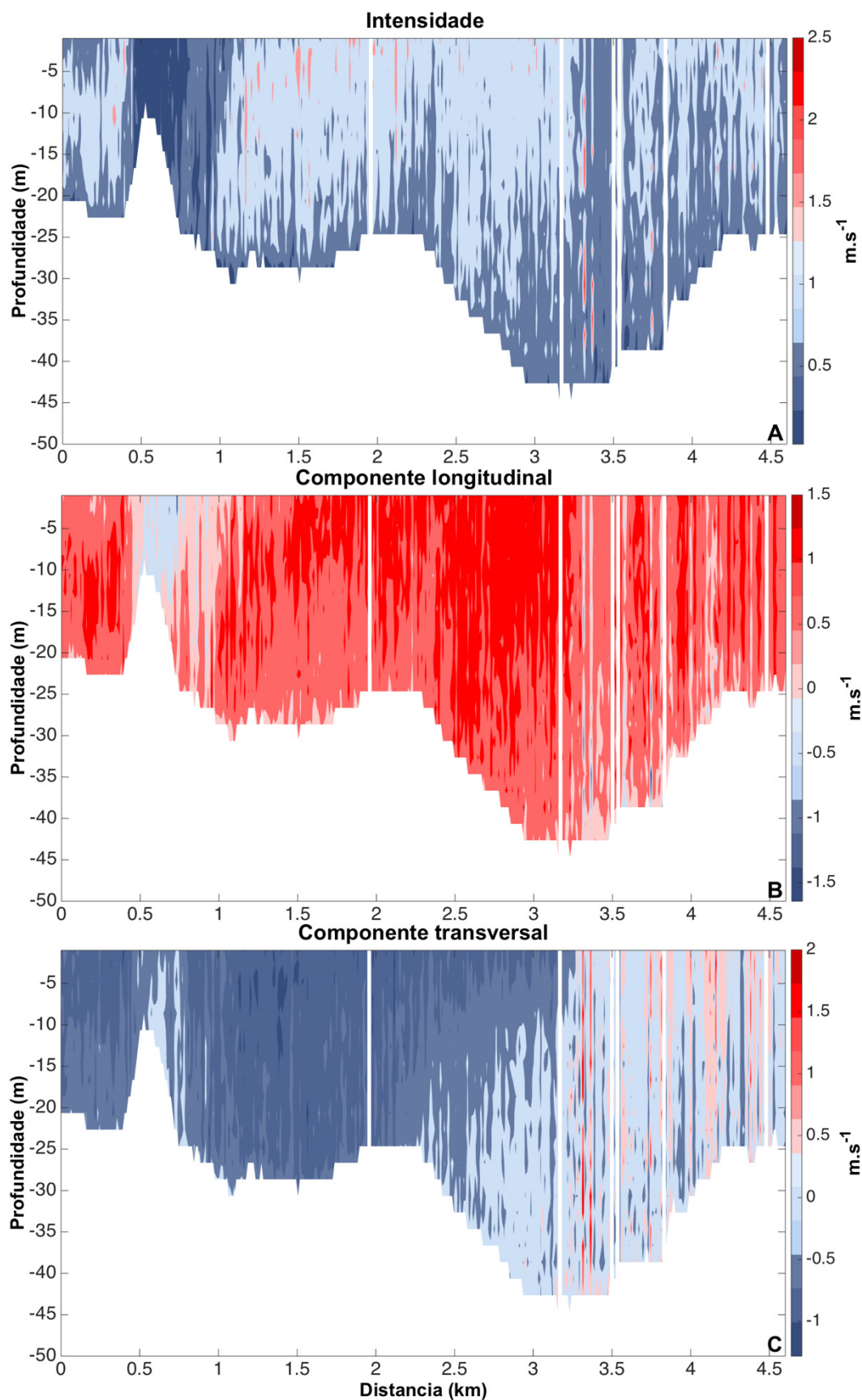


Figura 25: Distribuição vertical do campo integrado de velocidades (m.s^{-1}) para a radial A da quarta campanha, na região ao largo do CPSL. Painel A: Velocidade total; Painel B: Componente longitudinal; Painel C: Componente transversal.

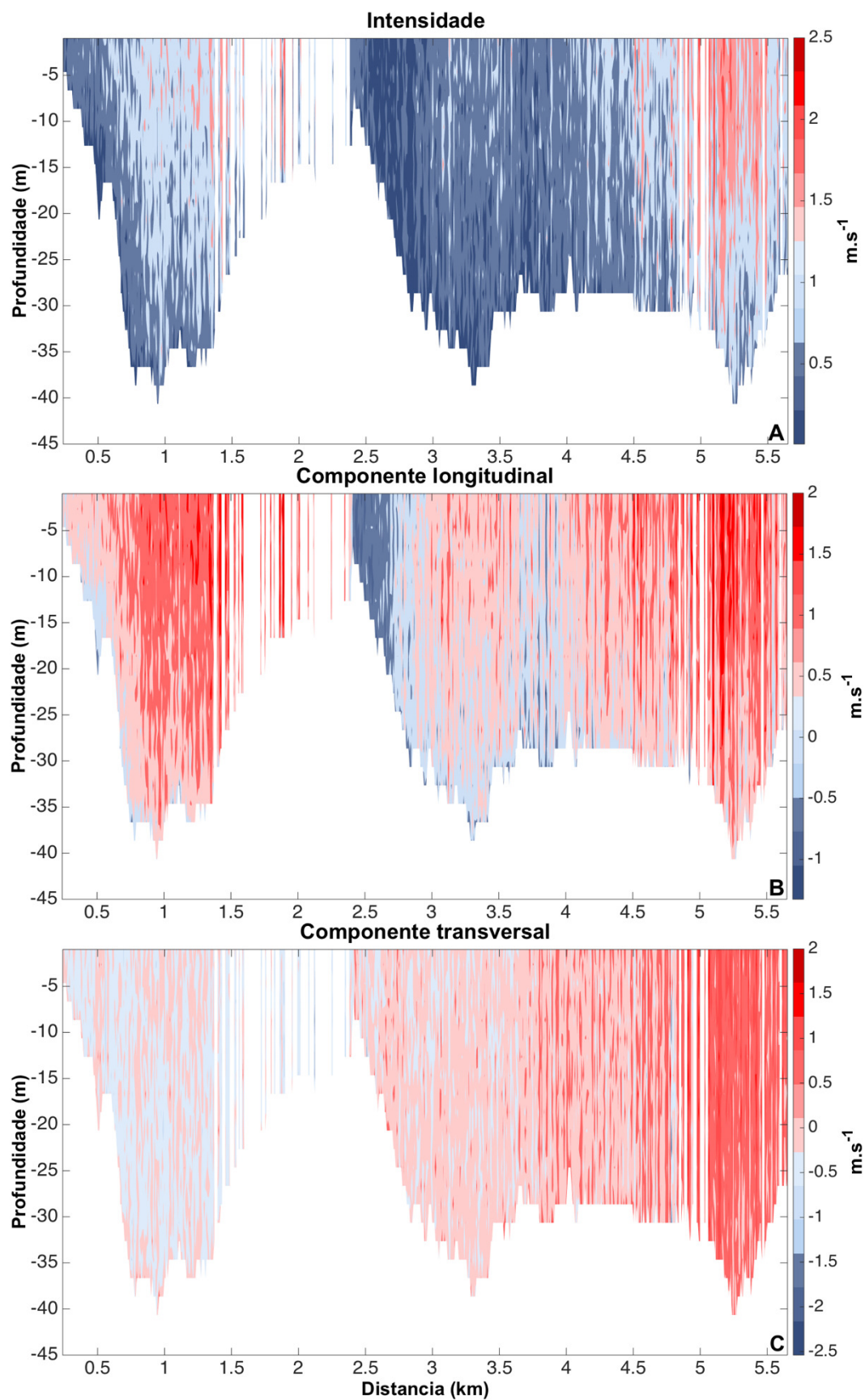


Figura 26: Distribuição vertical do campo integrado de correntes (m.s^{-1}) para a radial B da quarta campanha, na região ao largo do CPSL. Paineil A: Velocidade total; Paineil B: Componente longitudinal; Paineil C: Componente transversal.

A maré de quadratura observada durante a segunda campanha não modificou as velocidades médias das correntes, que foi da mesma ordem de grandeza das velocidades das terceira e quarta campanhas, inclusive 28% menor que a velocidade média observada na primeira campanha, sob as mesmas condições de maré. Entretanto sob condições de maré de sizígia, observou-se velocidades da ordem de $3,76 \text{ m.s}^{-1}$, resultando em um incremento de 37% em relação às demais campanhas.

A direção preferencial das correntes, foi de N-NE e a presença do contorno sólido gerou um movimento circular no sentido horário. Este comportamento se propagou em superfície, meia água e fundo e a presença de um contorno sólido promoveu a refração do campo de correntes. Há uma diminuição da velocidade das correntes em direção ao fundo em todas as campanhas. Este comportamento pode ser justificado pela presença de uma possível circulação estacionária na região com características de um vórtice, cujas linhas de corrente apresentam um caráter espiralado.

As correntes observadas na região do CPSL elevam o conhecimento da circulação hidrodinâmica em corpos hídricos costeiros, proporcionando a instalação e manutenção de estrutura industrial (*on-shore* ou *off-shore*) e/ou portuária. Este conhecimento é necessário, por exemplo, para a estimativa de esforços ambientais e oceanográficos, ação de ondas e marés, sobre estas estruturas industriais, especialmente à estrutura de funcionamento dos complexos portuários da Ponta Madeira e do Itaqui, que se localizam dentro do CESM.

Comparando os dados de corrente da região ao largo do CPSL com os dados da Baía de Guajará – PA (Bock, 2011), verificou-se que os valores máximos de corrente observados para a região do CPSL são maiores em até 48% que os valores reportados para a Baía de Guajará. Durante o período de estiagem, em maré de sizígia, as correntes no CPSL apresentaram valores máximos 48% ($3,05 \text{ ms}^{-1}$) maiores que a Baía de Guajará, a qual apresentou valores próximos de $1,59 \text{ ms}^{-1}$. Ainda para o período de estiagem, os valores máximos de corrente na região do CPSL em maré de quadratura, foram 30% ($2,22 \text{ m.s}^{-1}$) maiores que os valores da Baía de Guajará ($1,55 \text{ m.s}^{-1}$).

Já para o período chuvoso, durante maré de quadratura, a região ao largo do CPSL apresentou valores 40% ($2,74 \text{ ms}^{-1}$) maiores que os valores de corrente da Baía de Guajará ($1,63 \text{ ms}^{-1}$). Apesar destes dois estuários serem regidos por regime de

macromaré, as diferenças dos seus valores podem estar relacionadas com as características físicas dos dois estudos e até mesmo com as forçantes ambientais específicas de cada região, tais como a ação das marés, das descargas fluviais e dos ventos.

Comparando os resultados destes dois estudos com o estudo pioneiro de Moraes (1977) pode-se dizer que a principal justificativa para a diferença dos valores encontrados por este autor em relação aos dados deste trabalho e aos dados de Bock (2011) é o método de aquisição, onde o uso do ADCP se mostra mais eficaz na determinação das velocidades do fluido. Moraes (1977) determinou valores máximos de corrente variando entre $6,30 \text{ ms}^{-1}$ e $8,07 \text{ ms}^{-1}$.

Analisando os dados de corrente descritos por Dias (2007) para um estuário de mesomaré (estuário do rio Jaguaribe, Ceará) em relação aos dados da região a largo do CPSL, pode-se afirmar que a velocidade média foi 42% menor que as observadas neste estudo. Durante o período de estiagem, em maré de sizígia, a média dos valores do rio Jaguaribe foi 73% ($0,17 \text{ ms}^{-1}$) menor que os valores médios obtidos para a região do CPSL ($0,77 \text{ ms}^{-1}$). Mantendo o mesmo período de estiagem, mas com maré de quadratura, os valores médios do estuário do Jaguaribe foram 79% ($0,18 \text{ ms}^{-1}$) menores que os valores médios de corrente do CPSL ($0,85 \text{ ms}^{-1}$). Já para o período chuvoso, em maré de quadratura, as correntes do rio Jaguaribe apresentaram valores médios 67% ($0,31 \text{ ms}^{-1}$) menores que a região do CPSL ($0,94 \text{ ms}^{-1}$). A grande diferença entre os valores de velocidade das correntes pode ser justificada, principalmente, pela ação das marés e pela minimização das descargas fluviais no semiárido brasileiro, facilitando a propagação da onda de maré nestes ambientes.

Falkenberg (2009) realizou um estudo no Complexo Estuarino de Paranaguá - PR (CEP), o qual é regido por regime de micromaré, e comparando-os com os dados da região ao largo do CPSL, pode-se afirmar que os valores médios de correntes do CEP chegaram a ser 72,4% menores que os valores médios das correntes da região do CPSL. Durante o período de estiagem o CEP apresentou valores que foram equivalentes a 42,7% ($0,35 \text{ ms}^{-1}$) do valor do CISM ($0,82 \text{ ms}^{-1}$) para o mesmo período. Ao tratar-se do período chuvoso, os valores médios de correntes do CEP foram 72,4% ($0,26 \text{ ms}^{-1}$) menores que os valores médios de correntes no mesmo período no CPSL ($0,94 \text{ ms}^{-1}$). Marone et. al. (2007) observaram que a principal característica da circulação da região de estudo refere-se à heterogeneidade lateral das seções, pois

apareceram claramente sistemas de circulação residual onde áreas da seção são usadas principalmente pelas correntes de enchente, sendo outras para correntes de vazante.

Ao compararmos os valores de corrente encontrados na região ao largo do CPSL com os valores encontrados por Andutta et al (2014) para os Porto de Darwin, na Austrália e por Guillou e Chapalain (2012) para o Porto de Le-Havre, na Inglaterra, portos estuarinos de macromaré, observa-se valores máximos de corrente da ordem $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ para o primeiro e $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ para o segundo, respectivamente. Os valores encontrados para o Porto de Darwin são da mesma magnitude aos encontrados para a região ao largo do CPSL, ambos apresentando as mesmas características. Já quando tratamos dos valores encontrados para o Porto de Le-Havre, na Inglaterra, observa-se uma redução entre 35% e 60% dos valores de corrente quando comparados aos valores sob influência das marés de quadratura e sizígia, respectivamente.

Dados obtidos por Flor et al (2015) para o estuário de Villaviciosa, na Espanha, regido por mesomaré, mostram valores de velocidades variando entre $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ e $1,6 \text{ m.s}^{-1}$, ou seja, neste estuário há um decréscimo destes valores que varia de 60% a 84% quando comparados aos valores encontrados no CPSL. A variação dos valores de velocidades do estuário espanhol é dada de acordo com a região do estuário e com a maré sob a qual o sistema está influenciado. Os menores valores de velocidade ($0,5 \text{ m.s}^{-1}$) são observados na região central do estuário sob maré enchente, ocupando o fundo do canal, podendo até ser menores, por conta da dissipação da energia quando seguem no sentido estuário acima. Já os maiores valores ($1,6 \text{ m.s}^{-1}$) são observados no lado ocidental do estuário sob maré vazante. Pode-se dizer, portanto, que a excessiva diferença dos valores de velocidade pode ser justificada pelo método de aquisição dos dados (medidor de vazão, G.O. Modelo 2035-MK III), bem como pelos bancos de areia localizados na boca do estuário.

Lobo et al (2004) estudando o transporte de sedimentos no estuário de mesomaré de Guadiana (SW Península Ibérica), durante dois períodos sazonais distintos, observou velocidades de correntes variando entre $0,5$ e $0,8 \text{ m.s}^{-1}$, em evento de maré vazante. Ao compararmos estes valores com os valores encontrados para o CPSL, tem-se velocidades 78% menos intensas durante o período de estiagem e 81% durante o período chuvoso (por exemplo, Cooper, 1993; Berné et al. 1993; Fenster & Fitzgerald, 1996).

5.2. Distribuição espacial das variáveis de estado e do oxigênio dissolvido

A Tabela 5 mostra os valores das variáveis de estado e do oxigênio dissolvido obtidos no período pré-dragagem (1ª campanha) durante a atividade de dragagem (2ª e 3ª campanhas) e o pós-dragagem (4ª campanha).

Tabela 5: Variação dos valores de temperatura, salinidade, densidade convencional e oxigênio dissolvido para todo o período amostral. MIN corresponde aos valores mínimos; MAX corresponde aos valores máximos; MED são os valores médios e DESV são os respectivos desvios padrão.

VARIÁVEIS DE ESTADO				
TEMPERATURA (°C)				
	1ª campanha	2ª campanha	3ª campanha	4ª campanha
MIN	27,53	27,44	28,59	28,97
MAX	28,39	28,44	28,94	29,67
MED	28,19	28,03	28,76	29,47
DESV	0,21	0,28	0,12	0,16
SALINIDADE (g.kg⁻¹)				
MIN	31,23	32,1	32,51	22,03
MAX	34,96	34,0	33,18	26,18
MED	32,53	33,31	32,84	23,85
DESV	0,86	0,63	0,19	1,42
DENSIDADE CONVENCIONAL (kg.m⁻³)				
MIN	19,68	20,01	20,18	12,25
MAX	20,92	21,81	20,85	15,5
MED	20,40	21,06	20,47	13,67
DESV	0,41	0,54	0,18	1,08
OXIGÊNIO DISSOLVIDO (μmol.kg⁻¹)				
MIN	199,3	198	197,1	205,2
MAX	205,9	206,1	198,1	210,2
MED	200,2	199,7	197,6	207,9
DESV	1,58	1,90	0,32	1,74

A variação da estrutura termohalina no período de pré-dragagem (primeira campanha), em superfície, mostrou valores de temperatura variando entre 27,53 °C nas proximidades do P5 a 28,39 °C no P7 (Apêndice 1 – Painel A), enquanto que os valores de salinidade (Apêndice 3 – Painel A) e densidade (Apêndice 5 – Painel A) variaram entre 31,23 g.kg⁻¹ (P5) e 34,96 g.kg⁻¹ (P8) e de 19,68 kg.m⁻³ (P3) a 20,79 kg.m⁻³ (P1), respectivamente. Os níveis de oxigênio dissolvido foram praticamente homogêneos na área do CPSL, variando de 199,3 μmol.kg⁻¹ a 200,5 μmol.kg⁻¹ (Apêndice 7 – Painel A). No fundo, a amplitude térmica (Apêndice 2 – Painel A) foi de apenas 0,3 °C, onde os maiores valores foram observados nos pontos próximos ao canal da Alumar (P6 e P7), muito provavelmente ocasionado pela pequena profundidade local. A estes pontos foram observadas

salinidades maiores que 32 g.kg^{-1} (Apêndice 4 – Painei A), densidades da ordem de 20 kg.m^{-3} (Apêndice 6 – Painei A) e níveis de oxigênio dissolvido com amplitude de $1,5 \text{ } \mu\text{mol.kg}^{-1}$ (Apêndice 8 – Painei A).

Durante o período de 25% do material dragado (segunda campanha) em superfície, os valores de temperatura (Apêndice 1 – Painei B) apresentaram pequena variação, sendo esta de $28,10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ nas proximidades do P7 a $28,44 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em direção ao canal principal do CESM (P3), enquanto que para a salinidade (Apêndice 3 – Painei B) e densidade (Apêndice 5 – Painei B) os menores valores foram de $32,10 \text{ g.kg}^{-1}$ e $20,01 \text{ kg.m}^{-3}$, ambas ocorrendo no P5, com níveis de oxigênio dissolvido (Apêndice 7 – Painei B) variando de $198,01$ a $206,12 \text{ } \mu\text{mol.kg}^{-1}$. Próximo ao contorno sólido (P1 e P2) observamos a presença de águas mais frias ($\sim 28,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$), mais salinas ($\sim 33,8 \text{ g.kg}^{-1}$) e consequentemente mais densas ($\sim 21,5 \text{ kg.m}^{-3}$), denotando, mesmo em maré vazante, a possível presença da massa de água costeira (AC) na região (Dias et al, 2013). Junto ao fundo, a amplitude térmica observada foi de $0,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, onde o menor valor foi encontrado na região do P2 ($28,18 \text{ }^{\circ}\text{C}$), associadas a salinidade da ordem de 34 g.kg^{-1} e densidade de $21,81 \text{ kg.m}^{-3}$. A presença de águas mais frias e salinas, com características de AC, não se refletem nos níveis de oxigênio dissolvido ($198,09 \text{ } \mu\text{mol.kg}^{-1}$ nas proximidades do P1 e $199,97 \text{ } \mu\text{mol.kg}^{-1}$ na região do P2), muito provavelmente, devido ao consumo do gás pelo excesso de matéria orgânica dos sedimentos despejados durante a dragagem.

Com 75% do material dragado (terceira campanha), pudemos observar em superfície, que os valores de temperatura e salinidade foram praticamente constantes em toda a malha amostral, cujas amplitudes térmica (Apêndice 1 – Painei C) e salina (Apêndice 3 – Painei C) foram de apenas $0,33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,46 \text{ g.kg}^{-1}$, respectivamente. O campo de massa (Apêndice 5 – Painei C) apresentou a mesma característica dos gradientes térmico e salino, onde os valores foram horizontalmente homogêneos (variaram entre $20,18 \text{ kg.m}^{-3}$ a $20,58 \text{ kg.m}^{-3}$) enquanto que o oxigênio dissolvido apresentou uma variação de, aproximadamente, $1 \text{ } \mu\text{mol.kg}^{-1}$ ($197,12 \text{ } \mu\text{mol.kg}^{-1}$ a $198,07 \text{ } \mu\text{mol.kg}^{-1}$) (Apêndice 7 – Painei C). Comparando a variação do campo TS e de massa obtidos nesta campanha com os valores obtidos com 25% do material dragado, foi observado um aumento de $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ na estrutura térmica, enquanto que os gradientes salino e de oxigênio dissolvido variaram, em média, $1,2 \text{ g.kg}^{-1}$ e $7,2 \text{ } \mu\text{mol.kg}^{-1}$, respectivamente. Junto ao fundo, as variações observadas foram

de 0,3 °C, 0,6 g.kg⁻¹, 0,5 kg.m⁻³ e 0,9 µmol.kg⁻¹, para temperatura, salinidade, densidade convencional e oxigênio dissolvido, respectivamente.

Após a atividade de dragagem (quarta campanha), em superfície, os gradientes horizontais de temperatura (Apêndice 1 – Painel D) apresentaram os menores valores (28,97 °C) na região da Ilha do Medo (P8) e as maiores temperaturas (29,67 °C) próximas ao canal principal do CESM (P3). A salinidade apresentou variação de 22,03 g.kg⁻¹ (P3) a 26,18 g.kg⁻¹ (P8) (Apêndice 3 – Painel D), enquanto que o campo de massa apresentou variação um pouco menor, sendo esta de 3,25 kg.m⁻³ (Apêndice 5 – Painel D), corroborando as características do campo de salinidade. Os níveis de oxigênio dissolvido (Apêndice 7 – Painel D) apresentaram um gradiente horizontal de 3,96 µmol.kg⁻¹. Já no fundo os gradientes das propriedades foram 0,24 °C, 3,82 g.kg⁻¹, 2,8 kg.m⁻³ e 4,93 µmol.kg⁻¹, para temperatura (Apêndice 2 – Painel D), salinidade (Apêndice 4 – Painel D), densidade convencional (Apêndice 6 – Painel D) e oxigênio dissolvido (Apêndice 8 – Painel D), respectivamente.

A análise das anomalias da temperatura (°C) identificam que estas apresentaram valores muito próximos de zero para todas as campanhas, indicando uma homogeneidade vertical e horizontal do fluido. Durante a primeira campanha (Figura 27-A) é possível observarmos a presença de dois núcleos com anomalias positivas. O primeiro núcleo vai da região da Ilha do Medo (P8) até a área próxima a foz do rio dos Cachorros (P6) onde as baixas profundidades e a proximidade com o contorno sólido, nestas regiões, foram o fator limitante para o aumento das temperaturas. No restante do domínio, as anomalias foram negativas, embora muito pequenas, sugerindo temperaturas superficiais menores em relação as observadas junto ao fundo. Este fato pode ser explicado por uma maior atuação do vento no domínio, promovendo a perda de calor para a atmosfera. Na segunda campanha (Figura 27-B), as anomalias positivas foram predominantes em toda a área de estudo, a exceção dos pontos P4 e P7, que apresentam anomalias negativas muito próximas de zero, onde a brisa terrestre pode ser o fator de seção de calor do fluido para a atmosfera. Na terceira campanha (Figura 27-C), observou-se uma homogeneidade horizontal para as anomalias positivas sugerindo que a radiação solar ou um maior aporte de águas continentais, evidenciaram a retomada da competência do vetor fluvial, face a um aumento das precipitações na bacia de drenagem, permitindo que águas tipicamente continentais cheguem na região estuarina. Já durante a quarta

campanha (Figura 27-D), observou-se anomalias negativas, embora muito próximas de zero, entre a Ilha do Medo e o P5 e anomalias positivas ao sul do domínio mostrando grande influência das descargas dos rios Anil e Bacanga na região da Ilha do Medo.

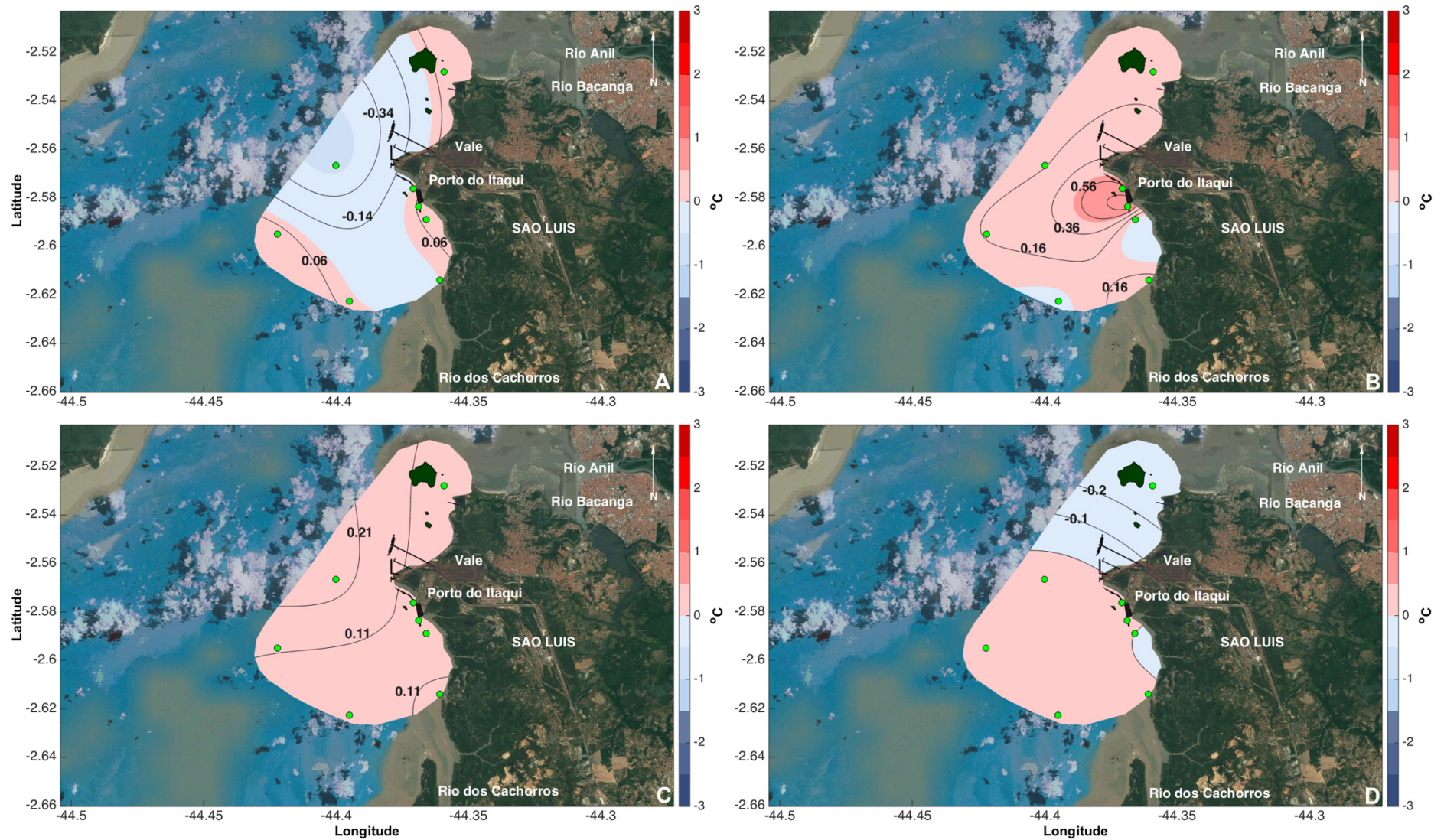


Figura 27: Anomalias da temperatura (°C) referentes a todo o período amostral. Painel A: primeira campanha; Painel B: segunda campanha; Painel C: terceira campanha e Painel D: quarta campanha.

As anomalias de salinidade (g.kg^{-1}) para o período pré-dragagem apresentaram um comportamento muito parecido com as anomalias da temperatura, onde foi possível observarmos anomalias positivas pouco representativas em uma pequena região próxima ao contorno sólido e ao sul do domínio, que podem ser justificadas pela pequena profundidade junto ao continente e a uma maior ação da radiação solar (comprimento de onda curto e longo), respectivamente (Figura 28-A). As anomalias negativas em grande parte do domínio sugerem a presença de águas mais salinas, mesmo em evento de maré vazante.

Para a segunda campanha (Figura 28-B) as anomalias negativas dominam a região, denotando a presença de águas mais salinas no fundo, com exceção da região do P4 que mostra anomalias positivas (embora muito próximas de zero), podendo ser justificadas pelas baixas profundidades ($\sim 6\text{m}$). Para as terceira e quarta campanhas (Figuras 28-C e 28-D, respectivamente) a presença de uma massa de água mais salina junto ao fundo se reflete nas anomalias negativas, a exceção do P7 que apresentou uma pequena anomalia positiva (Figura 28-C), indicando possivelmente a presença de água continental.

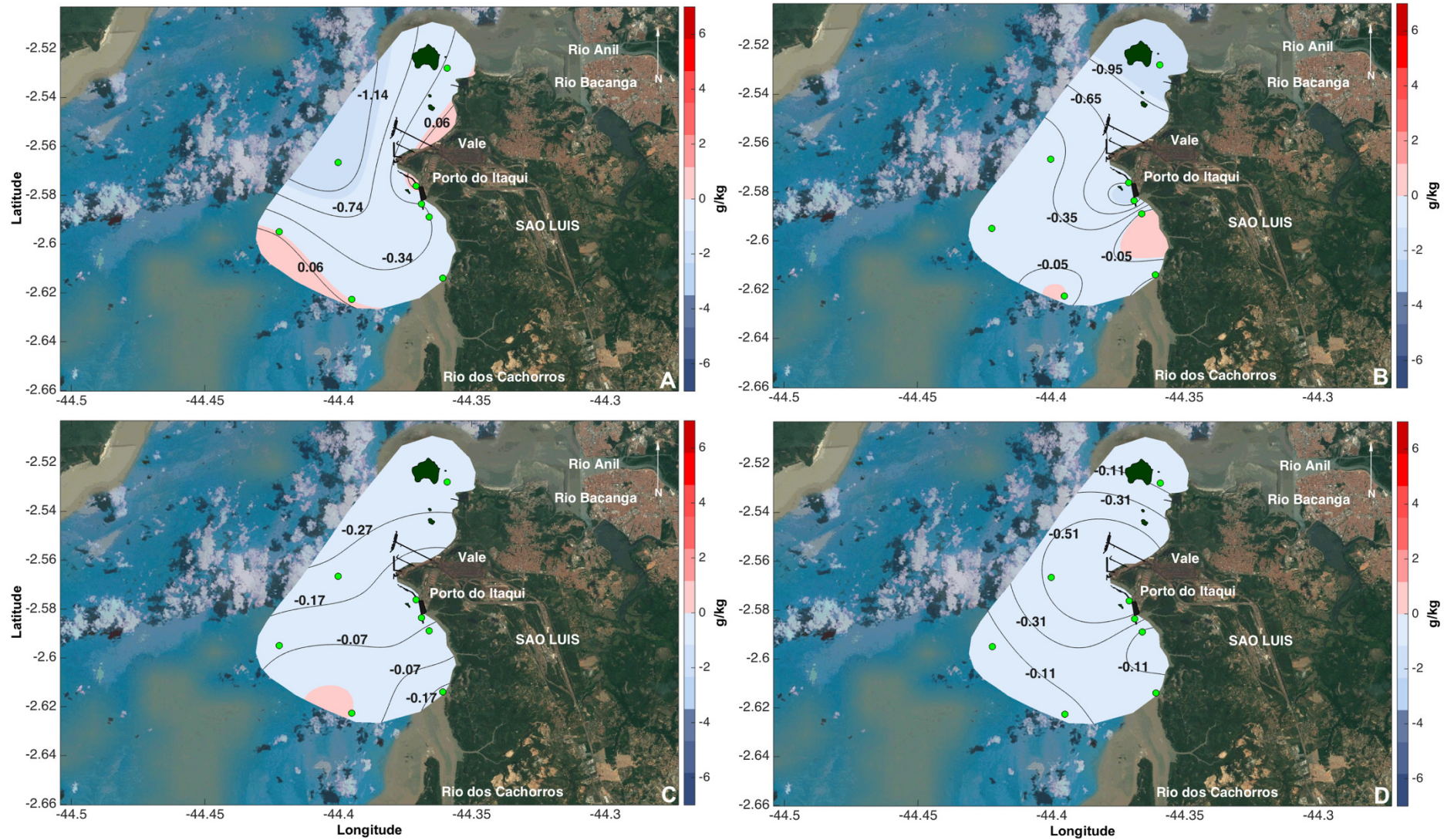


Figura 28: Anomalias da salinidade (g/kg) referentes a todo o período amostral. Paine A: primeira campanha; Paine B: segunda campanha; Paine C: terceira campanha e Paine D: quarta campanha.

Assim como observado para os gradientes horizontais das anomalias de salinidade, para as anomalias de densidade (kg.m^{-3}) nas três primeiras campanhas há um domínio de anomalias negativas, sugerindo a presença de uma massa de água mais densa junto ao fundo (Figuras 29 A, B e C). Nas segunda e quarta campanhas, as anomalias negativas continuaram sendo predominantes, entretanto apenas pequenas regiões apresentaram anomalias positivas (Figuras 29-D).

Ao serem analisadas as anomalias do oxigênio dissolvido foi possível observar que durante a primeira campanha os níveis de oxigênio apresentam valores predominantemente positivos em toda a área de estudo (Figura 30-A). Este comportamento indica uma maior interação entre o fluido e a atmosfera. Com 25% do material dragado (Figura 30-B), as anomalias de oxigênio dissolvido denotam um avanço da massa de água costeira mais oxigenada entre os pontos P5 e P8. Próximo ao ponto P3 observou-se anomalias negativas que apresentam esse comportamento, muito provavelmente, pelo despejo do material dragado nesta área.

Durante a terceira campanha, o oxigênio dissolvido apresentou anomalias negativas em todo o domínio. Este comportamento evidencia a entrada de uma massa de água mais fria, salina e com níveis elevados de oxigênio, sugerindo a penetração de água marinha e/ou consumo de oxigênio pelo sedimento despejado na região. A exceção a este comportamento é a região da Ilha do Medo que, associada a águas mais frias e salinas no fundo e a uma maior troca com a atmosfera, proporcionou anomalias positivas (Figura 30-C). Durante a quarta campanha, as anomalias apresentaram-se positivas em grande parte do domínio (Figura 30-D), denotando uma maior interação entre o fluido e a atmosfera. Entretanto, na região de descarte, mesmo após o fim das atividades de dragagem, foi possível observar zonas de hipóxia. Tal comportamento se deve, muito provavelmente, à remobilização do sedimento descartado na região pela ação das correntes e marés.

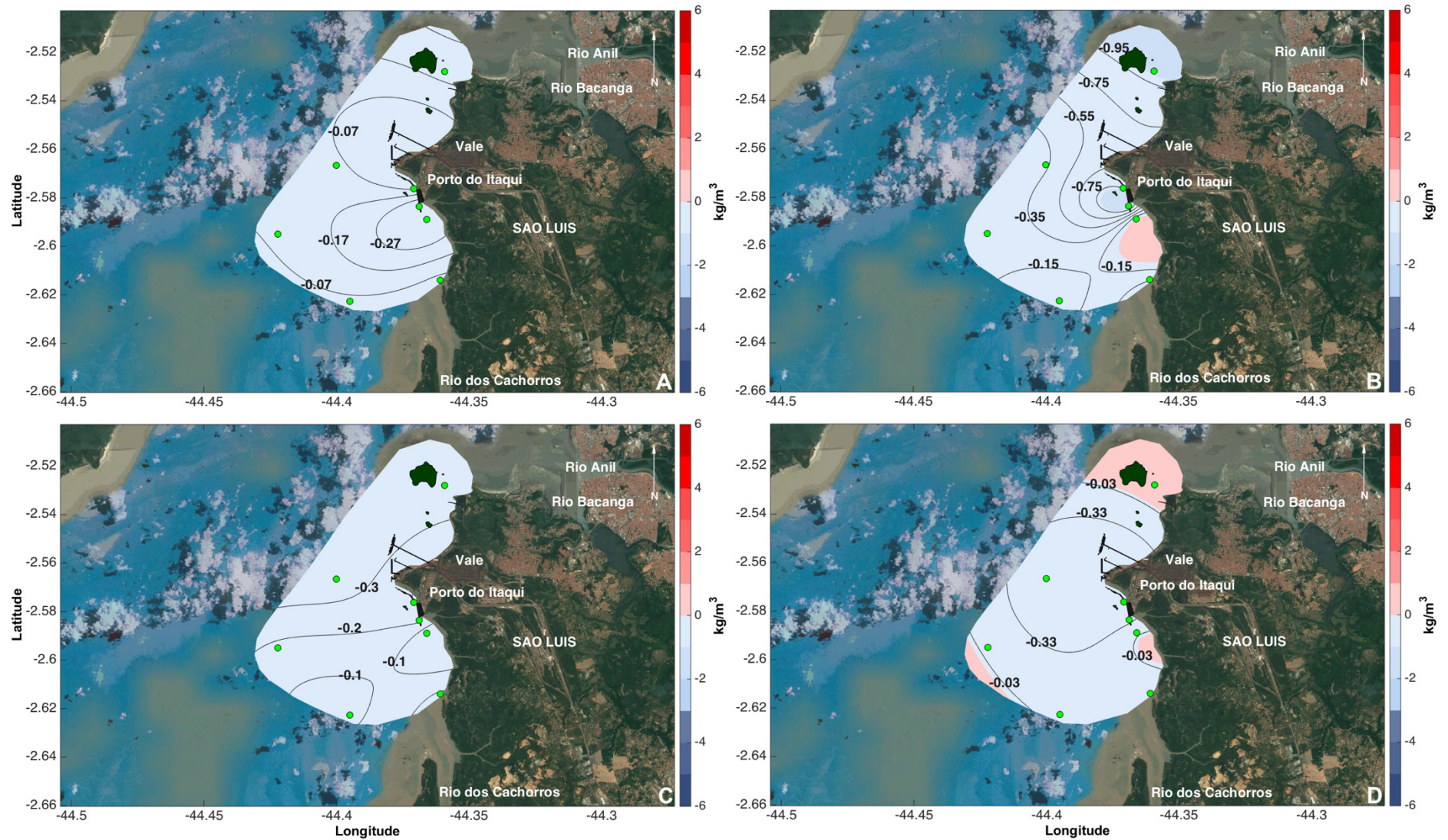


Figura 29: Anomalias da densidade (kg.m^{-3}) referentes a todo o período amostral. Paineil A: primeira campanha; Paineil B: segunda campanha; Paineil C: terceira campanha e Paineil D: quarta campanha.

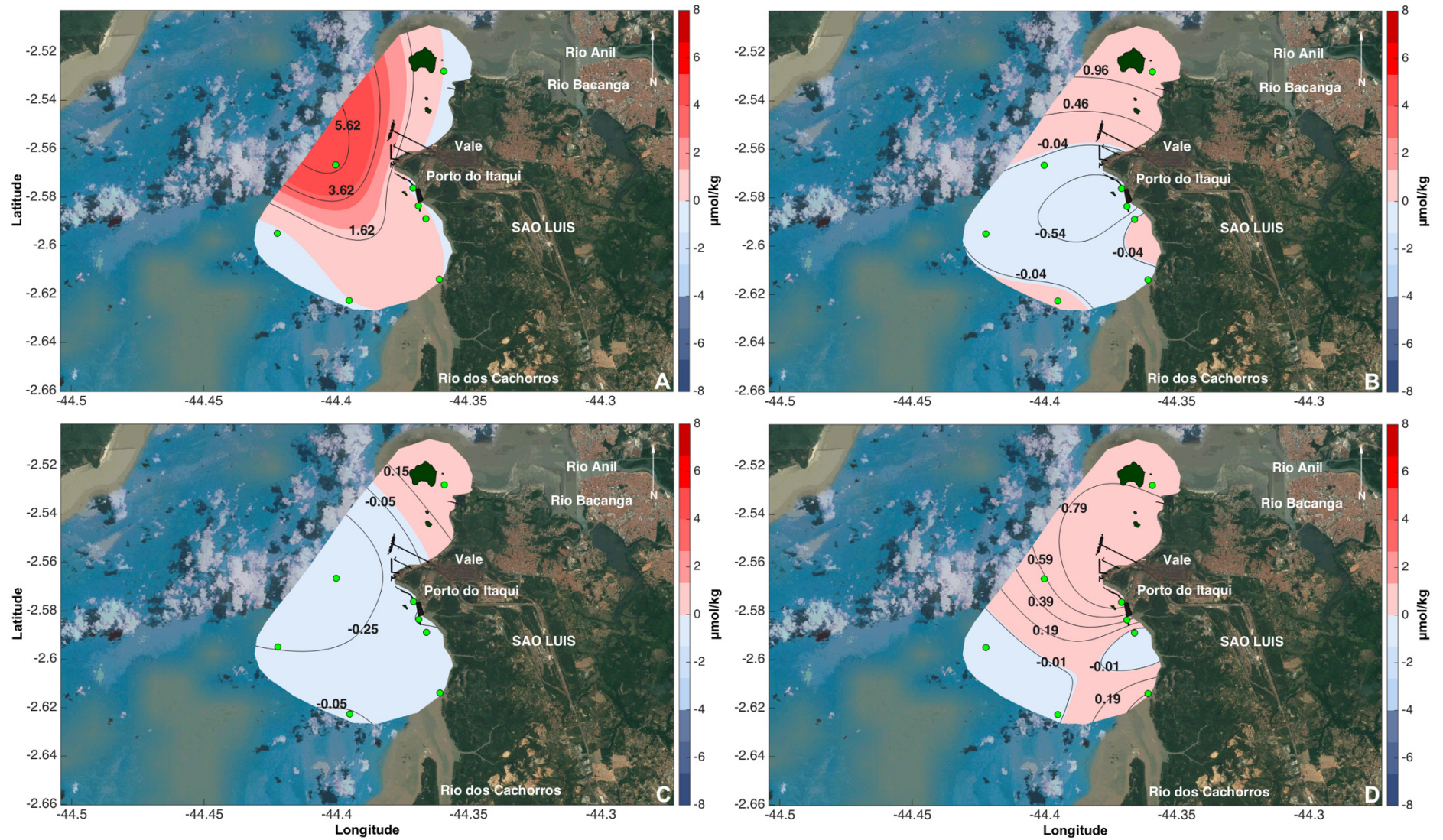


Figura 30: Anomalias do oxigênio ($\mu\text{mol.kg}^{-1}$) referentes a todo o período amostral. Painel A: primeira campanha; Painel B: segunda campanha; Painel C: terceira campanha e Painel D: quarta campanha.

Usando índices termohalinos descritos por Dias et al (2013), para a Margem Equatorial Brasileira em um estuário localizado no semiárido e os índices descritos por Silva, Araújo e Boulès (2005) para a plataforma continental norte do Brasil, foi possível destacarmos a presença de duas massas de água durante o período deste estudo: Água Estuarina (AE) e Água Costeira (AC).

Estas massas de água foram definidas de acordo com o diagrama TS-espalhado que foi gerado a partir das correlações entre os dados de temperatura (T) e salinidade (S) (Figura 31) nas estações hidrográficas amostradas na região ao largo do CPSL durante todas as campanhas amostrais.

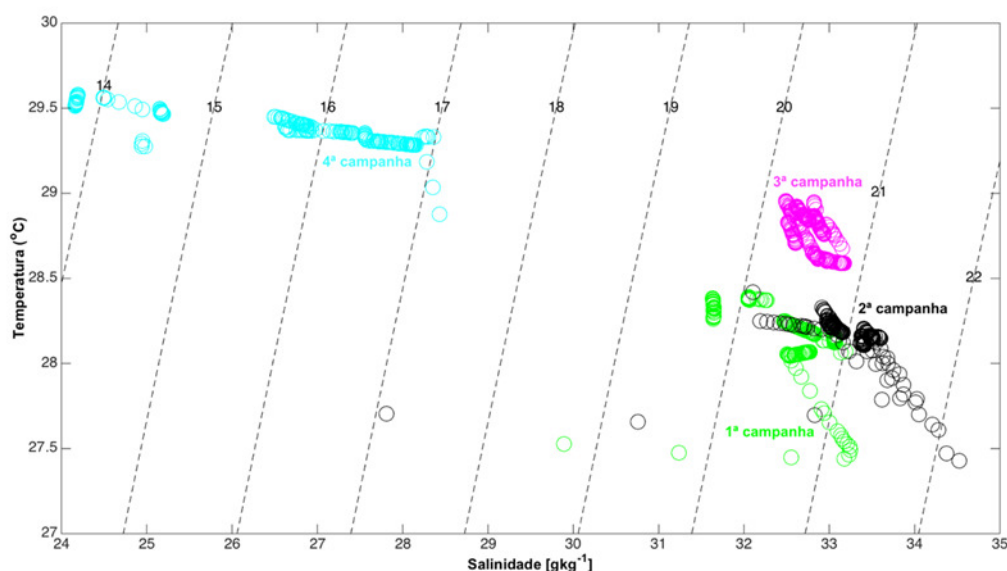


Figura 31: Diagrama TS espalhado referente às quatro campanhas amostrais ao largo do CPSL.

A variação das variáveis de estado (temperatura e salinidade) nos dois níveis de referência (superfície e fundo), mostram água mais frias e salinas nas primeira, segunda e terceira campanhas, cujas amplitudes térmica e salina foram de 0,86 °C, 1 °C e 0,35 °C; e de 3,73 g.kg⁻¹, 1,9 g.kg⁻¹ 0,67 g.kg⁻¹, respectivamente, evidenciando o pequeno volume de água fluvial para o período, facilitando a entrada da massa de água costeira na região do CPSL. Durante a quarta campanha, observou-se que a amplitude salina aumentou, chegando a 4,15 g.kg⁻¹, evidenciando a presença de águas mais quentes e menos salinas compatíveis com a mistura da massa de água costeira (AC) com a massa de água oriunda da bacia de drenagem, caracterizando a massa de água estuarina (AE) (Tabela 6).

Tabela 6: Características das massas de água observadas neste estudo.

	Água Estuarina	Água Costeira
Temperatura (°C)	> 29	< 29
Salinidade (g.kg⁻¹)	< 30	> 30
Densidade convencional (kg.m⁻³)	< 17,5	> 19

A AC caracterizou-se por temperaturas entre 27,4 e 29 °C e salinidades inferiores a 35 g.kg⁻¹, como resultado da maior influência das águas marinhas ao largo do CPSL. Já a AE foi identificada por temperaturas inferiores a 30 °C e salinidades entre 22 e 27 g.kg⁻¹, caracterizando-se como água estuarina típica derivada da mistura de água do mar com a água fluvial.

Durante a quarta campanha (período chuvoso), a presença da AE foi restrita às isopicnais de 13 a 17 ($13 \leq \sigma_\theta \leq 17,5 \text{ kg.m}^{-3}$), devido ao alto volume de água doce encontrado na região. No entanto, durante a primeira, segunda e terceira campanhas (período seco), com a água de origem marinha sendo predominante na região, observamos que a pequena contribuição fluvial foi restrita às isopicnais de 19 a 22 kg.m⁻³ ($19 \leq \sigma_\theta \leq 22 \text{ kg.m}^{-3}$). Este tipo de distribuição foi descrita por Miranda et al. (1998, 2002, 2005) como uma distribuição clássica de massas de água em sistemas estuarinos.

Estes valores foram muito próximos aos encontrados por Lefèvre et al (2017), em estudo realizado no CESM, durante período de estiagem, quando foram observadas águas mais frias e mais salinas. Em seu estudo, os autores mostram que existe uma variação sazonal da isohalina que delimita a frente estuarina (30 g.kg⁻¹), que em período de balanço hídrico negativo a frente estuarina encontra-se 40 km estuário a dentro, enquanto que em período de balanço hídrico positivo a frente estuarina localiza-se na região ao largo do CPSL.

Devido ao avanço de águas marinhas continente adentro, a perda de competência do vetor fluvial face a minimização das precipitações na bacia de drenagem, permite que águas tipicamente costeiras avancem cada vez mais estuário acima, o que pode prejudicar a captação de água destinadas às populações que dependem desse recurso. Essa intrusão de águas mais frias e salinas no sistema estuarino, tende a proporcionar a formação de flocos de MPS, haja vista que esse tipo de energia dissocia os flocos de sedimento formados durante o contato inicial com o fluido.

Os gradientes espaciais das variáveis de estado, durante a campanha amostral que apresentou características de período chuvoso (junho/2015), mostrou presença de águas mais quentes ($29,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) e menos salinas (24 g.kg^{-1}). Com isso, pode-se afirmar que a propagação da onda de maré torna os gradientes horizontais de salinidade e temperatura homogêneos, invertendo a força de gradiente de pressão baroclínica, proporcionando um avanço de águas marinhas estuário acima. Em estudo realizado no CESM, Lefèvre et al (2017), mostraram que, durante o período chuvoso as águas são menos salinas e mais quentes, corroborando com a quarta campanha deste estudo, sugerindo um maior aporte fluvial.

Em estudo realizado na Plataforma Continental Amazônica (PCA) e área oceânica adjacente, Da Silva et al (2005) identificou quatro massas de água naquela região, onde a distribuição destas ocorreu entre as isóbatas de 20 m a 2000 m. Foi observada, na região do referido estudo, em todos os períodos amostrais, uma massa de Água Costeira (AC) com baixa salinidade e alto valor de temperatura, reiterando as características desta região: imenso aporte de águas oriundas da drenagem continental do rio Amazonas, formando uma pluma que se estende até a PCA.

As concentrações de oxigênio dissolvido (OD), para as quatro campanhas amostrais realizadas na região do CPSL, foram influenciadas pelas altas taxas de sedimentação que aumentam a transparência da água, favorecem a penetração solar, principalmente em períodos menos chuvosos e, conseqüentemente, intensifica a atividade fotossintética, a qual influencia diretamente na elevação das concentrações deste gás. Os valores de OD foram encontrados dentro da faixa estabelecida pela Resolução CONAMA 357/05, a qual estabelece $6,0\text{ mg.L}^{-1}$ ($181\text{ }\mu\text{mol.kg}^{-1}$) para a preservação da vida aquática. Contudo, através dos dados analisados, foi possível detectar um pequeno impacto causado pela disposição de material dragado na região de descarte, o que nos leva a caracterizar a região ao largo do CPSL com um ambiente ainda natural, mesmo com valores muito próximos ao limite estabelecido na resolução CONAMA. Estudos de Dittmar et al (2001) e Bianchi (2006) afirmam que a temperatura e a salinidade afetam as concentrações de oxigênio de forma direta e indireta, através do controle sobre a solubilidade e também pelas taxas dos processos de demanda e produção de oxigênio.

5.3. Material particulado em suspensão (MPS)

5.3.1. Distribuição espacial do MPS por gravimetria

A Tabela 7 sumariza os valores do MPS obtidos, por gravimetria nos períodos de pré-dragagem (1ª campanha), durante a atividade de dragagem (2ª e 3ª campanhas) e pós dragagem (4ª campanha).

Tabela 7: Variação dos valores de material particulado em suspensão (mg.L^{-1}) referente a todo o período amostral. MIN corresponde aos valores mínimos; MAX corresponde aos valores máximos; MED corresponde aos valores médios das velocidades e DESV são os respectivos desvios padrão.

MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (mg.L^{-1})				
	1ª campanha	2ª campanha	3ª campanha	4ª campanha
MIN	114,0	40,0	108,7	240,0
MAX	852,0	295,5	372,0	563,5
MED	355,0	174,3	169,0	406,9
DESV	188,0	79,8	59,1	94,8

Para a primeira campanha, a distribuição espacial das concentrações de MPS (mg.L^{-1}), em superfície, variaram de 114 mg.L^{-1} nas proximidades do P8 a 617 mg.L^{-1} na área de descarte (P3), com média de 312 mg.L^{-1} (Apêndice 9 – Painel A). Junto ao fundo, foram observadas duas regiões com concentrações maiores que 500 mg.L^{-1} , nas proximidades da Ilha do Medo (P8) e na região de descarte do material dragado (P3), com valores de 852 mg.L^{-1} (Apêndice 10 – Painel A).

Com 25% do material dragado, em superfície, as menores concentrações foram observadas, nas imediações do P2 (44 mg.L^{-1}), enquanto que na região da área de descarte (P3), os valores observados chegaram a 257 mg.L^{-1} , com média de 172,8 mg.L^{-1} (Apêndice 9 – Painel B). Junto ao fundo, devido ao despejo do material dragado pelo navio de transporte, as concentrações de MPS chegaram a 266 mg.L^{-1} na região de descarte (P3), sendo carregados até a região de influência do P5, onde as concentrações chegaram a 295,5 mg.L^{-1} (Apêndice 10 – Painel B).

Com 75% do material dragado, em superfície, as menores concentrações foram observadas nas proximidades da Ilha do Medo (P8), enquanto que na região da área de descarte (P3) os valores chegaram a 202 mg.L^{-1} (Apêndice 9 – Painel C). No fundo, foi observado que o sedimento descartado pelo navio de transporte na região do P3 elevou as concentrações de MPS que chegaram a 372 mg.L^{-1} , sendo o material

carreado até a região de influência do P5, onde as concentrações chegaram a 225 mg.L⁻¹ (Apêndice 10 – Painel C).

Após a atividade de dragagem, em superfície, as menores concentrações (240 mg.L⁻¹) foram observadas nas proximidades do P5 (extremo oeste da radial A), enquanto que na região da área de descarte (P3), os valores observados chegaram a 459 mg.L⁻¹ e no P7 as concentrações apresentaram os maiores valores (509,5 mg.L⁻¹) (Apêndice 9 – Painel D), representando um aumento de 10% em relação à área de descarte e de 52,8% em relação à menor concentração observada (P5). Junto ao fundo, foi observado que a concentração de sedimento suspenso na região do P3 chegou a 563,5 mg.L⁻¹, sendo carreado até a região de influência dos pontos P1 e P2, onde as concentrações chegaram a 452,5 mg.L⁻¹ (Apêndice 10 – Painel D).

Analisando as anomalias do MPS foi possível observar que, durante a primeira campanha (Figura 32-A), as anomalias positivas do MPS foram encontradas nas proximidades dos pontos P1, P2, P4 e P6, denotando maiores concentrações na superfície, enquanto que no restante da grade as concentrações no fundo foram mais relevantes (anomalias negativas). As anomalias positivas sugerem que a região apresenta pouca hidrodinâmica, facilitando a permanência por mais tempo do MPS na região superficial.

O padrão observado do MPS, durante esta primeira campanha, nos leva a sugerir que este apresenta fontes distintas, pois máximas concentrações foram observadas nos dois níveis de referência. Uma explicação plausível para as elevadas concentrações em superfície é que o transporte de material particulado (aerossóis) pelo vento, aumenta a concentração deste material na região e, junto ao fundo, a ressuspensão de sedimentos preteritamente depositados no leito do estuário é devido à ação das correntes. A ação de correntes junto ao fundo também pode ser observada na região da Ilha do Medo (P8), a qual apresentou concentrações de MPS 86,61% maiores quando comparadas com as concentrações de superfície.

Para a segunda campanha (Figura 32-B), foi possível observar anomalias positivas na porção norte do domínio (entre os pontos P5 e P8) denotando que o avanço da massa de água costeira provocou um barramento hidráulico (diferença de densidade) e a retenção do MPS nas frações mais finas na superfície. No restante do domínio, foram observadas anomalias negativas, muito provavelmente, devido à ressuspensão dos sedimentos de fundo pela ação das marés ou ao despejo do

material dragado na região do P3. As anomalias negativas indicam que o sedimento despejado na região do P3 está voltando a área que estava sendo dragada (P1, P2 e P4).

Ainda para a segunda campanha, observou-se uma pluma de sedimentos contínua entre os pontos P3 e P5 (Figura 32-B), sugerindo um elevado transporte destes sedimentos em função dos elevados valores de correntes (chegando a $3,76 \text{ m.s}^{-1}$) observados nas radiais A e B. A referida pluma de sedimentos apresentou direção preferencial para N-NE, a mesma observada para as correntes na região, o que fortalece a formação da pluma de dispersão.

Teoricamente, considerando que o material despejado pelo navio de descarte, oriundo da dragagem, apresenta um volume de sedimentos maior em relação ao fluxo natural de sedimentos suspensos no CPSL, acarretaria na formação de ilhas de deposição na região do P3. Esta suposição não se sustenta, pois as concentrações da primeira campanha foram 58,1% menores na região do P3 e 31,2% menores na região do P5, mesmo com a presença de uma pluma de dispersão de sedimentos que vai da superfície ao fundo.

Para a terceira campanha (Figura 32-C), foram observadas anomalias negativas em todo o domínio, mostrando que o transporte de fundo do MPS flui em direção aos berços de atracação do CPSL (P1 e P2) e que muito provavelmente é sedimento do despejo do material dragado na região de descarte (P3).

Nesta campanha as maiores concentrações foram obtidas na região do P3, cujas correntes na área foram de $2,24 \text{ m.s}^{-1}$. A pluma observada nesta campanha amostral apresentou direção de deslocamento N-NE, seguindo a direção preferencial das correntes. O fato da pluma não chegar até a região do P5 se deve às menores velocidades associadas a maré de quadratura. Entretanto, fica claro que as anomalias negativas na região dos berços de atracação se devem ao transporte de fundo do material depositado na área de descarte.

Após a atividade de dragagem de aprofundamento do canal de acesso ao CPSL ter sido concluída, as anomalias positivas (Figura 32-D) na região do P4, deve-se muito provavelmente, ao tipo de sedimento em suspensão transportado/depositado, indicando uma fração mais fina na superfície. No restante do domínio, as anomalias negativas de MPS apresentaram o mesmo comportamento da campanha realizada com 75% do material dragado, onde o transporte de MPS junto ao fundo mostra o retorno do sedimento do P3 em direção aos pontos P1 e P2.

As maiores concentrações de MPS ocorreram nas primeira e quarta campanhas. Durante a primeira campanha, as concentrações de MPS podem estar atreladas à ressuspensão dos sedimentos de fundo e/ou erosão de margens provocada pela entrada da maré, enquanto que na quarta campanha é possível que as concentrações de MPS tenham sido atreladas à denudação dos solos da bacia de drenagem, já que esta campanha foi realizada no final do período chuvoso.

A compreensão da dinâmica das partículas nos sistemas estuarinos é de grande importância para a compreensão de alguns processos locais. Segundo Uncles et al (2002) a turbidez estuarina é dependente, principalmente, do alcance da maré e do comprimento da sua intrusão. Em seu estudo, o autor mostra que os estuários de micromaré têm, geralmente, baixas concentrações de MPS ($\leq 100 \text{ mg.L}^{-1}$) enquanto que os estuários de macromaré têm elevadas concentrações de MPS ($100 \text{ mg.L}^{-1} \geq \text{MPS} \leq 1000 \text{ mg.L}^{-1}$). Este modelo conceitual simples, onde as marés regem as concentrações e a dinâmica do MPS aplica-se apenas quando os rios fornecem quantidades suficientes de sedimentos para o sistema. O comportamento não conservativo do MPS, apresentando perda excessiva relacionada ao aumento da salinidade, sugere um sistema retentor de sedimentos.

Corrêa (2016), estudando o CESM, observou que com o aumento da salinidade há uma diminuição nas concentrações de MPS e atribuiu este fato à grande exportação de partículas em suspensão pelo rio Mearim, forte interação da maré em toda a coluna d'água, sedimentação e floculação induzida pela salinidade e retenção desse material em suspensão dentro do ambiente. Essa tendência do MPS a se sedimentar com o aumento da salinidade pode ser devido à agregação desse material em suspensão com as partículas de sal (Mikkelsen et al., 2007).

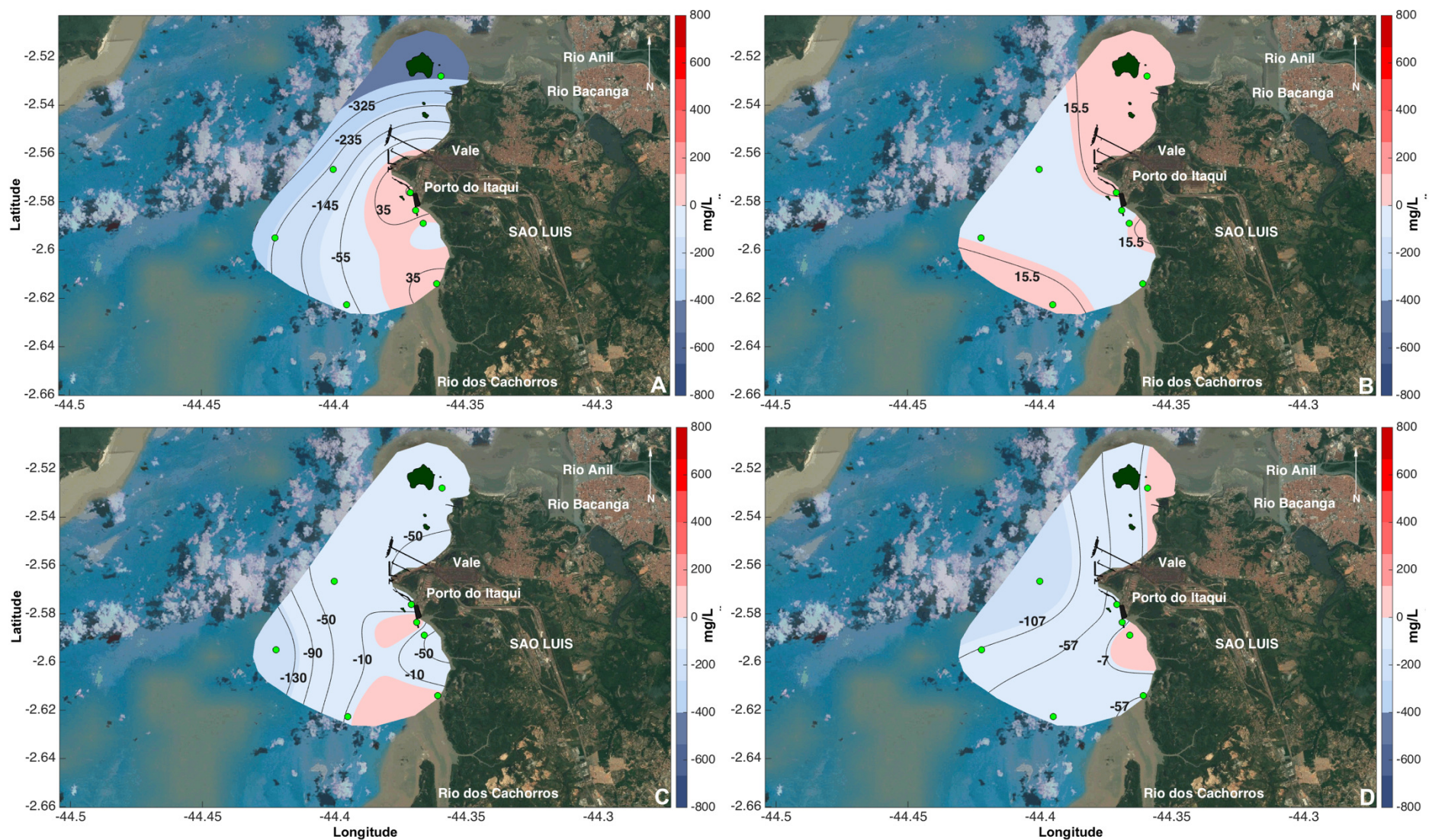


Figura 32: Anomalias do MPS ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) referentes a todo o período amostral. Paine A: primeira campanha; Paine B: segunda campanha; Paine C: terceira campanha e Paine: quarta campanha.

5.4. Transporte de volume

O transporte de volume (T_v) ou vazão estuarina nas seções transversais ao fluxo médio da região do CPSL (Figura 33), durante a primeira campanha, apresentou valores que variaram de $3,7 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $1,23 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, nas radiais A e B, respectivamente. Durante a segunda campanha, a variação foi de $3,57 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $7,78 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, para as radiais A e B, nessa sequência. Já para a terceira campanha, nas radiais A e B, a variação foi de $3,57 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $1,05 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente. Por fim, a variação das vazões nas radiais A e B da quarta campanha foi de $7,43 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $1,03 \times 10^5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. O valor apresentado na radial A para a quarta campanha ($74.324 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) foi uma exceção se comparado com os valores dos outros períodos para a mesma radial, onde estes variaram de $35.695 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $37.008 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. A discrepância dos valores de vazão da radial A indica, claramente, que houve um maior aporte de chuvas durante a quarta campanha (junho/2015), o que não ocorreu em nenhuma das outras campanhas, pois o déficit do nível de chuvas durante o período estudado para todo o Estado foi bastante relevante.

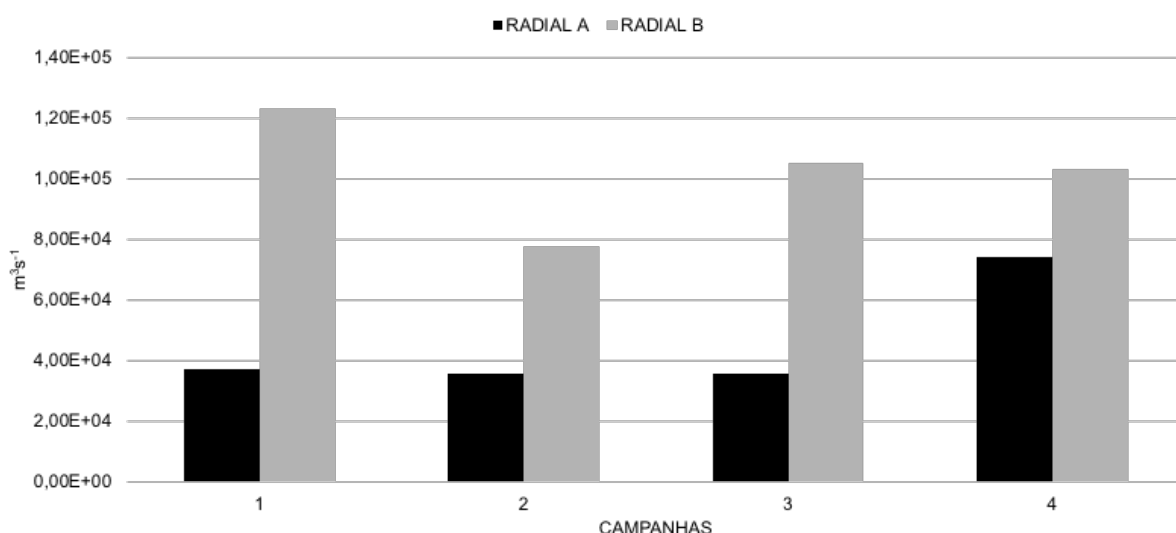


Figura 33: Variação do transporte de volume nas seções transversais ao escoamento durante as quatro campanhas amostrais.

Analisando os dados de Geyer (1996) para o rio Amazonas, estuário de macromaré, em relação aos dados de vazão da região ao largo do CPSL observou-se que os valores médios obtidos para este sistema são 60% menores que os valores do rio Amazonas. Durante o período de estiagem, a região ao largo do CPSL apresentou uma vazão média igual a $6,9 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, sendo este valor 31% menor

que a vazão média do rio Amazonas ($10 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) durante o mesmo período. Já para o período chuvoso, o valor médio de vazão da região ao largo do CPSL foi 60% ($8,9 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) menor que a vazão média do rio Amazonas, o qual apresentou valores médios de $22 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Esta grande diferença entre as vazões dos dois corpos hídricos pode ser justificada pela grande influência das descargas fluviais do rio Amazonas, onde estas chegam a 0,18 Sv ($\text{Sverdrup} = 10^6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$).

Durante o período de estiagem, ao compararmos os resultados apresentados por Dias et al. (2011) para um estuário de mesomaré localizado no semiárido, observa-se que os valores médios de vazão em relação à região ao largo do CPSL ($6,9 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) são quatro ordens de grandeza menores ($72,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Durante o período chuvoso essa diferença diminuiu e chegou a ser de apenas uma ordem de grandeza, sendo os valores médios das vazões da região do CPSL iguais $8,8 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e do rio Jaguaribe igual a $2,67 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Já para o CEP, Falkenberg (2009) mostrou que durante o período de estiagem a diferença é de duas ordens de grandeza quando comparados ao mesmo período no CESM, sendo estes: $6,9 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ - CPSL e $2,14 \times 10^2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ - CEP. Para o período chuvoso neste estuário, o valor médio da vazão foi uma ordem de grandeza menor que o valor médio da vazão do CESM durante o mesmo período: $8,8 \times 10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (CPSL) e $1,69 \times 10^3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (CEP).

Segundo Dias (2007), o que difere estes ambientes e suas vazões são o tipo de clima que cada estuário está inserido, como tropical úmido para o estuário do rio Paraíba do Sul; semiárido para o estuário do rio Jaguaribe; amazônico para o rio Amazonas e na interface amazônico- semiárido está localizado o CESM, o que implica em fluxos fluviais completamente distintos.

Dentre outras forçantes, a vazão é bastante importante para a caracterização de um estuário, pois esta caracterização é fundamental para o entendimento dos processos físicos, químicos, geológicos e biológicos, os quais dão bases para a conservação e uso racional destes ambientes, além de nos fornecer informações para previsão de um comportamento futuro no que diz respeito, por exemplo, ao nível de água.

5.5. Fluxos de MPS

No período de pré-dragagem, os fluxos instantâneos integrados de MPS, para a radial A (Figura 34-A), foram da ordem de 508,888 Ton.h⁻¹, enquanto que para as radiais B e C foram de 461,71 Ton.h⁻¹ e de 321,5 Ton.h⁻¹, (Figura 34-B e 34-C), respectivamente. Ao considerarmos os fluxos instantâneos das radiais B e C de forma integrada chegamos a um transporte de 782,000 Ton.h⁻¹ em maré vazante. Deste valor, apenas 65% chega a radial A, enquanto que os outros 35%, associados ao vórtice observado na região (inversão do campo de correntes) tende a depositar (aprisionar) o MPS próximo aos berços de atracação do Porto do Itaqui, diminuindo a profundidade local.

Após 25% do material dragado, os fluxos de MPS foram da ordem de 307,000 Ton.h⁻¹ para a radial A (Figura 35-A), enquanto que para a radial B chegaram a 770,012 Ton.h⁻¹ (Figura 35-B). Ao compararmos os fluxos instantâneos de MPS obtidos nessa campanha com os fluxos da campanha realizada no período de pré-dragagem, para a radial A, observa-se uma diminuição de 40%, enquanto que para a radial B os valores foram da mesma ordem de grandeza. Logo, apenas 39% dos fluxos que chegam ao CPSL na radial B, chegam a radial A, corroborando o comportamento observado na campanha de pré-dragagem, e formando uma pluma de sedimentos em direção aos berços de atracação do Porto do Itaqui.

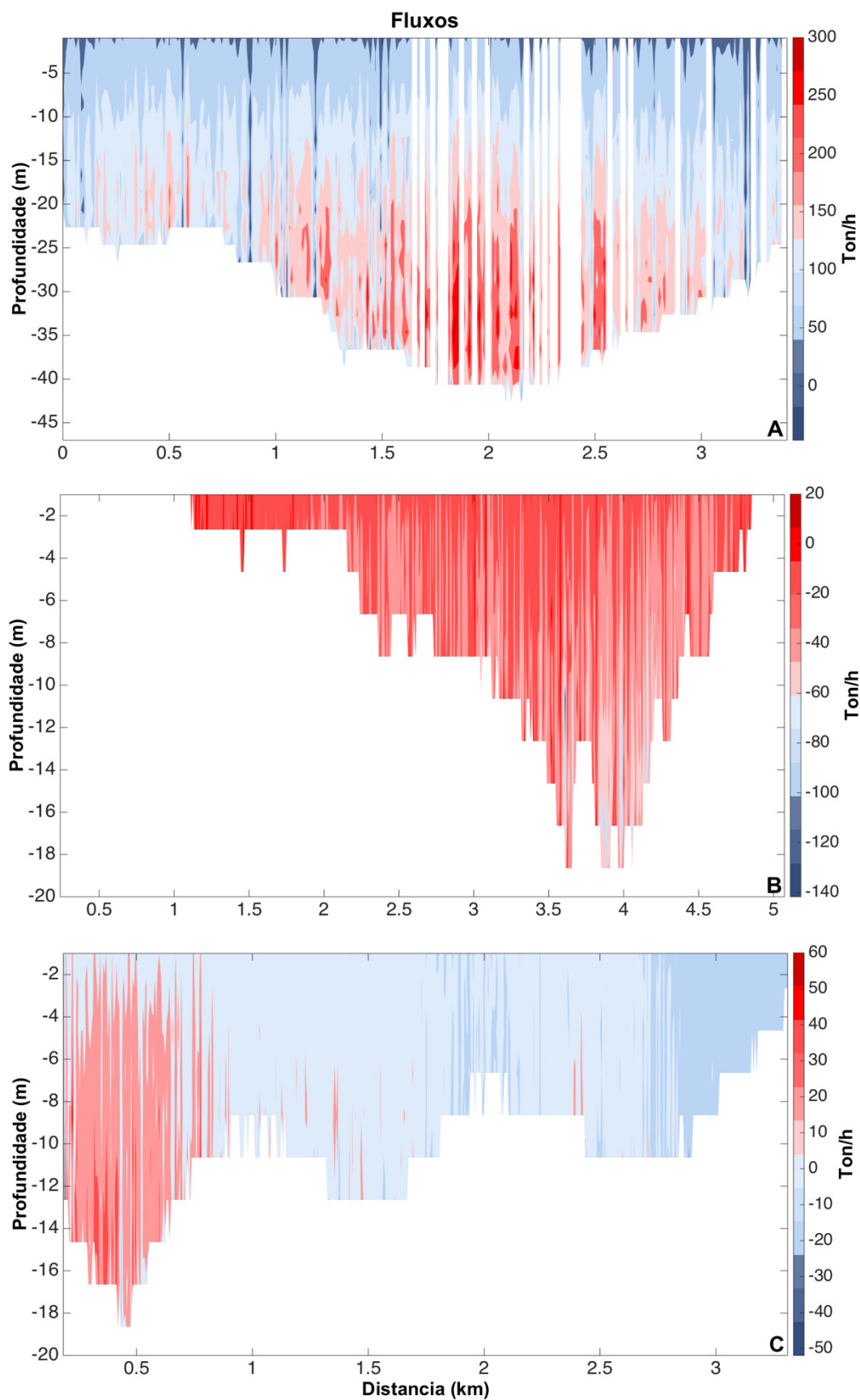


Figura 34: Representação visual do MPS ($\text{Ton} \cdot \text{h}^{-1}$), por unidade de área, ao longo do CPSL, durante a primeira campanha. A: Radial A; B: Radial B e C: Radial C.

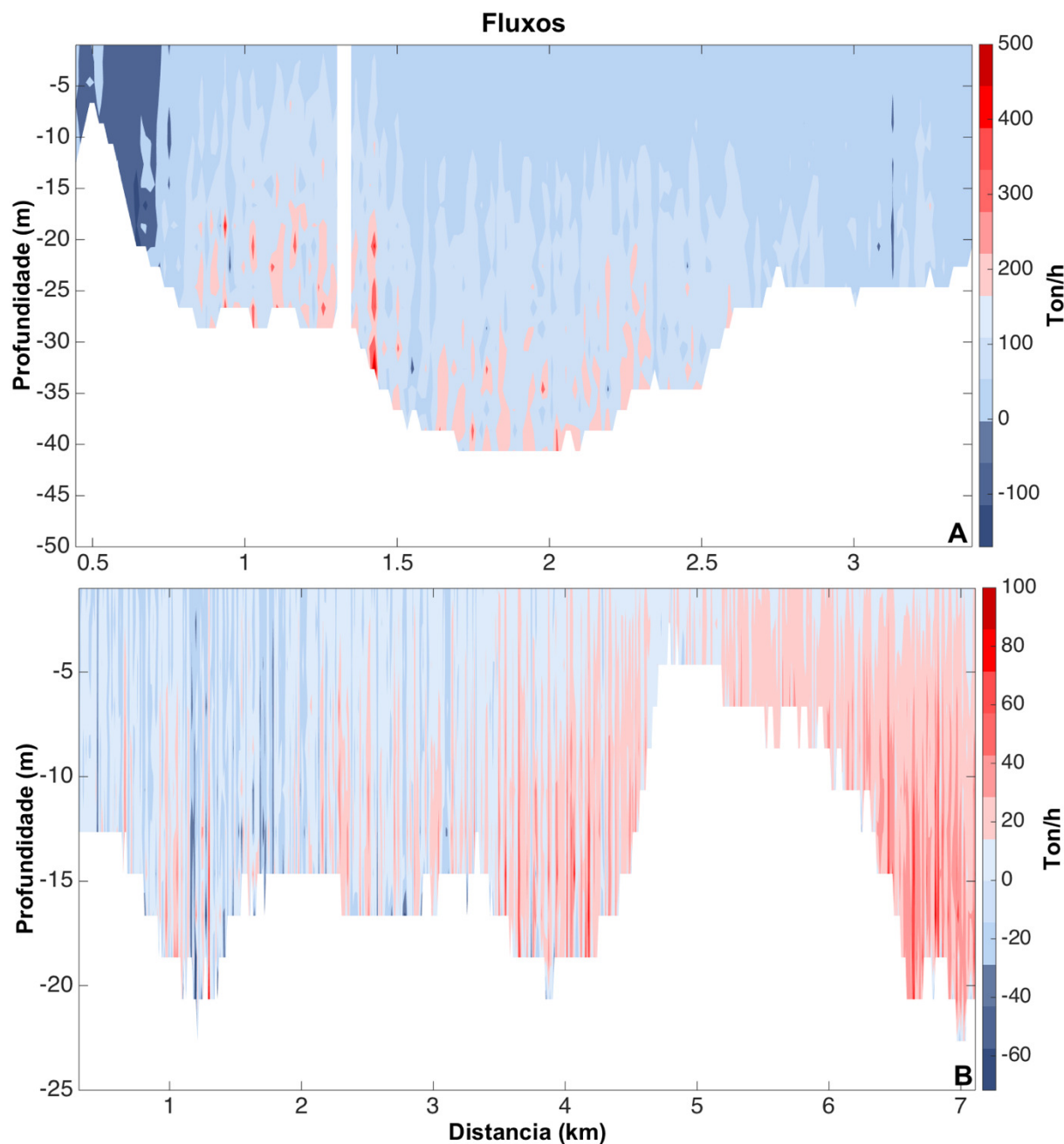


Figura 35: Representação visual do MPS ($\text{Ton}\cdot\text{h}^{-1}$), por unidade de área, ao longo do CPSL, durante a segunda campanha. A: Radial A e B: Radial B.

Na campanha realizada com 75% do material dragado, os fluxos instantâneos de MPS para a radial A (Figura 36-A) foram da ordem de $385,000 \text{ Ton}\cdot\text{h}^{-1}$ e na radial B foram de $585,92 \text{ Ton}\cdot\text{h}^{-1}$ (Figura 36-B). Ao compararmos os fluxos das radiais A e B, temos que apenas 65% do fluxo de MPS observado na radial B chegou na região da radial A, evidenciado a importância hidrodinâmica do vórtice localizado na região do CPSL. Para a quarta campanha, os fluxos de MPS para a radial A (Figura 37-A) foram da ordem de $350,000 \text{ Ton}\cdot\text{h}^{-1}$, enquanto que para a radial B (Figura 37-B) foi de $220,000 \text{ Ton}\cdot\text{h}^{-1}$.

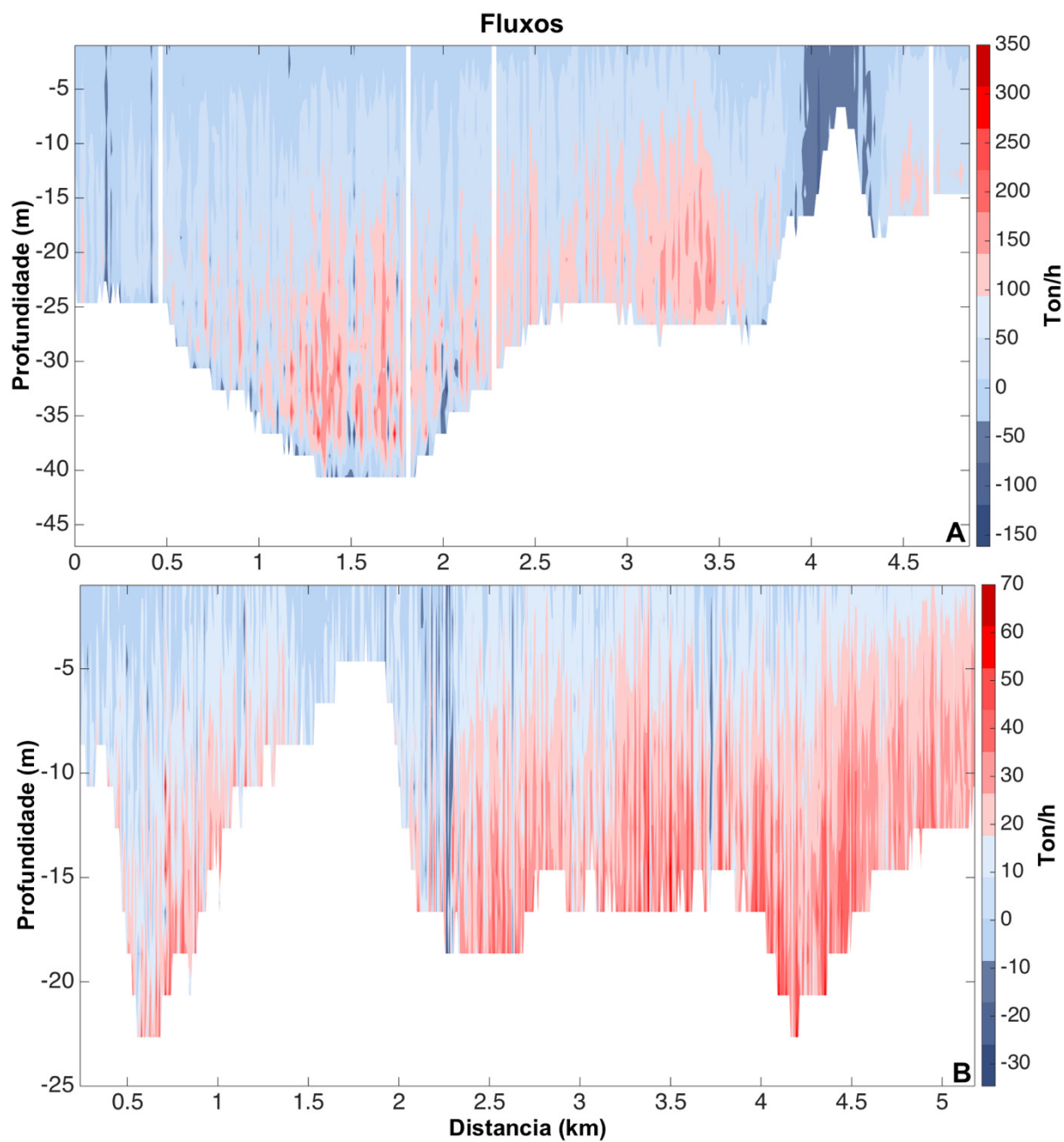


Figura 36: Representação visual do MPS (Ton.h⁻¹), por unidade de área, ao largo do CPSL, durante a terceira campanha. A: Radial A e B: Radial B.

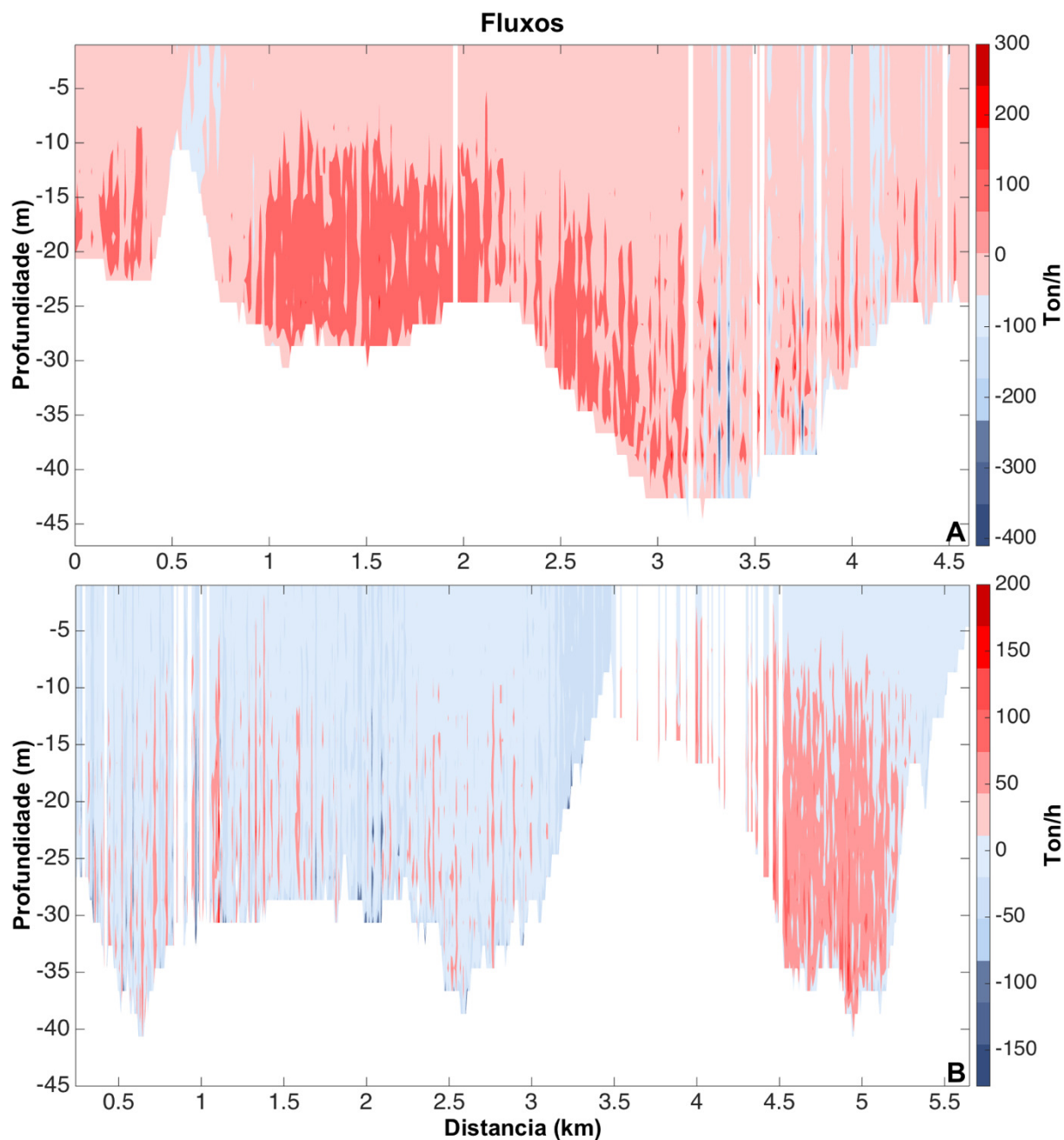


Figura 37: Representação visual do MPS (Ton.h^{-1}), por unidade de área, ao longo do CPSL, durante a quarta campanha. A: Radial A e B: Radial B.

A figura 38 mostra a evolução temporal dos fluxos de MPS na região do CPSL. Os valores (Ton.h^{-1}) para ambas as radiais mostram uma tendência decrescente, onde nas três primeiras campanhas temos os maiores fluxos na radial B, enquanto que na campanha pós-dragagem (estação de chuva) os maiores fluxos foram observados na radial A. A diferença de transporte entre as campanhas e entre radiais, mostra claramente que de 35% a 70% do MPS que chega ao CPSL pela radial B acaba se depositando na região dos berços de atracação do Porto do Itaquí (pontos P1, P2, P4), a exceção da campanha pós-dragagem.

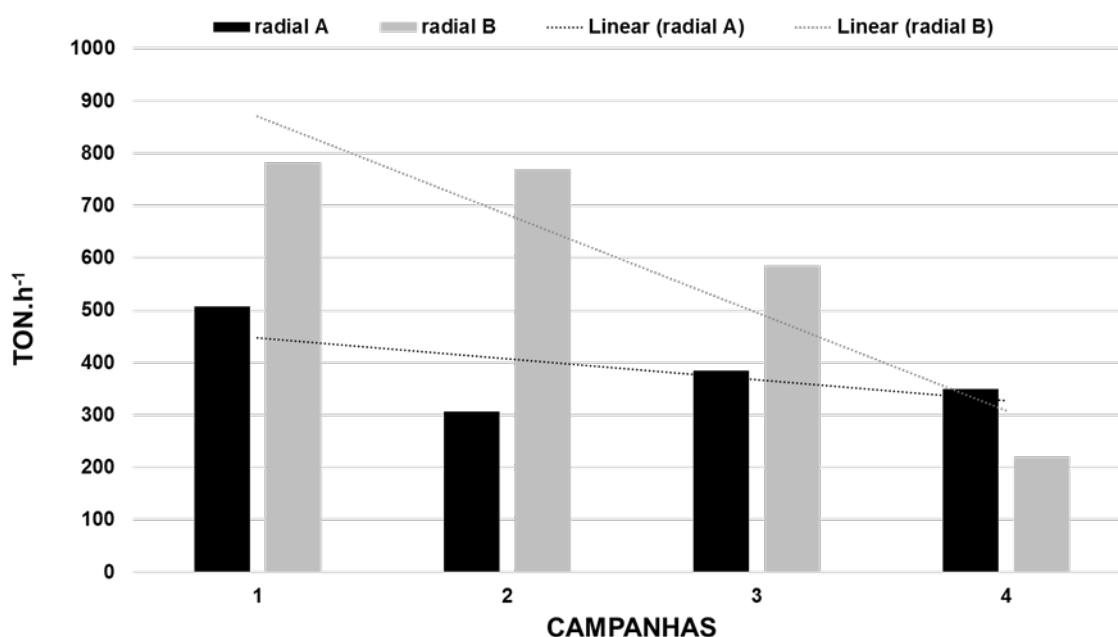


Figura 38: Evolução temporal dos fluxos de MPS (Ton.h⁻¹) para a região do CPSL.

Assim como observado para as campanhas anteriores, para a quarta campanha, o transporte de sedimentos na região ao largo do CPSL, demonstra um padrão hidrodinâmico bastante complexo, onde 63% do MPS, por unidade de área, que são transportados através da radial B, tendem a se depositar na região compreendida entre a área de descarte (P3) e os pontos P1, P2 e P4 dentro da área de estudo, assumindo o comportamento de uma pluma de dispersão de sedimentos. O padrão de recirculação observado nos dados de correntes, devido a presença de um vórtice entre as radiais A e B, é a provável causa para explicar a deposição de sedimentos entre as radiais e seu aprisionamento nas proximidades do Complexo Portuário do Itaqui, pois o material transportado pelo fluido adquire vorticidade e, devido à influência inercial da força de Coriolis, assume um sentido de rotação horário. Devido a uma divergência no transporte de sedimento gerada pelo transporte de Ekman e as características intrínsecas do sedimento (tamanho do grão e coesão do sedimento), parte do sedimento pode voltar ao canal de navegação através de um processo conhecido como escorregamento rotacional, pois parte deste sedimento fica depositado no talude do canal de acesso. Este comportamento hidrodinâmico também foi observado nas três campanhas iniciais.

Ainda para a quarta campanha, os transportes observados para as radiais A e B são 76,7%, e 62,9% maiores, respectivamente, quando comparados aos

transportes obtidos por Filizola & Guyot (2011) em um dos afluentes (Óbidos) do Rio Amazonas, na faixa de $81.621 \text{ Ton.h}^{-1}$, também influenciados por macromaré.

Comparando os fluxos das quatro campanhas (Figura 39) observamos que, para a radial A os maiores valores foram observados na primeira campanha ($508,888 \text{ Ton.h}^{-1}$), muito provavelmente, oriundos da dinâmica do CESM e do início da estação de chuva, que promovem uma maior lixiviação dos solos da bacia de drenagem. Durante a segunda campanha, tivemos uma redução de 40% ($307,000 \text{ Ton.h}^{-1}$), enquanto que na terceira a redução foi de 25% ($385,000 \text{ Ton.h}^{-1}$) em relação aos fluxos observados na primeira campanha. Na quarta campanha, o transporte de MPS representou 68,7% ($350,000 \text{ Ton.h}^{-1}$) dos fluxos observados na primeira campanha. Este decréscimo pode estar associado à retirada de material mais fino da região dragada e transportados pelo escoamento principal do CESM e ao final do período chuvoso para a região.

Para a radial B, os fluxos observados na quarta campanha ($220,000 \text{ Ton.h}^{-1}$) foram 43,8% menores em relação aos fluxos da primeira campanha ($391,610 \text{ Ton.h}^{-1}$), 71,4% menores em relação aos fluxos da segunda campanha ($770,012 \text{ Ton.h}^{-1}$) e 62,4% ($585,920 \text{ Ton.h}^{-1}$) menores em relação aos fluxos da terceira campanha. Grande parte dos fluxos observados nesta radial compuseram os fluxos observados na radial A.

Os elevados valores de transporte de MPS na área em estudo se devem, muito provavelmente, à hidrodinâmica do CESM, onde parte deste sedimento pode ser resultado de retrabalhamento ocasionado pela ação das correntes e devido a ação das marés.

Ao comprarmos os fluxos médios de MPS obtidos neste estudo, às descargas observadas no estuário do rio Paraíba do Sul (Rio de Janeiro) em regime de micromaré, temos que os fluxos são de duas ($8,2 \times 10^2 \text{ Ton.h}^{-1}$) a três ($1,4 \times 10^1 \text{ Ton.h}^{-1}$) ordens de grandeza maiores em relação aos observados por Almeida et al (2007) para as estações de seca e chuva, respectivamente. Se os fluxos de MPS forem comparados aos fluxos 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 e seca, ambos dominados por mesomaré, os fluxos médios encontrados na região ao largo do CPSL variam de duas ($4 \times 10^2 \text{ Ton.h}^{-1}$ e $5,6 \times 10^2 \text{ Ton.h}^{-1}$) a três ($2,6 \times 10^1 \text{ Ton.h}^{-1}$ e $4,7 \times 10^2 \text{ Ton.h}^{-1}$) 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 0,2 *Sverdrup* (1 *Sverdrup* = 10^6 m^3). Entretanto, o estuário do Rio Amazonas, assim como o CESM são influenciados por regime de macromaré, 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 7 metros nas duas regiões, o que torna a comparação das descargas de MPS bastante interessante.

Partindo dessa premissa, durante a estação de chuva (na quarta campanha), os fluxos médios observados neste estudo são uma ordem de grandeza menor ($4,7 \times 10^5 \text{ Ton.h}^{-1}$), correspondendo a 15% do fluxo observado por Filizola & Guyot (2011) que chegam a $3,2 \times 10^6 \text{ Ton.h}^{-1}$. Na estação seca, os autores observaram para o estuário do Amazonas que o fluxo sedimentar cai para a metade do observado na estação de chuva ($1,6 \times 10^6 \text{ Ton.h}^{-1}$), continuando uma ordem de grandeza maior aos fluxos observados na primeira campanha ($3,7 \times 10^5 \text{ Ton.h}^{-1}$), segunda campanha ($3,5 \times 10^5 \text{ Ton.h}^{-1}$) e terceira campanha ($5,8 \times 10^5 \text{ Ton.h}^{-1}$). Em termos percentuais, os fluxos encontrados na região ao largo do CPSL correspondem a 23%, 22% e 36% dos fluxos reportados ao Amazonas. Vale ressaltar que os maiores fluxos de MPS observados na terceira campanha se deve, muito provavelmente, a amostragem ter sido realizada no exato momento do descarte da draga, e/ou a presença de mais argilominerais oriundos de bolsões de lama na área dragada e/ou ao deslizamento de material mais fino localizado na região do P4 devido ao desnível do talvegue.

5.6. Interações continente-oceano

O volume de água total (VT) da primeira campanha, na radial A, foi de $0,8 \times 10^9 \text{ m}^3$, onde 9,4% foi considerado doce. Para a radial B, esses valores apresentaram mesma ordem de grandeza, sendo VT igual a $2,7 \times 10^9 \text{ m}^3$, cujo percentual de água doce (PAD) foi de 11,6%. Na segunda campanha, o VT na radial A foi de $0,8 \times 10^9 \text{ m}^3$, sendo 7,5% de água doce. Para a radial B, o VT foi de $1,74 \times 10^9 \text{ m}^3$, com 8,8% considerado doce.

Para a terceira campanha, o VT observado foi de $0,8 \times 10^9 \text{ m}^3$, destes apenas 9,5% foi considerado como água doce para a radial A. Já para a radial B, o VT observado foi de $2,35 \times 10^9 \text{ m}^3$, sendo 9,2% correspondente ao PAD. Durante a

quarta campanha, o VT foi correspondente a $1,66 \times 10^9 \text{ m}^3$, onde 24,8% foi considerado como água doce para a radial A. Para a radial B, com um VT de $2,3 \times 10^9 \text{ m}^3$, o PAD chegou a 31,9%. Apenas nesta última campanha foram observadas características de período chuvoso na região: águas mais quentes e menos salinas, compatíveis com a mistura da massa de água costeira com a massa de água estuarina oriunda da drenagem continental. Os resultados dos PAD na quarta campanha corroboram com a distribuição do diagrama TS espalhado. Além disso, ressaltamos que os dados foram obtidos em período de maré vazante.

Durante o período das três campanhas iniciais, o Maranhão estava sob a influência de um bloqueio atmosférico (UEMA, 2015) que foi o principal responsável pelo déficit de chuvas no Estado. A região norte foi onde menos choveu durante todo o período, onde São Luís teve apenas 14% (30,2 mm) do total de chuvas esperado para o período (213,9 mm), segundo dados do INMET, refletindo nos pequenos percentuais de água doce.

Foi possível diagnosticar que nos meses de pouca precipitação pluviométrica, onde o volume de água doce na região ao largo do CPSL é mínimo (cerca de 14% do volume hídrico total), o domínio de águas costeiras é notório fazendo com que a massa de água entre e saia do sistema estuarino com maior facilidade, ainda que em maré vazante. Este comportamento nos leva a sugerir que, o fluxo fluvial ou massa de água estuarina não apresenta competência para ultrapassar a barreira física imposta pela macromaré atuante na região.

O tempo de residência (TR) das águas estuarinas e costeiras é uma importante ferramenta no estudo da qualidade da água destes ambientes e sua determinação é de fundamental importância na administração atual dos recursos hídricos dos estados da Amazônia Legal, já que estes têm grande importância na disponibilidade dos recursos pesqueiros desta região, além de possuírem portos de grande relevância para o Brasil, como o CPSL localizado no CESM, atualmente considerados os principais portos da costa norte brasileira.

O tempo de residência (TR) das águas estuarinas da região ao largo do CPSL, durante a primeira campanha, foi de 0,6 horas na radial A e 0,7 horas na radial B. Durante a segunda campanha, esses valores diminuíram muito pouco, sendo o TR das duas radiais igual a 0,5 horas. Para a terceira campanha, o TR se manteve dentro da média para a região, também sendo igual para as duas radiais: 0,6 horas. Já para

a quarta campanha, o TR da radial A correspondeu a 1,5 horas e o da radial B foi igual a 2 horas.

Ao confrontarmos os percentuais de água doce (PAD) com os valores de referência para os tempos de residência (TR) (Figura 39), podemos observar dois grupos distintos. O primeiro grupo é reflexo do pequeno PAD ($PAD < 20\%$), portanto, resulta em TR's menores que uma hora ($TR < 1$ hora), enquanto que o segundo grupo mostra que $PAD > 20\%$ resultam em TR's $> 1,5$ horas. Neste estudo, não temos como inferir quando o vetor fluvial passa a ser mais relevante, diminuindo os TR's a ele relacionados. Entretanto, Santos et al., (2018 – *no prelo*) mostram que para PAD até 65% os TR's podem chegar a 5 horas, e quando os $PAD > 60\%$ os TR's são em média de 2 horas, sugerindo que para os estuários do Maranhão, o ponto de inflexão é o PAD de 60%.

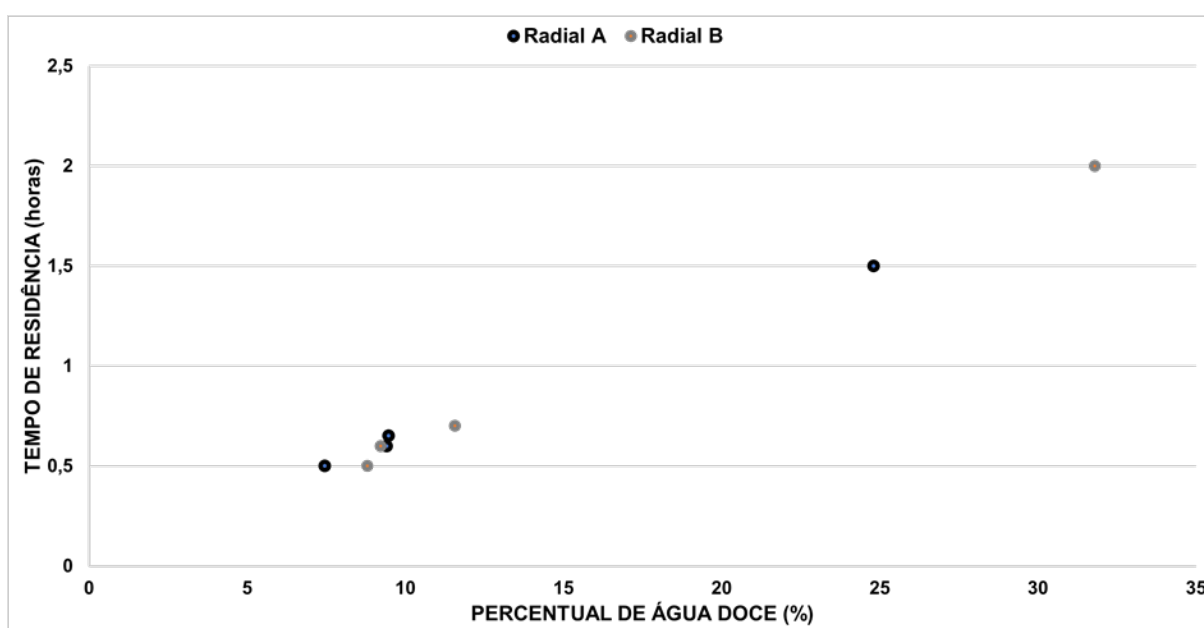


Figura 39: Tempo de residência e percentual de água doce para as radiais A e B durante o período amostral.

No estuário da Ria de Pontevedra, noroeste da Espanha, região de clima temperado e dominado por um regime de macromaré, o tempo de residência 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). No estuário do rio Jaguaribe, o TR das águas estuarinas em períodos de grandes deflúvios variou de 12 horas a 13 dias, mostrando forte dependência dos padrões de circulação e da

vazão hídrica total para a região (Dias 2005a e Dias et al., 2005d). Já para a baía do Espírito Santo, Sudeste do Brasil, a qual é dominada por regime de micromaré, o TR pode variar entre 10 e 21 dias, devido a efeitos deflectivos das correntes (Gaze, 2005).

Durante a quarta campanha, observou-se um aumento de, aproximadamente, 67% entre o menor e o maior valor de TR na radial A e de 75% entre o maior e o menor valor de TR na radial B. O mês de amostragem da segunda campanha foi o mês onde os valores de TR foram os menores deste período amostral. O volume de precipitações representou apenas 14% do volume esperado para o período o que acarretou em um menor volume de água doce e, conseqüentemente, um menor TR já que, não havendo vetor contrário (descarga fluvial), a maré entra e sai na região ao largo do CPSL com uma maior rapidez. Isso pode ser confirmado pelos valores de velocidades de corrente para o período, onde o maior valor ocorreu durante a segunda campanha ($3,76 \text{ m.s}^{-1}$).

6. CONCLUSÕES

As maiores intensidades de corrente ocorreram, para a radial A, na segunda campanha ($3,76 \text{ m.s}^{-1}$) e para a radial B na quarta campanha ($2,81 \text{ m.s}^{-1}$). Nas duas radiais a direção das correntes foi de N-NE e o comportamento hidrodinâmico mostrou uma inversão do campo de correntes na radial B sugerindo a presença de uma célula de circulação estacionária. Houve diminuição da velocidade das correntes em direção ao fundo em todas as campanhas.

As estruturas térmica e salina observadas na região do CPSL, apresentaram comportamento quase homogêneo durante todo o período amostral, reflexo da sazonalidade climática da região, evidenciando dois períodos bem marcados, seca e chuva. A análise dos índices termohalinos e dos percentuais de saturação de oxigênio sugerem a presença de duas massas de água: Água Costeira (AC) e Água Estuarina (AE).

As concentrações de MPS e os fluxos instantâneos mostraram uma pluma de dispersão contínua na região da área do descarte (P3) fluindo em direção à Ilha do Medo (P5), sugerindo um elevado transporte destes sedimentos em função da elevada hidrodinâmica da região. A presença de um vórtice ciclônico nessa região aumentou substancialmente a taxa de sedimentação na região. Este fato, além de aumentar a frequência da necessidade de dragagem desse material, expõe um possível erro na escolha do ponto de descarte ou até mesmo na escolha das condições hidrodinâmicas ideais para serem feitos os descartes, tal escolha só podendo ser galgada com um amplo conhecimento (espaço-temporal) do comportamento hidrodinâmico das correntes na região.

O volume de água na região do CPSL é composto por, aproximadamente, 15% de água doce, oriunda da drenagem continental. Durante o período de pós-dragagem foi observada uma maior exportação de água doce do sistema estuarino para a região costeira, pois, em números absolutos, essa foi a campanha que apresentou o maior percentual de água doce de todo o estudo: $\cong 30\%$.

Os tempos de residência (TR) durante todo o período chuvoso (junho/2015) chegaram a 2 horas, porém com o intenso período de estiagem, demonstrado nos dados de salinidade ($32,8 \text{ g.kg}^{-1}$), o TR foi diminuindo e chegou a ser de 0,5 horas durante a segunda campanha.

O volume de água transportado da plataforma continental maranhense em direção à costa associado a outros fatores e forçantes físicas fazem com que o nível de água chegue a 5 metros durante maré de quadratura e em até 8 metros durante maré sizígia e gera uma barreira hidráulica incapaz de ser rompida pelas vazões fluviais na época da estiagem. Partindo do princípio de que o espalhamento na região é não-linear, por conta da altíssima difusão da área, pode-se afirmar que, caso ocorra um derramamento de contaminante na região, este contaminante tenderá a se acumular na margem e não seguir o fluxo principal do fluido, podendo assim causar efeitos nocivos locais na região marginal do CPSL.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para um melhor entendimento da circulação hidrodinâmica e das massas de água da região do CPSL, baseada em uma melhor distribuição de estações amostrais (Figura 40), faz-se necessário o conhecimento da variação espacial do campo de correntes e das variáveis de estado, em eventos de maré de vazante e enchente e em maré de sizígia e quadratura, respeitando a sazonalidade climática da região.

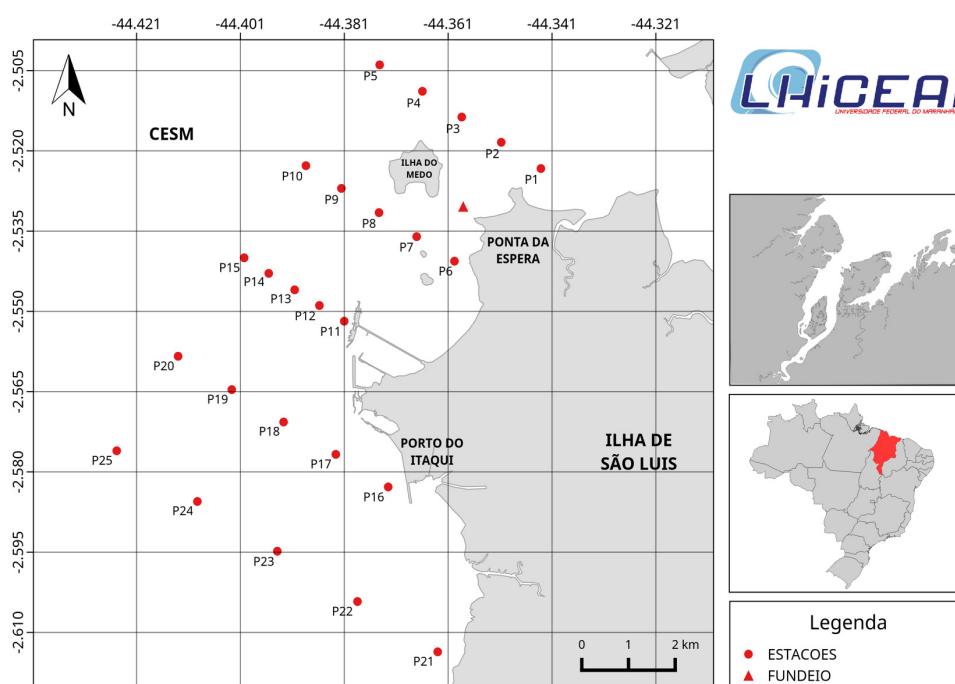


Figura 40: Proposta de nova malha amostral proposta para o aprimoramento do conhecimento da circulação hidrodinâmica e das massas de água da região ao largo do CPSL.

Recomenda-se a realização de fundeios para determinar se a intensidade das correntes aumenta ou diminui ao longo de um ciclo de maré, assim como ter a capacidade de determinar as componentes mais energéticas associadas ao transporte advectivo de sal, afim de que seja permitida a identificação de várias correlações que indiquem os processos físicos responsáveis pelos transportes de sal estuário abaixo e acima. Além disso, investigar a estabilidade da coluna d'água através do número de Richardson e da anomalia da energia potencial

O uso de técnicas de modelagem matemática computacional de alto desempenho que simulem a probabilidade de deposição dos sedimentos dragados na região do CPSL é de fundamental importância para a construção de cenários que permitam a escolha de novas regiões de descarte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLAN, J.R.L.; DUFFY, M.J. Medium-term sedimentation on high intertidal mudflats and salt marshes in the Severn Estuary, SW Britain: The role of wind and tide. **Mar. Geol.** 150, 1–27. 1998.
- ALI, A.; LEMCKERT, C.J.; ZHANG, H.; DUNN, R.J.K. Sediment Dynamics of a Very Shallow Subtropical Estuarine Lake. **J. Coast. Res.** 26, 436–443. 2010.
- ALMEIDA, M. G.; REZENDE, C. E.; SOUZA, C. M. M. Variação temporal, transporte e partição de Hg e Carbono Orgânico nas frações particulada e dissolvida da coluna d'água da bacia inferior do Rio Paraíba do Sul, RJ, Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, v. 21, n. 1, p. 111–128, 2007.
- AMARAL, R. F. Caracterização hidrossedimentológica do canal de acesso do complexo portuário do Maranhão. **Tese de Doutorado**. Escola Politécnica da USP. 207 p. 2006.
- ANDUTTA, F.P.; WANG, X.H.; LI, L.; WILLIAMS, D. Hydrodynamics and sediment transport in a macro-tidal estuary: Darwin Harbour, Australia. In **Estuaries of Australia in 2050 and Beyond**; Wolanski, E., Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, pp. 111–129. 2014.
- ANTHONY, K.R.N.; RIDD, P.V.; ORPIN, A.R.; LARCOMBE, P.; LOUGH, J. Temporal variation of light availability in coastal benthic habitats: Effects of clouds, turbidity, and tides. **Limnol. Oceanogr.** 49, 2201–2211. 2004.
- BERGAMO, A. L; MIRANDA, L. B; CORREA, M. A, 2002. Estuário: programas para processamento e análise de dados hidrográficos e correntográficos. **Relatório Técnico** do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. 49, 1-16.
- BERNÉ, S.; CASTAING, P.; LE DREZEN, E., and LERICOLAIS, G., Morphology, internal structure, and reversal of asymmetry of large subtidal dunes in the entrance to Gironde. Estuary (France). **Journal of Sedimentary Petrology**, 63, 780-793. 1993.
- BIANCHI, T.S. Biogeochemistry of estuaries. **Oxford University Press**. 2006.
- BLACK, K.S. Suspended sediment dynamics and bed erosion in the high shore mudflat region of the Humber Estuary, UK. **Mar. Pollut. Bull.** 37, 122–133. 1998.
- BÖCK, C.S. Influence of bottom morphology on the hydrodynamics of Guajará Bay (Amazon, Brazil). **Journal of Coastal Research**. p. 981-985. 2011.
- CAMARGO, M.; ISAAC, V. Ictiofauna estuarina. In: **Os manguezais da costa norte brasileira**. Eds. Fernandes, M.E.B., Fundação Rio Bacanga, p. 142. 2003.
- CASTIGLIA, M. C. C. P. Disposição subaquática de rejeitos de dragagem: o caso do complexo lagunar de Jacarepaguá. Rio de Janeiro, **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, 2006.

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.

CHRISTIANSEN, C.; GERTZ, F.; LAIMA, M.J.C.; LUND-HANSEN, L.C.; VANG, T.; JÜRGENSEN, C. Nutrient (P, N) dynamics in the southwestern Kattegat, Scandinavia: Sedimentation and resuspension effects. **Environ. Geol.** 29, 66–77. 1997.

CLOERN, J.E.; NICHOLS, F.H. Time scales and mechanisms of estuarine variability, a synthesis from studies of San Francisco Bay. **Hydrobiology**. 129, 229–237. 1985.

COOPER, J.A.G. Sedimentation in the cliff-bound, microtidal Mtamvuna Estuary, South Africa. **Marine Geology**, 112, 237-256. 1993.

CORRÊA, M.C. Hidrogeoquímica dos sólidos totais em suspensão n esuário do rio Mearim. **Monografia** (Graduação). Curso de Oceanografia. Departamento de Oceanografia e Limnologia, Universidade Federal do Maranhão. 111 p. 2016.

DA SILVA, A.C.; ARAÚJO, M.; BOURLÈS, B. Variação sazonal da estrutura de massas de água na plataforma continental do Amazonas e área oceânica adjacente. **Revista Brasileira de Geofísica**. n. 23. v. 2. 145-157. 2005

DEVLIN, M.J.; BARRY, J.; MILLS, D.K.; GOWEN, R.J.; FODEN, J.; SIVYER, D.; TETT, P. Relationships between suspended particulate material, light attenuation and Secchi depth in UK marine waters. **Estuar. Coast. Shelf Sci.** 79, 429–439. 2008.

DIAS, F.J.S. Avaliação da descarga e geoquímica do material em suspensão no estuário do rio Jaguaribe – CE. Departamento de Geologia. **Monografia**. Universidade Federal do Ceará. 107 f. 2005a.

DIAS, F.J.S.; MARINS, R.V.; MAIA L.P. Avaliação hidrodinâmica e tempo de residência no estuário do rio Jaguaribe – CE. In: **Anais/ Resumos da 57ª Reunião Anual da SBPC**, Fortaleza. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, São Paulo: <http://www.sbpnet.org.livro/57ra>. 2005d.

DIAS, F. J. S. Hidrodinâmica das descargas fluviais para o estuário do Rio Jaguaribe (CE). **Dissertação**. Universidade Federal do Ceará – UFC, Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará. 115p. 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**, Volume 66, p. 123-135. 2013.

DIAS, F. J. S.; CASTRO, B.M.; LACERDA, L.D.; MIRANDA, L.B.; MARINS, R.V. 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, n. August, p. 258–274, 2016.

DITTMAR, T.; LARA, R.J. Driving forces behind nutrient and organic matter dynamics in a mangrove tidal creek in North Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. v.52, n.2, p. 249-259. 2001.

DROPPO, I.G.; KRISHNAPPAN, B.G.; LISS, S.N.; MARVIN, C.; BIBERHOFER, J. Modelling sediment-microbial dynamics in the South Nation River, Ontario, Canada: Towards the prediction of aquatic and human health risk. **Water Res.** 45, 3797–3809. 2011.

EMERY, W. J.; THOMSON, R. E. 1998. Data analysis methods in physical oceanography. **Great Britain: Pergamon**, 1998. 634 p.

FALKENBERG, A.V. Estudo da dispersão, mistura e qualidade da água do Complexo Estuarino de Paranaguá com uso de modelagem numérica. **Dissertação** Universidade Federal do Maranhão. 2009.

FEITOSA, A. C. Evolução geomorfológica do litoral norte da Ilha do Maranhão. 1989, 210 f. **Dissertação**. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 1989.

FENSTER, M.S. and FITZGERALD, D.M. Morphodynamics, stratigraphy, and sediment transport patterns of the Kennebec River estuary, Maine, USA. **Sedimentary Geology**, 107, 99-120. 1996

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 4, p. 566–576, 2011.

FLOR, G.; FLOR-BLANCO, G.; REY, J. Dynamics and morpho-sedimentary in the lower mesotidal estuary of Villaviciosa (NW Spain): A management proposal. **Geological Acta**. vol. 13, n. 2, p. 107-121. 2015.

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.

GAZE, F.N. Tempo de residência na Baía do Espírito Santo. **Monografia**. Departamento de Ecologia e Recursos Naturais. Universidade Federal do Espírito Santo. 60 p. 2005.

GEYER, W. R. et al. Physical oceanography of the Amazon shelf. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 5–6, p. 575–616, 1996.

GÓMEZ-GESTEIRA, M.; CASTRO, M.; PREGO, R. Dependence of water residence time in Ria Pontevedra (NW Spain) on the seawater inflow and the river discharge. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. V. 58. 567-573. 2003.

GUILLOU, N; CHAPALAIN, G. Effects of tide on waves in the outer Seine estuary and the harbour of Le Havre. **Coastal Engineering Proceedings**. n.33. 2012.

IBGE. **Síntese dos indicadores sociais**. Ministério do Planejamento e Gestão. 383 p. ISBN 85-240-3165-4. 2002.

IBGE. **Perfil dos municípios brasileiros**. 2003.

JOUON, A.; DOUILET, P.; OVILLON, S.; FRAUNIE, P. Calculations of hydrodynamics time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model. **Continental Shelf Research**. v. 26. 1395-1415-2006.

KETCHUM, B.H. Hydrographic factors involved in the dispersion of pollutants introduced into tidal waters. **Journal Boston Society Civil Engineering**, v. 37, p. 296-314, 1950.

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

LIU, W.-C.; HSU, M.-H.; KUO, A.Y. Modelling of hydrodynamics and cohesive sediment transport in Tanshui River estuarine system, Taiwan. **Mar. Pollut. Bull.** 44, 1076–1088. 2002.

LOBO, F.J.; PLAZA, F.; GONZÁLES, R.; DIAS, J.M.A; KAPMISALIS, V.; MENDES, I.; DEL RIO, V.D. Estimations of bedload sediment transport in the Guadiana (SW Iberian Peninsula) during low river discharge periods. **Journal of Coastal Research an International Forum for the Littoral Sciences**. Special ISSUE n. 41. p.12-26. 2004.

LOPES, J.F.; DIAS, J.M; DEKEYSER, I. Numerical modeling of cohesive sediment transport in Tanshui river estuarine system, Taiwan. **Mar. Pollut. Bull.** 44, 1076-1088, 2002.

MACHIWA, J.F. Anthropogenic pollution in the Dar es Salaam harbour area, Tanzania. **Mar. Pollut. Bull.** 24, 562–567. 1992.

MARONE, E.; NOERBERG, M.; LAUTERT, L.F.; SANTOS, I.; FILL, H.D.; BUBA, H.; MARENDIA, A. Medições de correntes e curva vazão-maré na Baía de Paranaguá - PR. **Boletim Paranaense de Geociências**. n. 60-61, p. 55-64. Editora UFPR. 2007.

MEDEIROS, P. R. P. et al. Aporte de material em suspensão no Baixo Rio São Francisco (SE/AL), em diferentes condições hidrológicas. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 15, n. 1, p. 42–53, 2011.

MIKKELSEN, O.A.; HILL, P.S.; MILLINGAN, T.G. Seasonal and spatial variation of flux size, settling velocity and density on the inner Adriatic Shelf (Italy). **Continental Shelf Research**. v. 27, p. 417-430, 2007.

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, B.M. Aplicação do diagrama ts estatístico-volumétrico à análise das massas de água da plataforma continental do Rio Grande do Sul. **Boletim**

do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, v.28, n.1, p. 185-200, 1979.

MIRANDA, L.B. Análise de massas de água de Plataforma Continental e da região oceânica adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) à Ilha de São Sebastião (SP). **Tese de Livre Docência**. Universidade de São Paulo, São Paulo. 194 p. 1982.

MIRANDA, L.B. Forma da correlação ts de massas de água das regiões costeira e oceânica entre Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP), Brasil. **Boletim do Instituto de Oceanográfico da Universidade de São Paulo**. v.33, n.2, p. 105-119. 1985.

MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B. Circulation and mixing in the Bertioga Channel (SP, Brazil) due to tidal forcing. **Estuaries** 21(2), 204–214. 1998.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo: Edusp. 417 p. 2002.

MIRANDA, L.B., BERGAMO, A.L., CASTRO, B.M. Interactions of river discharge and tidal modulation in a tropical estuary, NE Brazil. **Ocean Dynamics** 55 (5–6), 430–440, <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-005-0028-z>. 2005

MONTEIRO, M. T. Fitorremediação de rejeito contaminado proveniente do Canal do Fundão, na Baía de Guanabara-RJ. Rio de Janeiro, **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ, 2008.

MORAES, J. O. Processos de sedimentação na Baía de São Marcos, estado do Maranhão, Brasil. **Arquivos de Ciências do Mar**, 17(2): 153-164. 1977.

MORIN, J.; MORSE, J.W. Ammonium release from resuspended sediments in the Laguna Madre estuary. **Mar. Chem.** 65, 97–110. 1999.

NUGEO/LABGEO. **Atlas do Maranhão**. Universidade Estadual do Maranhão. São Luís/MA, 2002.

NUGEO/LABGEO. **Boletim Hidroclimático Janeiro de 2015**. Universidade Federal do Maranhão. 2015.

NUGEO/LABGEO. Bacias hidrográficas e climatologia no Maranhão. **Relatório Técnico**. Universidade Federal do Maranhão. 2016.

OVIATT, C.A.; NIXON, S.W. Sediment resuspension and deposition in Narragansett Bay. **Estuar. Coast. Mar. Sci.** 3, 201–217. 1975.

REGNIER, P.; WOLLAST, R. Distribution of trace metals in suspended matter of the Scheldt estuary. **Mar. Chem.** 43, 3–19. 1993.

SANTOS, V. H. M. et al. Hydrodynamics and suspended particulate matter retention in macrotidal estuaries located in Amazonia-semiarid interface (Northeastern-Brazil). **Estuaries and Coasts**, (No Prelo).

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.

SOARES, R.A. Modelagem do transporte de ictioplâncton no Complexo Estuarino de São Marcos, Maranhão - Brasil. 60 f. **Dissertação**. Programa de Pós-Graduação em Recursos Aquáticos e Pesca. Universidade Estadual do Maranhão. 2015.

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

TENGBERG, A.; ALMROTH, E.; HALL, P. Resuspension and its effects on organic carbon recycling and nutrient exchange in coastal sediments: In situ measurements using new experimental technology. **J. Exp. Mar. Biol. Ecol.** 285, 119–142. 2003.

TORRES, R. J. Uma Análise Preliminar dos Processos de Dragagem do Porto do Rio Grande, RS. Rio Grande, RS, **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2000.

UNCLES, R.J.; STEPHENS, J.A.; SMITH, R.E. The dependence of estuarine turbidity on tidal intrusion length, tidal range and residence time. **Continental Shelf Research**, v.22, n. 11, p. 1835-1856. 2002.

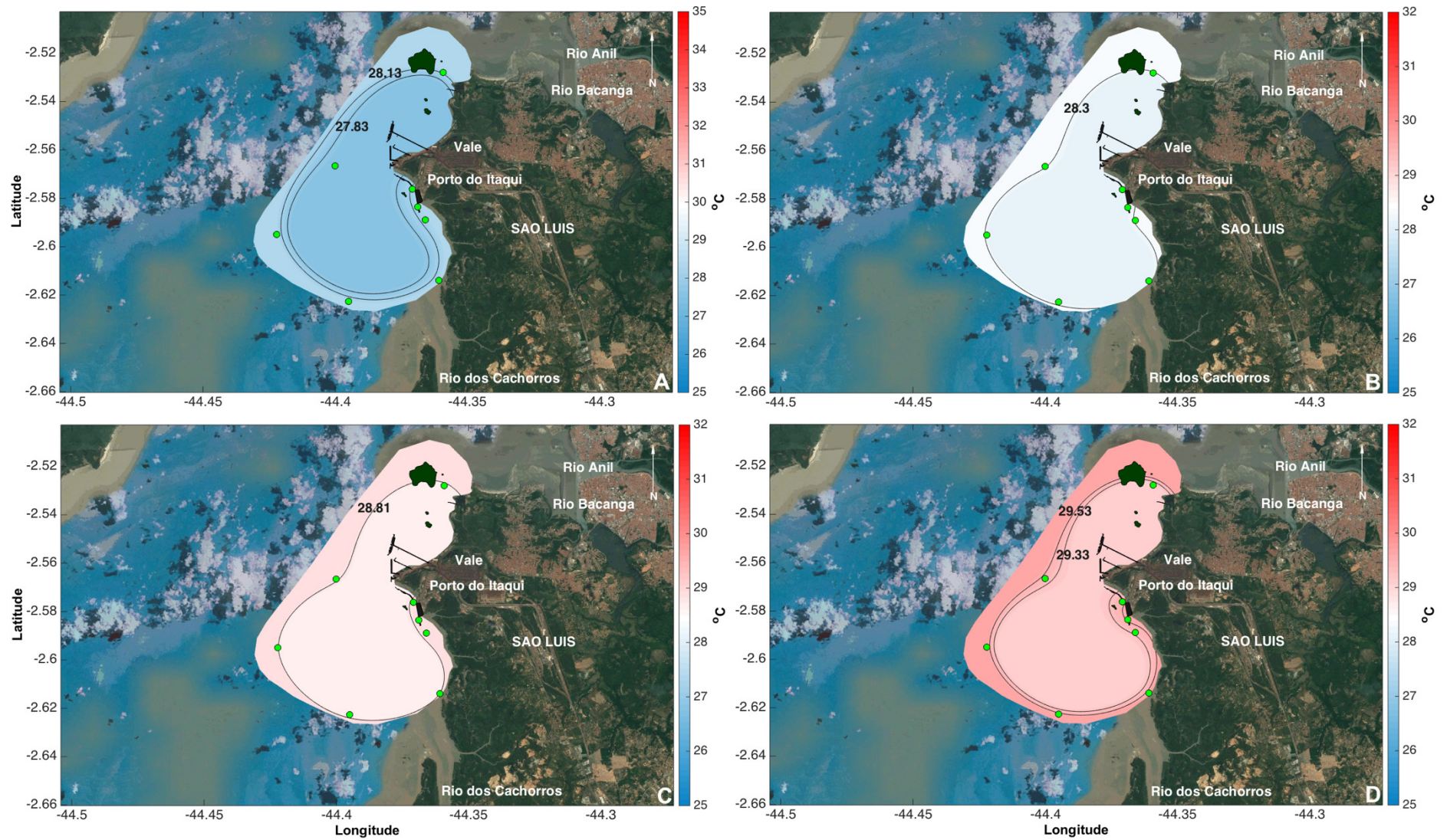
VANDERMEULEN, J.H. Environmental trends in ports and harbours: Implications for planning and management. **Maritime Policy Manag.** 23, 55–66. 1996.

WANG, X.H.; PINARDI, N. Modeling the dynamics of sediment transport and resuspension in the northern Adriatic Sea. **J. Geophys. Res.** 107, 2002. doi:10.1029/2001JC001303.

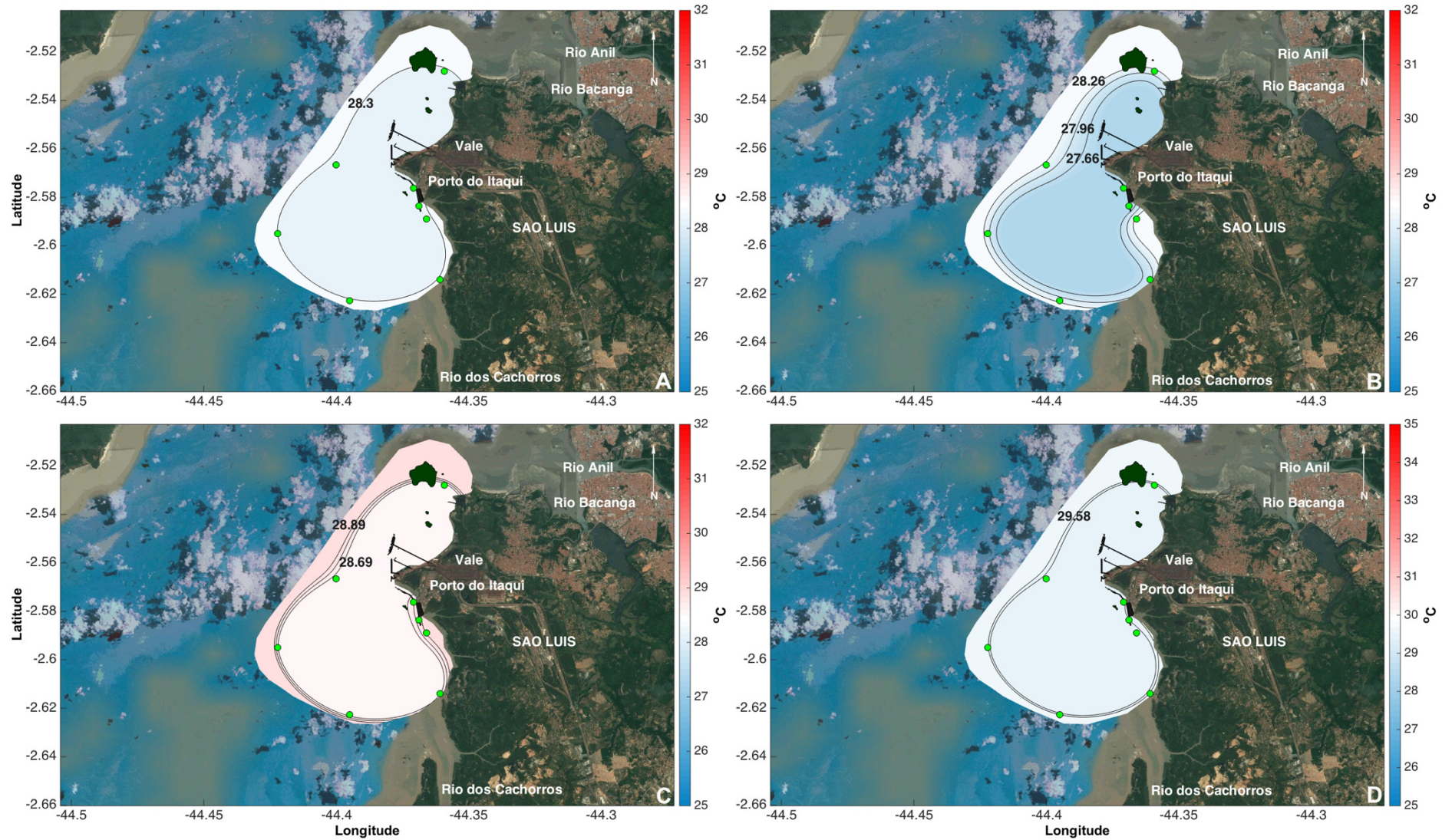
WANG, C.F.; HSU, M.H.; KUO, A.Y. Residence time of the Danshuei river estuary, Taiwan. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. v. 60. 381-393. 2004.

ZHANG, K.; LIU, H.; LI, Y.; XU, H.; SHEN, J.; RHOME, J.; SMITH III, T.J. The role of mangroves in attenuating storm surges. **Estuar. Coast. Shelf Sci.** 102, 11–23. 2012.

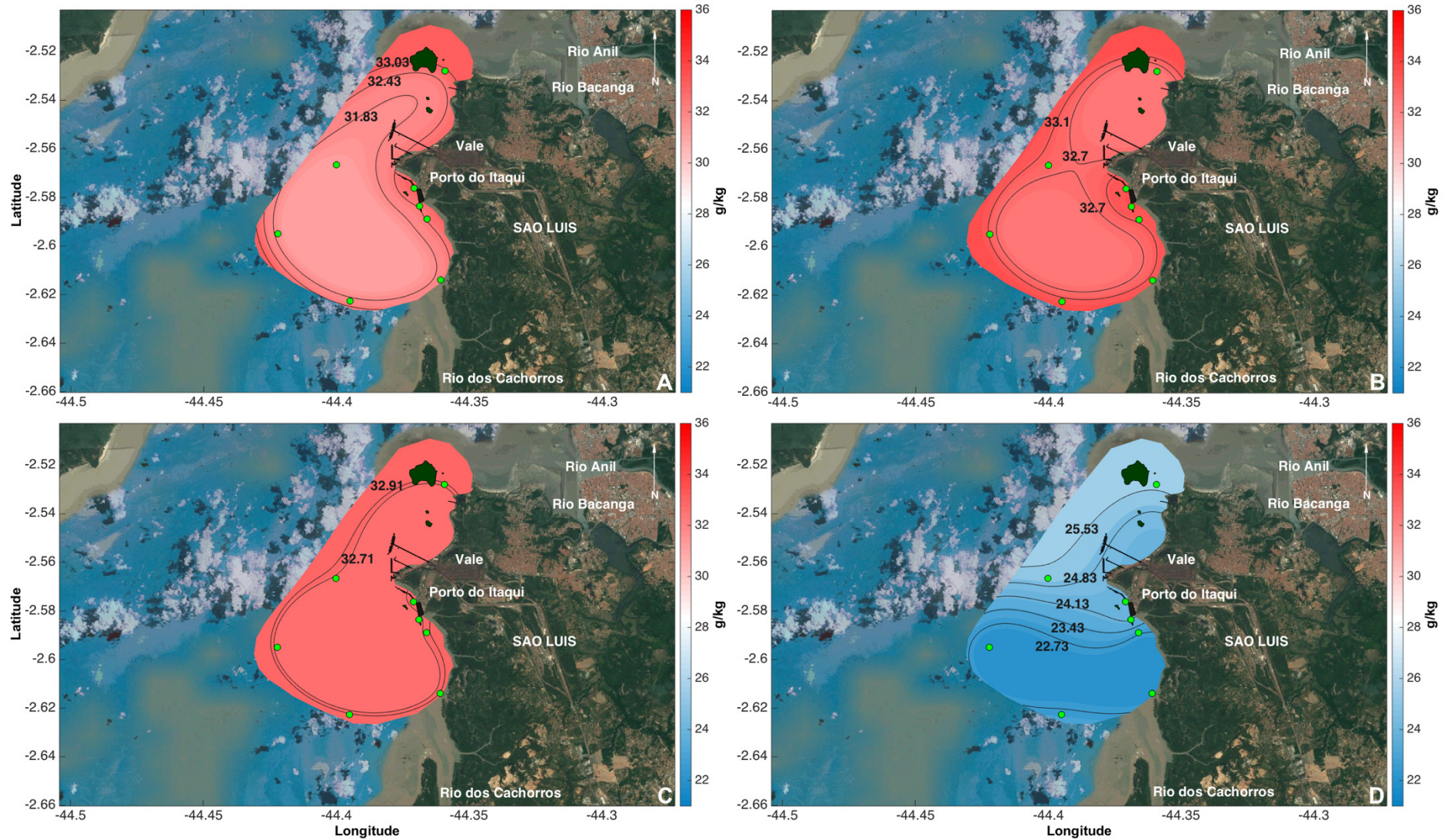
APÊNDICE



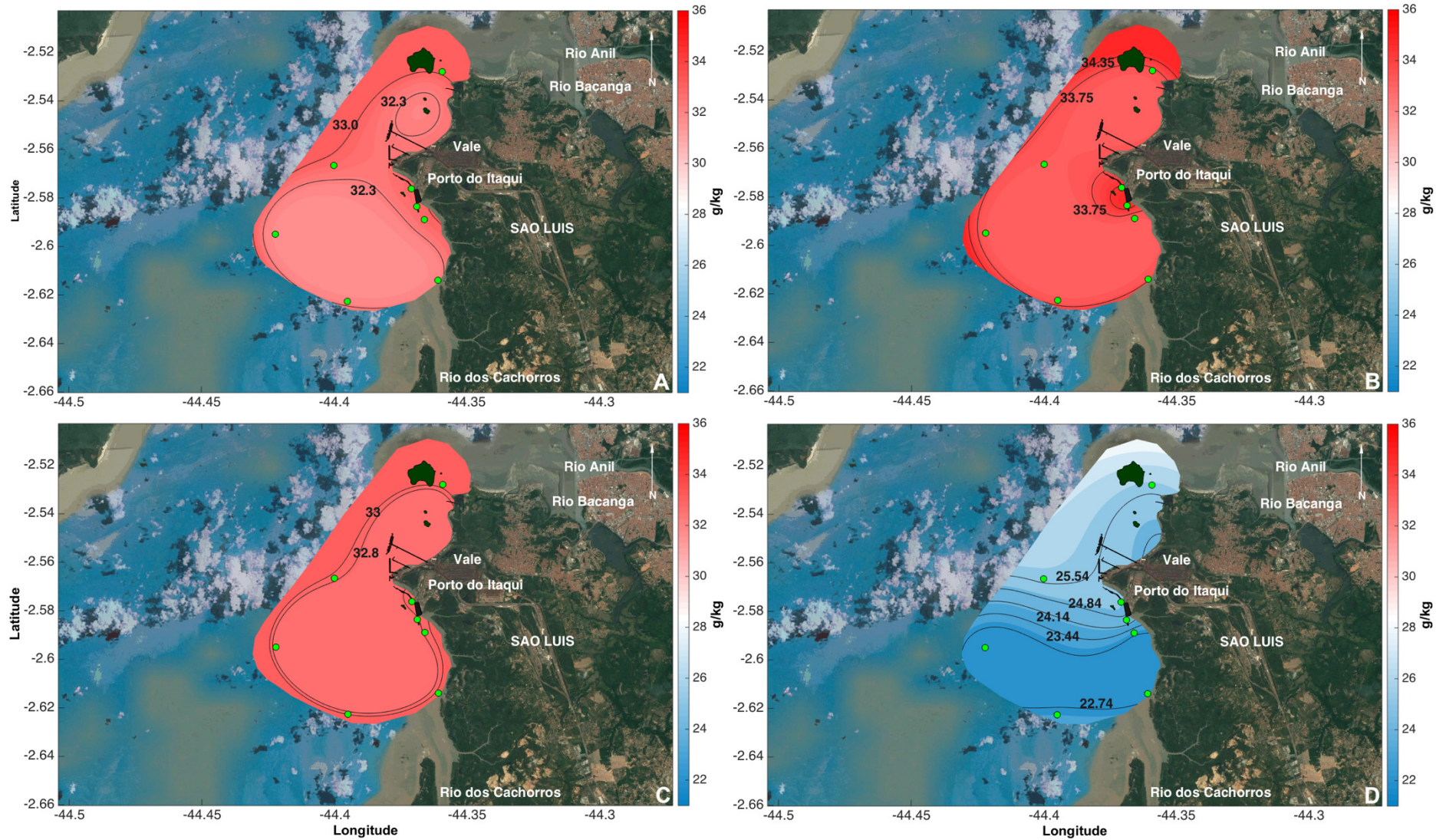
Apêndice 1: Distribuição espacial da temperatura (°C), na superfície, referente a todo o período amostral. Paine A: primeira campanha; Paine B: segunda campanha; Paine C: terceira campanha e Paine D: quarta campanha.



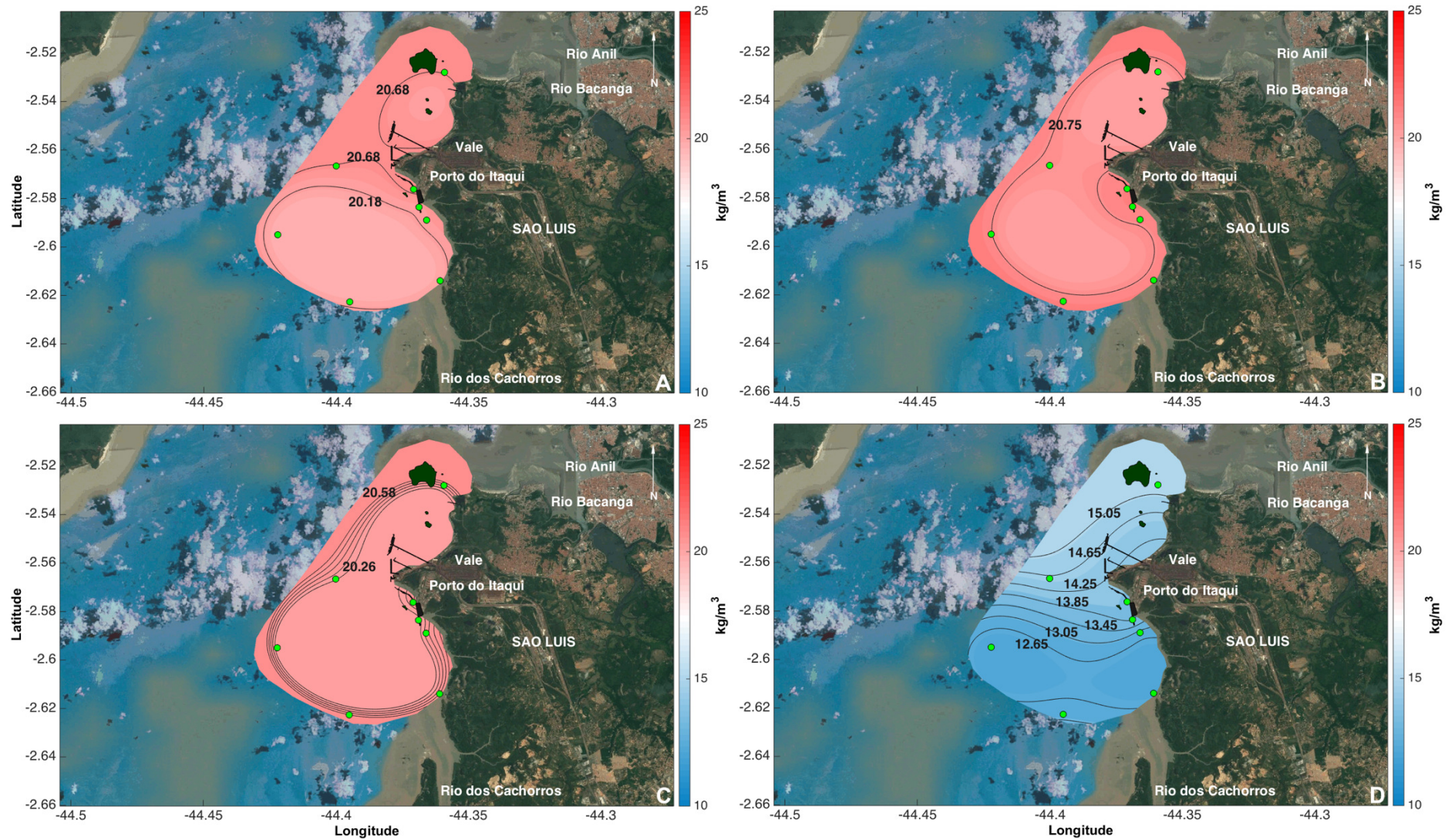
Apêndice 2: Distribuição espacial da temperatura (°C), no fundo, referente a todo o período amostral. Painei A: primeira campanha; Painei B: segunda campanha; Painei C: terceira campanha e Painei D: quarta campanha.



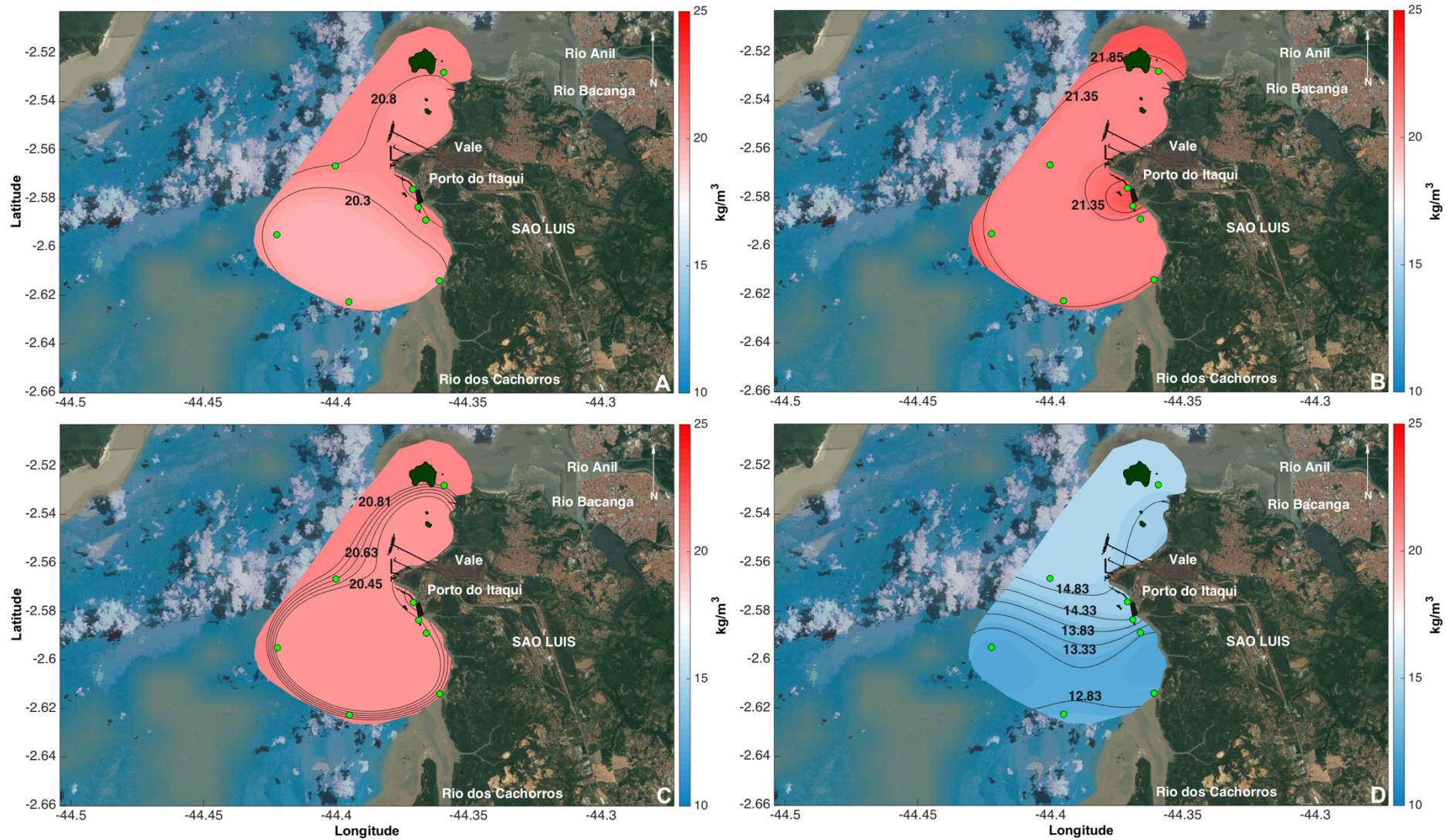
Apêndice 3: Distribuição espacial da salinidade ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), na superfície, referente a todo o período amostral. Painei A: primeira campanha; Painei B: segunda campanha; Painei C: terceira campanha e Painei D: quarta campanha.



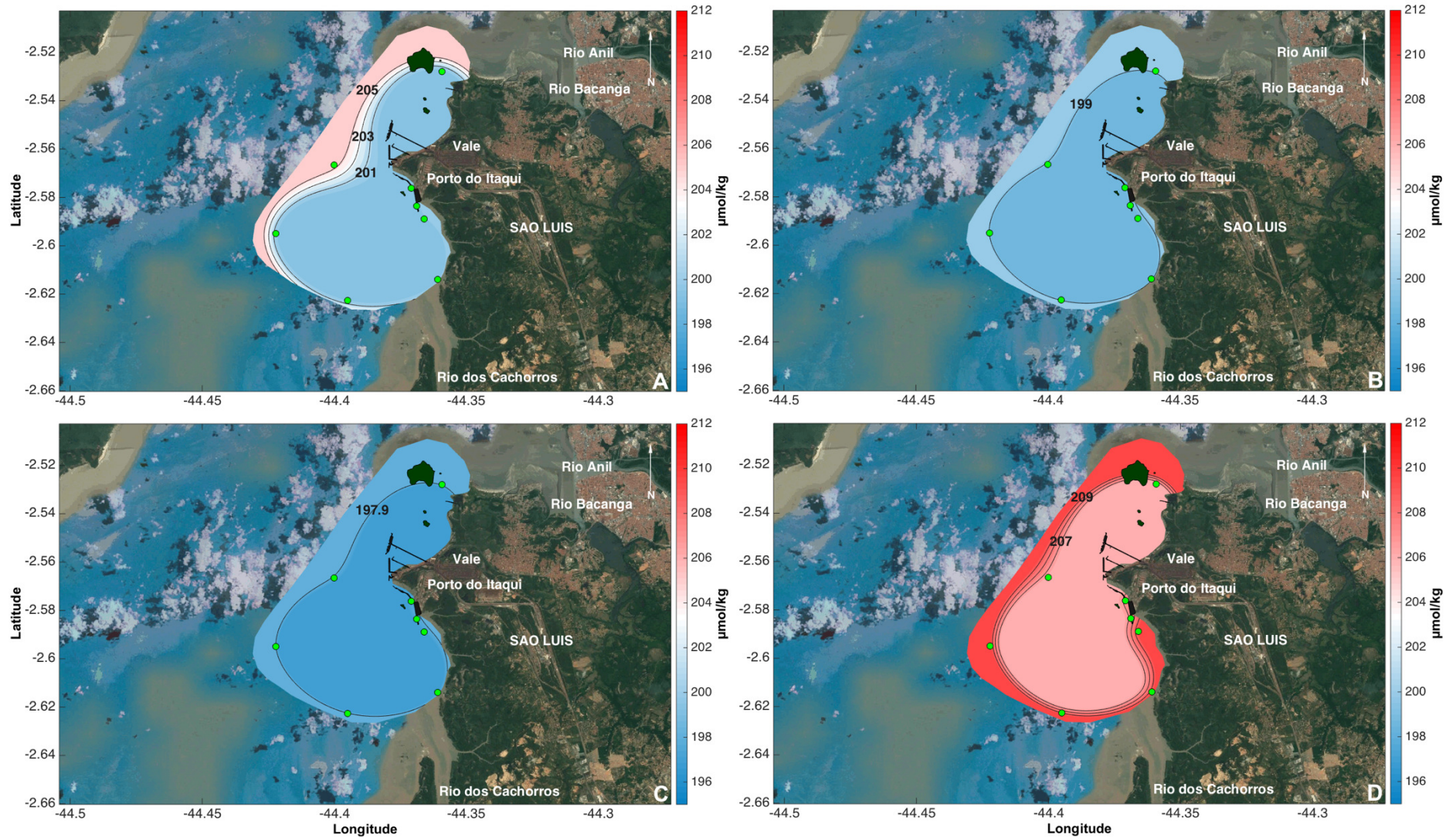
Apêndice 4: Distribuição espacial da salinidade ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), no fundo, referente a todo o período amostral. Painei A: primeira campanha; Painei B: segunda campanha; Painei C: terceira campanha e Painei D: quarta campanha.



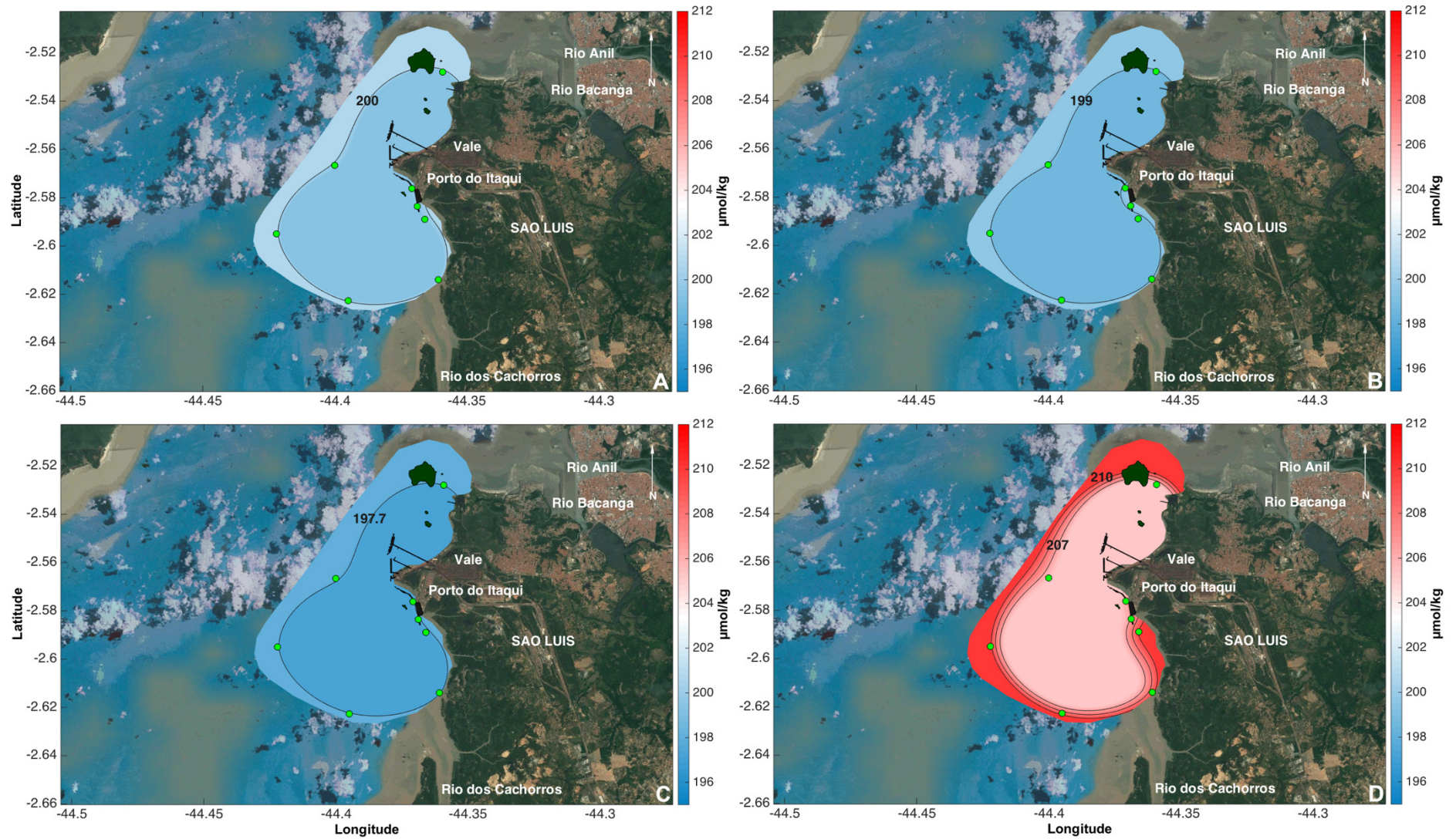
Apêndice 5: Distribuição espacial da densidade (kg.m^{-3}), na superfície, referente a todo o período amostral. Painei A: primeira campanha; Painei B: segunda campanha; Painei C: terceira campanha e Painei D: quarta campanha.



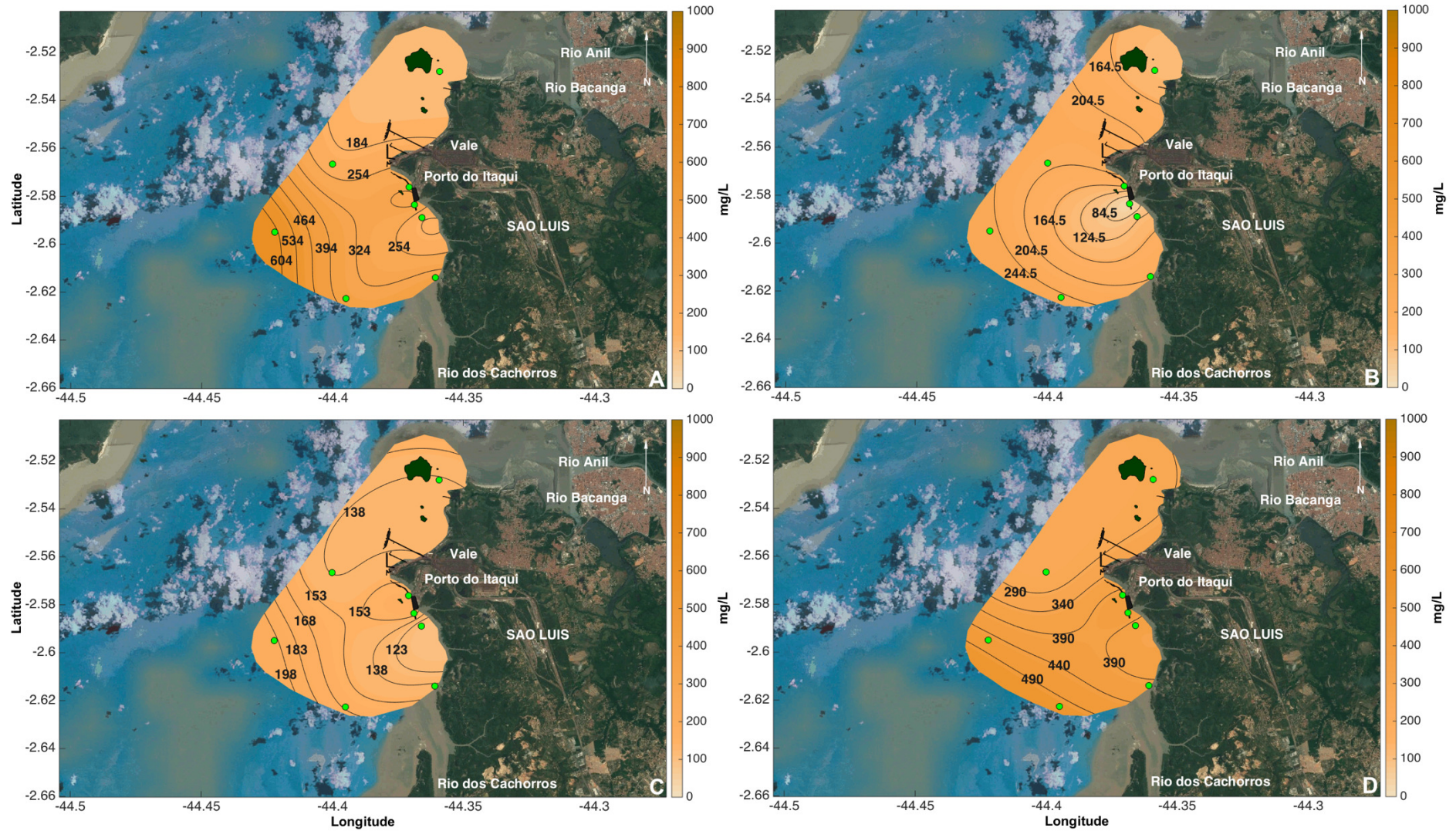
Apêndice 6: Distribuição espacial da densidade (kg.m^{-3}), no fundo, referente a todo o período amostral. Painel A: primeira campanha; Painel B: segunda campanha; Painel C: terceira campanha e Painel D: quarta campanha.



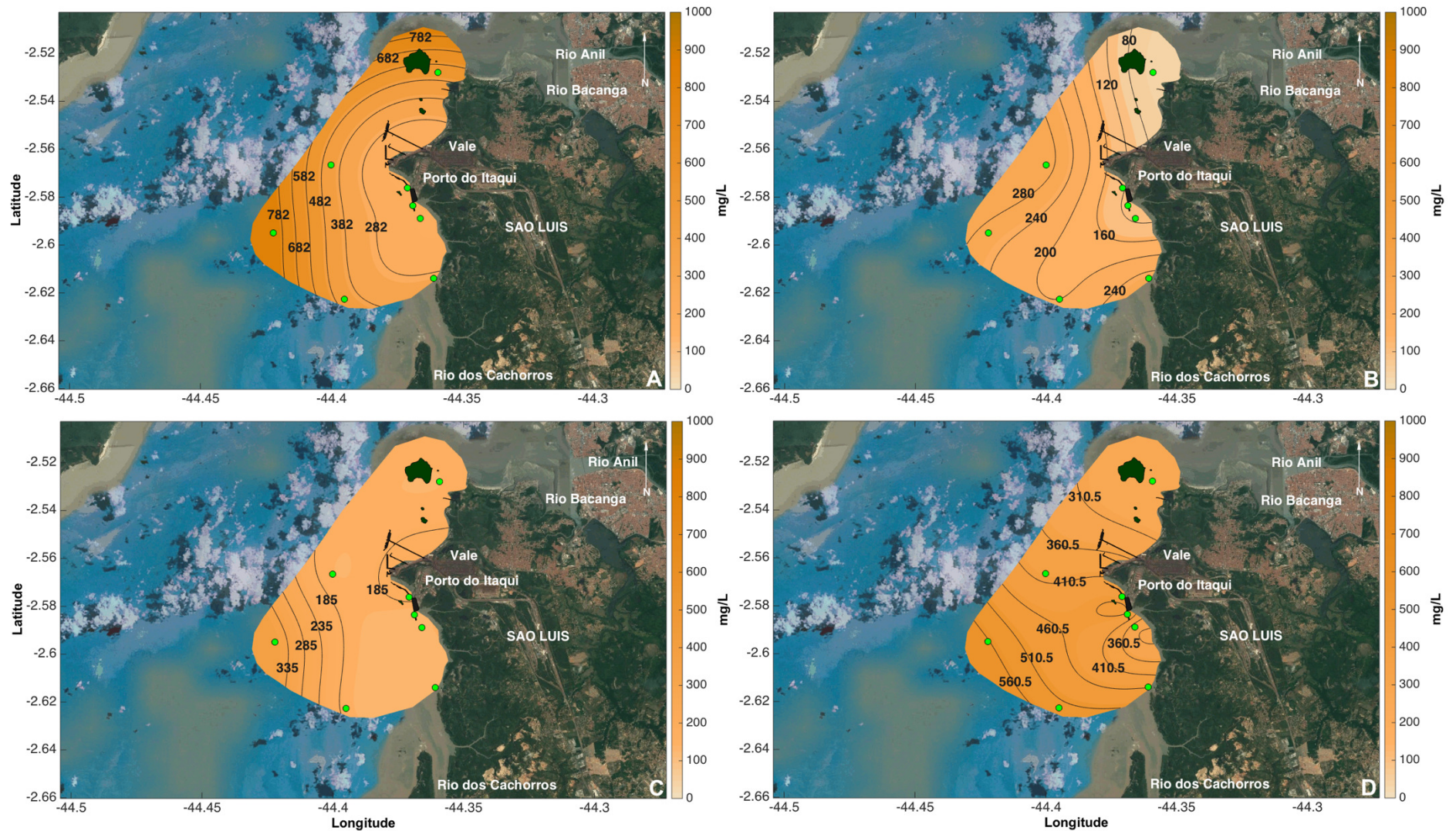
Apêndice 7: Distribuição espacial do oxigênio ($\mu\text{mol.kg}^{-1}$), na superfície, referente a todo o período amostral. Painei A: primeira campanha; Painei B: segunda campanha; Painei C: terceira campanha e Painei D: quarta campanha.



Apêndice 8: Distribuição espacial do oxigênio ($\mu\text{mol.kg}^{-1}$), no fundo, referente a todo o período amostral. Painel A: primeira campanha; Painel B: segunda campanha; Painel C: terceira campanha e Painel D: quarta campanha.



Apêndice 9: Distribuição espacial do MPS (mg.L^{-1}), na superfície, referente a todo o período amostral. Painel A: primeira campanha; Painel B: segunda campanha; Painel C: terceira campanha e Painel D: quarta campanha.



Apêndice 10: Distribuição espacial do MPS (mg.L^{-1}), no fundo, referente a todo o período amostral. Painei A: primeira campanha; Painei B: segunda campanha; Painei C: terceira campanha e Painei D: quarta campanha.