



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TRANSPORTE DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO NO ESTUÁRIO DO RIO PARÁ

Trabalho de conclusão de curso apresentado por:

ADRIEL GUIMARÃES CARNEIRO

Orientador: MSc. Yuri Onça Prestes (UFPA)

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Rollnic (UFPA)

BELÉM

2017



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TRANSPORTE DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO NO ESTUÁRIO DO RIO PARÁ

Trabalho de conclusão de curso apresentado por:

ADRIEL GUIMARÃES CARNEIRO

BELÉM

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Carneiro, Adriel Guimarães, 1995 -

Transporte de sólidos em suspensão no estuário do rio Pará / Adriel
Guimarães Carneiro. – 2017.

xv, 47 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Yuri Onça Prestes

Coorientador: Marcelo Rollnic

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal
do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Oceanografia, Belém,
2017.

1. Estuários - Pará. 2. Turbidez. 3. Oceanografia. 4. Marajó, Ilha do
(PA). I. Título.

CDD 22. ed. 551.4618098115



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA**

TRANSPORTE DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO NO ESTUÁRIO DO RIO PARÁ

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO POR:
ADRIEL GUIMARÃES CARNEIRO**

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Bacharel em OCEANOGRAFIA

Data de Aprovação: 05 de abril de 2017

Conceito: Excelente

Banca Examinadora:

MSc. Yuri Onça Prestes – Orientador
Mestre em Oceanografia – UFPE

Prof. Dr. Marcelo Rollnic – Coorientador
Universidade Federal do Pará – UFPA

Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário – Membro
Universidade Federal do Pará – UFPA

MSc. Maurício da Silva da Costa –
Membro
Mestre em Geologia Marinha – UFPA

Dedico este trabalho ao meu Pai (*in memoriam*)
“O que fazemos em vida ecoa pelo resto da eternidade”
Maximus Décimus Meridius

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Primeiramente ao criador, por ter me dado o privilégio da vida. Por todos os desafios que um dia botou em meu caminho, somente para eu supera-los.

Aos meus familiares, por sempre me apoiarem. A minha mãe, por sempre acreditar e confiar em mim. Ao meu pai, que apesar de não estar mais em corpo presente, suas lições de vida permanecerão para sempre em meus pensamentos. Ao meu irmão, por sempre estar comigo.

À todos os meus amigos, por sempre estarem ao meu lado. Aos amigos da Neide, aos meus amigos de infância, ao grupo de amigos que se encontra uma vez no ano, aos amigos da Cidade Velha, e a galera do sítio do gorilão.

Ao meu mestre e orientador MSc. Yuri Onça Prestes, pela grande amizade e por sempre me indicar o norte: “É leitura mano, tu tem que ler”. Ao professor Marcelo Rollnic, por ter me dado à oportunidade de ingressar no Laboratório de Oceanografia Física (LOF) e trabalhar com a melhor área da oceanografia.

Ao Laboratório de Oceanografia Física (LOF), Laboratório de Geofísica Marinha (GEOFMAR) e Laboratório de Pesquisa em Monitoramento Ambiental Marinho (LAPMAR), pelo suporte técnico.

Ao Professir Nils Asp e ao projeto Pro Amazônia, responsável pelo fomento as duas campanhas oceanográficas realizadas para o presente trabalho.

Aos atuais e aos antigos membros do LOF, GEOFMAR/LAPMAR, em especial ao Maurício Costa, Renan Rosário, Artur Santos e Thais Borba, pelas inúmeras lições ensinadas, e ao companheirismo do Leandro, Gabi, Pâmela, Carol, Kevin, Cláudia e Rayssa.

Aos membros da banca, por gentilmente aceitarem o convite para participar da mesma.

E em especial ao meu pai (*in memorian*). Por me ensinar que o melhor caminho quase nunca é o mais fácil, ou o mais bonito, mas que no fim sempre é o que vale mais a pena.

RESUMO

Este trabalho tem como foco quantificar as concentrações de sólidos em suspensão (C_{SLS}) e o transporte de sólidos em suspensão (T_{SLS}), ao longo da zona de mistura de um estuário amazônico dominado por maré. O Estuário do Rio Pará (ERP) localiza-se ao leste da Ilha de Marajó e recebe a descarga do Rio Tocantins, Pará e outros afluentes. Foram realizadas duas campanhas oceanográficas para a coleta de Material Particulado em Suspensão (MPS) e turbidez. Amostras horárias próximas ao fundo e em superfície foram coletadas ao longo de um período de maré semidiurno em quatro pontos do estuário, divididos em duas campanhas, referentes ao período seco e chuvoso. A determinação da C_{SLS} foi realizada através da correlação linear entre o MPS e turbidez (obtida através de um sensor ótico). Os resultados obtidos indicam uma diferenciação lateral do ERP. A margem direita exportou sólidos em suspensão para o oceano adjacente, enquanto a margem esquerda importou. O T_{SLS} na margem direita foi mais acentuado em camadas de fundo, e a lutoclina foi estimada em profundidades mais rasas. Na margem esquerda o T_{SLS} não apresentou diferenças significativas entre as camadas e a lutoclina foi mais profunda, em ambos os períodos sazonais. A correlação entre as C_{SLS} de fundo e ao longo da coluna d'água, foi maior na margem esquerda. Indicando que cerca de 80% da C_{SLS} nessa margem é proveniente da ressuspensão do material depositado no substrato. O ERP foi classificado como lateralmente bidirecional. A margem esquerda como verticalmente misturada e a margem direita como verticalmente estratificada.

Palavras-chave: Material Particulado em Suspensão (MPS). Turbidez. Lutoclina. Ressuspensão. Regressão linear. Baía do Marajó.

ABSTRACT

The focus of this work is to quantify suspended solids concentrations (C_{SLS}) and suspended solids transport (T_{SLS}) along the mixing zone of a tidal dominated Amazonian estuary. The Pará River Estuary (ERP) is located south of Marajó Island and receives discharge from the Tocantins River, Pará and other tributaries. Two oceanographic campaigns were conducted to collect suspended particulate matter (SPM) and turbidity. During a semidiurnal tide cycle, hourly bottom and surface samples were collected at four points in the estuary, for the dry and rainy period. C_{SLS} determination was performed by linear correlation between SPM and turbidity. The results obtained indicate a lateral differentiation of ERP. The right margin exported solids in suspension to the adjacent seaward, while the left margin imported. T_{SLS} on the right margin was more accentuated in the bottom layers, and lutoclin was observed at shallower depths. In the left margin, the T_{SLS} did not present significant differences between the layers, and the lutoclin was deeper, in the dry and rainy period. The correlation between the bottom C_{SLS} and along the water column was higher in the left margin. Indicating that about 80% of the C_{SLS} in this margin comes from the resuspension of the material deposited in the substrate. The ERP was classified as bidirectional laterally. The left margin as vertically mixed and the right margin as vertically stratified.

Keywords: Suspended Particulate Matter (SPM). Turbidity. Lutoclin. Resuspension. Regression linear. Marajó Bay.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Mapa da área de estudo. São apresentados o Estuário do Rio Pará juntamente ao quatro pontos de coleta. MD1 (margem direita 1); ME1 (margem esquerda 1); MD2 (margem esquerda 2); ME2 (margem esquerda 2). São exibidos também alguns tributários adjacentes, como os os Rios Tocantins e Pará, o Estreito de Breves, a Baía das Bocas, todo o complexo dos Rios Acará, Moju, Guamá e Capim, além da foz do Rio Amazonas. 6
- Figura 2 – Carta batimétrica do Estuário do Rio Pará. A) Imagem bidimensional do ambiente, evidenciando valores de profundidade. B) Imagem tridimensional do ambiente, evidenciando a forma morfológica do estuário..... 7
- Figura 3 – Normal climatológica para a margem direita e margem esquerda do Estuário do Rio Pará, considerando a precipitação média de cada mês de 1982 a 2016..... 8
- Figura 4 – Classificação do ERP e ambientes adjacentes em: i) Zona Costeira; ii) Zona de Mistura; e iii) Zona de Rio. Conforme as definições proposta por Kjerfve. 9
- Figura 5 – Imagem ilustrativa da posição dos pontos amostrais de fundeio no ERP. O perfil batimétrico foi realizado a partir da carta náutica 303 da DHN. 10
- Figura 6 – Modelo gerado através da regressão linear entre Turbidez (FTU) no eixo X, e a Concentração de MPS no eixo Y. A equação $C_{SLS}(REO_{FTU}) = 0,3974(REO_{FTU}) - 7,065$ do primeiro grau foi gerada através da correlação entre as propriedades, e o valor de r^2 representa a confiabilidade da correlação (cerca de 80%). 13
- Figura 7 – Concentração de MPS em função da variação de nível causada pela maré referente ao período seco. Barras em vermelho representam amostras coletadas próximas ao fundo, e as barras em azul as coletadas em superfície. No eixo y as concentrações de MPS e o nível da maré em função do número de amostragens, no eixo x. 18

- Figura 8 – Concentração de MPS em função da variação de nível causada pela maré referente ao período chuvoso. Barras em vermelho representam amostras coletadas próximas ao fundo, e as barras em azul as coletadas em superfície. No eixo y as concentrações de MPS e o nível da maré em função do número de amostragens, no eixo x. 19
- Figura 9 – Variações da turbidez ao longo da estrutura vertical em um ciclo de maré semidiurno, para o período seco. Cores "quentes" como o vermelho representa os maiores valores de FTU, enquanto cores "frias" como o azul representam os menores valores. 21
- Figura 10 – Variações da turbidez ao longo da estrutura vertical em um ciclo de maré semidiurna, para o período chuvoso. Cores "quentes" como o vermelho representa os maiores valores de FTU, enquanto cores "frias" como o azul representam os menores valores. 22
- Figura 11 – Variações na estrutura vertical da C_{SLS} ao longo de um ciclo de maré semidiurno, referente ao período seco. A) e B) pontos externos, ME2 e MD2 respectivamente; C) e D) pontos internos, ME1 e MD1, respectivamente. 25
- Figura 12 – Variações na estrutura vertical da C_{SLS} ao longo de um ciclo de maré semidiurno, referente ao período chuvoso. A) e B) pontos externos, ME2 e MD2 respectivamente; C) e D) pontos internos, ME1 e MD1, respectivamente. 26
- Figura 13 – Perfis verticais residuais da C_{SLS} , para o período seco (linhas pretas) e chuvoso (linhas cinzas)..... 27
- Figura 14 – Médias espaciais dos perfis verticais da C_{SLS} para os períodos seco (linhas pretas) e chuvoso (linhas cinzas). 28
- Figura 15 – Balanço dos $\langle TSL \rangle$ ao longo do período seco e chuvoso para as margem do ERP. MD e ME referenrete as margens direitas e esquerdas, respectivamente. ... 30

Figura 16 – Esquema representativo para o Transporte de sólidos em suspensão (T_{SLS}) e o transporte de sólidos em suspensão ao longo de um ciclo de maré semidiurno (Transp) em camadas de próximas ao fundo e superfície, para ambos os períodos sazonais; setas à esquerda simbolizam o transporte da propriedade em direção a montante do estuário (continente), e setas a direita referentes ao transporte da propriedade em direção a jusante do sistema estuarino (oceano)..... 35

Figura 17 –Regressão linear entre a ($C_{SLS(F)}$) com (**CSLS**) para o período seco, e seus respectivos r^2 37

Figura 18 – Correlação linear entre a ($C_{SLS(F)}$) com (**CSLS**) para o período chuvoso, e seus respectivos r^2 38

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Valores máximos, médios e mínimos aproximados das concentrações de MPS dos quatro pontos amostrais, obtidas no período seco e chuvoso. 17
- Tabela 2 – Somatório das concentrações de MPS, considerando as amostras de fundo e superfície ao longo de um ciclo de maré semidiurno, para cada ponto amostral, referente ao período seco e chuvoso. Além dos valores totais das concentrações para cada campanha..... 17
- Tabela 3 – Valores máximos, médios, mínimos e desvio padrão aproximados referente a turbidez dos quatro pontos amostrais, para o período seco e chuvoso..... 20
- Tabela 4 – Concentrações máximas, mínimas e médias dos sólidos em suspensão, referente aos períodos seco e chuvoso e para os quatro pontos amostrais. 23
- Tabela 5 – Somatório das C_{SLS} considerando sua distribuição vertical na coluna d'água, ao longo de um ciclo de maré semidiurno, a C_{SLS} total obtida em cada período sazonal 24

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA – Agencia Nacional das Águas

ANTAQ – Agência Nacional dos Transportes Aquaviários

ERP – Estuário do Rio Pará

FTU – *Formazine Turbidity Unit*

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

MPS – Material Particulado em Suspensão

SLS – Sólidos em Suspensão

ZC – Zona Costeira

ZCA – Zona Costeira Amazônica

ZCEP – Zona Costeira Estuarina Paraense

ZR – Zona de Maré do Rio

ZM – Zona de Mistura

LISTA DE SIMBOLOS

C_{SLS} – Concentração de Sólidos em Suspensão

$\overline{C_{SLS}}$ – Média espacial da Concentração de Sólidos em Suspensão

$\langle C_{SLS(z)} \rangle$ – Residual da estrutura vertical das concentração de sólidos em suspensão

$\langle \overline{C_{SLS}} \rangle$ – Residual das Concentrações de Sólidos em Suspensão

$C_{SLS(F)}$ – Concentração de Sólidos em Suspensão em camadas de fundo

T_{SLS} – Transporte de Sólidos em Suspensão

$\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ – Residual do Transporte de Sólidos em Suspensão

$\langle \overline{T_{SLS(F)}} \rangle$ – Residual do Transporte de Sólidos em Suspensão em camadas de fundo

$\langle \overline{T_{SLS(S)}} \rangle$ – Residual do Transporte de Sólidos em Suspensão em camadas de superfície

u – Componente u da velocidade

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS	xii
LISTA DE SIMBOLOS	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ASPECTOS GERAIS	1
1.2 JUSTIFICATIVA	2
1.3 DEFINIÇÕES DOS PARÂMETROS FÍSICOS	3
1.4 OBJETIVOS	4
1.4.1 Objetivo geral	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
2 MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1 ÁREA DE ESTUDO	5
2.1.1 Geomorfologia	6
2.1.2 Clima	7
2.1.3 Aspectos oceanográficos	8
2.2 AQUISIÇÃO DE DADOS	9
2.3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE	10
2.3.1 Material particulado em suspensão (MPS)	10
2.3.2 Turbidez	11

2.3.3	Sólidos em Suspensão (SLS)	12
2.3.3.1	Concentração de sólidos em suspensão (C_{SLS})	12
2.3.3.2	Transporte de sólidos em suspensão (T_{SLS})	14
3	RESULTADOS	16
3.1	MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS).....	16
3.2	TURBIDEZ	19
3.3	CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO (C_{SLS})	22
4	DISCUSSÕES	29
4.1	TRANSPORTE RESIDUAL DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO	29
4.2	TRANSPORTE DAS CAMADAS SUPERFICIAIS E DE FUNDO	33
4.3	DIFERENCIAÇÃO LATERAL NO TRANSPORTE DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO	36
5	CONCLUSÕES	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Os presente trabalho foi realizado como parte do projeto “Pro-Amazônia: Biodiversidade e Sustentabilidade”, fomentado pela CAPES – CNPq. Duas campanhas foram realizadas, uma no período chuvoso e outra referente ao período seco.

Pela primeira vez no Estuário do Rio Pará foi estimado o transporte e a concentração de sólidos em suspensão ao longo da sua zona de mistura. O transporte de fundo e de superfície foi determinado considerando as profundidades médias limites da lutoclina. A correlação das concentrações de sólidos em suspensão em camadas de fundos e superficiais foram utilizadas para determinar a ressuspensão do material depositado no leito.

1.1 ASPECTOS GERAIS

Estuários podem ser definidos de inúmeras maneiras. Seus diversos conceitos se baseiam nas variáveis que estão ou serão analisadas. Há mais de quarenta definições diferentes, indo desde as encontradas em enciclopédias e em dicionários até a definições físicas, geológicas, químicas e ecológicas (Perillo 1995).

Cameron & Pritchard (1963) e Dyer (1997), definiram um estuário como um corpo de água costeiro semifechado, com ligação livre com o oceano aberto, que se estende ao longo do rio até o limite de influência da maré, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental.

Kjerfve (1987) propôs que: “São ambientes costeiro que apresentam conexão restrita com o oceano adjacente, sendo que tal conexão pode ser eventualmente aberta”. Esta definição foi baseada em características físico-químicas desses ambientes, portanto, é a que será utilizada no presente trabalho. Os sistemas estuarinos foram segmentados em três zonas distintas: i) Zona de Maré do Rio (ZR) – parte fluvial com salinidade praticamente igual a zero, mas ainda sujeita aos fluxos bidirecionais oriundos da propagação da maré; ii) Zona de Mistura (ZM) – região onde ocorre a mistura da água doce proveniente da drenagem continental com a água do mar; iii) Zona Costeira (ZC) – região costeira adjacente que se estende até a frente da pluma estuarina, o que delimita a Camada Limite Costeira (CLC).

Na região Amazônica, os estuários são ambientes particularmente complexos e dinâmicos, influenciados pela sazonalidade climática relacionada com as descargas hídrica e sólida oriundas da drenagem continental, bem como a ação de correntes de marés e ventos predominantemente de leste (Aveline 1980). Devido a essas características, os sistemas estuarinos da região amazônica apresentam um grande aporte de sólidos em suspensão (SLS) para o oceano adjacente.

Há inúmeros fatores naturais e antrópicos que contribuem para que partículas estejam em suspensão em regiões estuarinas, como influencia fluvial e eólico, assim como erosão da costa, pluviometria, dragagem do substrato e atividade pesqueira (Pathitis & Collins 2005). A intensidade desses fatores determina a concentração de sólidos que é transportado em suspensão.

Neste contexto, o foco do presente trabalho é avaliar e quantificar as concentrações de sólidos em suspensão (C_{SLS}), e o transporte de sólidos em suspensão (T_{SLS}) ao longo da zona de mistura de um estuário amazônico dominado por maré (Estuário do Rio Pará - ERP). Perfis verticais e longitudinais de SLS serão analisados de acordo com as variabilidades sazonais ao longo de um ciclo de maré semidiurno, em quatro pontos do sistema estuarino.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os ambientes estuarinos possuem altas concentrações de nutrientes e grande importância na produtividade primária. Servem de habitat natural para diversas espécies de peixes, mamíferos e aves. Representam ainda local de desova para inúmeras espécies de peixe de valor comercial e de rota de aves migratórias (Moraes 2007).

Além da grande relevância ecológica há também atividades econômicas relacionadas que são constantemente desenvolvidas nesses ambientes como: tráfego de embarcações, indústria pesqueira, construção civil, exploração de recursos naturais e a presença de portos. Devido a essa importância econômica significativa e a crescente expansão populacional das cidades litorâneas, tais atividades podem colocar em risco o desenvolvimento sustentável nos estuários, com grande potencial de impactos em eventuais acidentes. A ocupação desordenada, a utilização dos estuários como corpo receptor de efluentes naturais, industriais e substâncias patogênicas, além da falta de

gerenciamento eficaz, são alguns exemplos da ineficiente dos planos de gerenciamento costeiro aplicada aos sistemas estuarinos (Moraes 2007).

Cada estuário apresenta particularidades quanto a sua morfologia de fundo, regimes de maré e descarga fluvial, além de outros fatores como regime de ondas e ventos (Schettini 2001). Neste contexto, fazendo parte da Zona Costeira Amazônica (ZCA) se encontra a Zona Costeira Estuarina Paraense (ZCEP), com uma extensão de cerca de 1.200 km e sendo subdividida em três setores: i) Costa Atlântica do Salgado Paraense; ii) Insular Estuarino; iii) Continental Estuarino. Segundo El-Robrini (2006) essa região é toda influenciada por um regime de maré que varia de meso a macromaré, além de está sujeita a elevada pluviosidade (2.500 mm/ano) e ventos com intensidade de $5,6 \text{ ms}^{-1}$ a $6,56 \text{ ms}^{-1}$ com direção preferencial de NE.

A geomorfologia costeira e estuarina é influenciada em grande parte pela C_{SLS} no ambiente, proveniente de processos deposicionais e erosivos, o que tem grande impacto no que tange o setor de transporte marítimo e fluvial. Um exemplo regional é o porto de Belém, localizado cerca de 120 km de distância do Oceano Atlântico, sendo o principal meio de acesso para embarcações de grande porte para a região interiorana do estado do Pará (ANTAQ 2010). Devido ao grande aporte de sólidos em suspensão para a região, dragagens periódicas são necessárias para o total funcionamento do porto. Portanto, para que possa subsidiar qualquer tipo de atividade que venha a ocorrer na região é necessário levantar informações de cunho científico sobre o tema.

1.3 DEFINIÇÕES DOS PARÂMETROS FÍSICOS

O Material Particulado em Suspensão (MPS) é definido como toda partícula presente na água com tamanho superior a $45 \mu\text{m}$ e é constituído de duas parcelas, sendo uma orgânica e outra mineral (Ávila 2013, Mantovanelli 1999). A turbidez pode ser conceituada como todo grau de atenuação que um feixe de luz exhibe ao atravessar determinado espaço na coluna d'água, podendo ser absorvida ou retroespalhada (Costa 2014, Mantovanelli 1999).

De forma geral, as partículas responsáveis por proporcionar maior turbidez à água são maiores que o comprimento de luz branca, devido à presença de sólidos em suspensão, tais como de origem inorgânicas, como areia, silte e argila, e orgânicas em

geral, como detritos de algas e bactérias (Mobley 1995). Em águas costeiras e estuarinas, o retroespalhamento óptico (REO) do feixe de luz ocorre devido a sua interação com partículas opticamente ativas em suspensão, através de processos como difração, refração e reflexão (Mobley 1995).

O transporte desse material em suspensão nos estuários é controlado por fatores como a granulometria do sedimento, a intensidade das correntes, processos difusivos e advectivos, além da forma de leito e do aporte desses sólidos em suspensão para o ambiente (Nittouer & Wright 1994). Não há na literatura científica um conceito definido para SLS. Contudo, para a determinação desse parâmetro utilizou-se uma correlação entre MPS e turbidez. Dessa forma SLS pode ser conceituado como toda partícula em estado sólido, não dissolvida, suspensa na coluna d'água, capaz de causar alterações nos feixes de luz retroespalhados na água e é quantificado indiretamente, através do método da regressão linear.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 **Objetivo geral**

Quantificar e analisar o T_{SLS} e a C_{SLS} na zona de mistura de um estuário amazônico dominado por maré (ERP) e sua possível relação com a sazonalidade climática e oscilação semidiurna da maré.

1.4.2 **Objetivos específicos**

- Investigar se há ocorrência de diferenciação lateral no T_{SLS} e C_{SLS} no ERP.
- Identificar as C_{SLS} e o T_{SLS} em camadas próximas ao fundo e superficiais e verificar se há a ocorrência da lutoclina.
- Avaliar se há C_{SLS} proveniente da ressuspensão do material depositado no substrato.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo apresenta a área de estudo, descrita conforme seus aspectos geomorfológicos, climáticos e oceanográficos. Além dos métodos de coleta de MPS e turbidez e o processamento de dados utilizado para quantificar as propriedades. Exibe também a correlação linear usada para quantificar as C_{SLS} e as equações usadas nos cálculos do T_{SLS} .

2.1 ÁREA DE ESTUDO

Fazendo parte da região amazônica, localiza-se o ERP, que possui mais de 300 km de extensão longitudinal e com cerca de 50 – 40 km de distância entre suas margens na desembocadura (Prestes 2016). Localizado entre os setores da costa atlântica do salgado paraense e o insular estuarino, o ERP encontra-se ao sul e estende-se para leste da Ilha de Marajó (Silva 2009). Recebe a descarga do Rio Tocantins, rio Pará e outros afluentes, como sistema formado pelos rios Moju, Acará e Guamá e parte da descarga do Rio Amazonas, através do estreito de Breves (Costa 2014, Prestes 2016).

A região de estudo está situada a aproximadamente 60 km de distância da foz e possui um regime de mesomare semidiurna (Prestes *et al.* 2014). Com uma variabilidade sazonal de dezenas de milhares de m^3s^{-1} , o que muda de acordo com o período chuvoso, ou o período seco, (Prestes 2016). Em termos regionais a parte terminal do ERP, na região que banha o leste Ilha do Marajó, também é conhecida como Baía do Marajó. Entretanto, para os fins deste trabalho a terminologia adotada e que será utilizada ao longo do texto será de Estuário do Rio Pará – ERP (Figura 1).

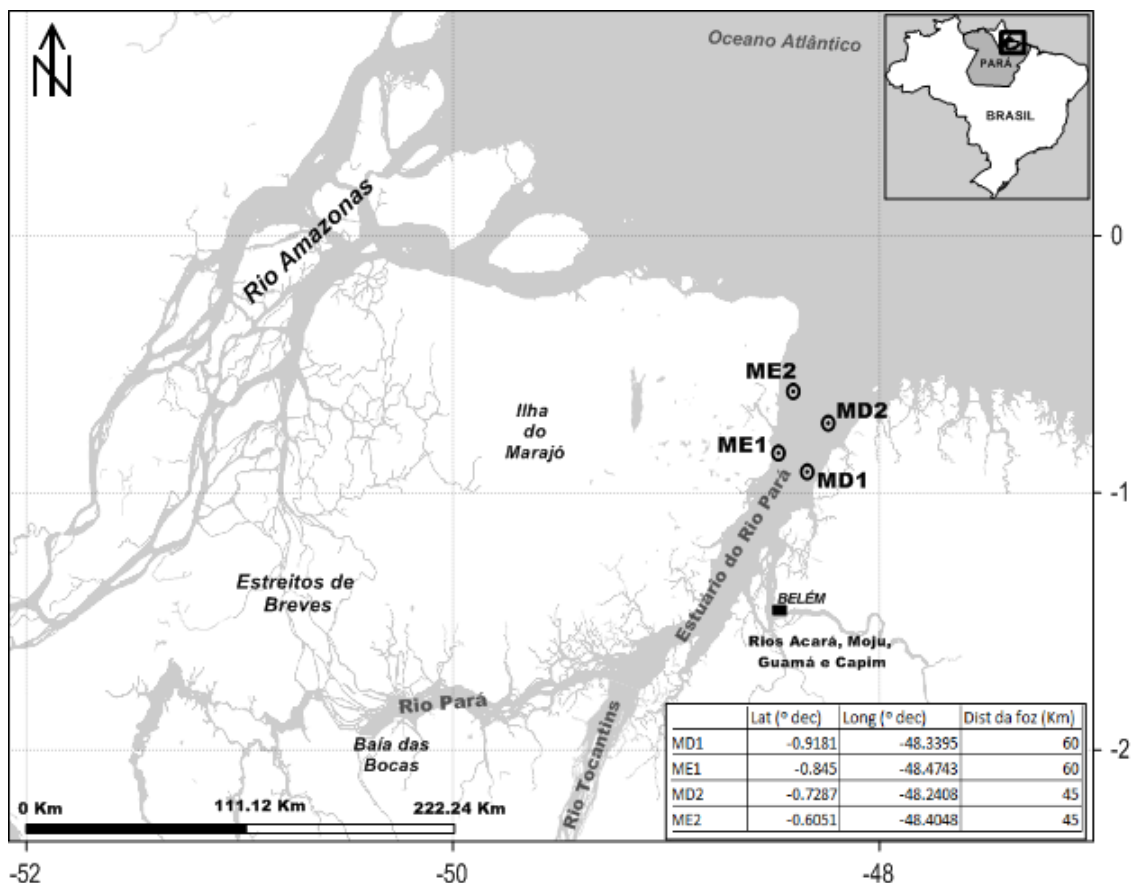


Figura 1 – Mapa da área de estudo. São apresentados o Estuário do Rio Pará juntamente com quatro pontos de coleta. MD1 (margem direita 1); ME1 (margem esquerda 1); MD2 (margem esquerda 2); ME2 (margem esquerda 2). São exibidos também alguns tributários adjacentes, como os Rios Tocantins e Pará, o Estreito de Breves, a Baía das Bocas, todo o complexo dos Rios Acará, Moju, Guamá e Capim, além da foz do Rio Amazonas.

Fonte: Do autor.

2.1.1 Geomorfologia

A figura 2A e 2B exibe uma imagem bidimensional e tridimensional do estuário, respectivamente, a primeira evidenciando valores de profundidade e a segunda à forma tridimensional do ERP. Segundo Batista (2013), em ME2, o perfil batimétrico indica um canal com uma profundidade média de 10 m, com a presença de um banco mais a leste do estuário com profundidade de 5 m, e posterior aumento gradual até atingir o valor de 16 m. Em MD2 há um banco com profundidade média de 7 metros, que sofre um aumento gradual mais a oeste atingindo valores de 21 metros.

O ponto ME1 exibe primeiramente a feição de largo canal, ocupando aproximadamente 10 Km do perfil longitudinal e com uma profundidade média de 10

m. Em MD1 observa-se um aumento gradual da profundidade para oeste do estuário, até atingir um máximo de 20 metros.

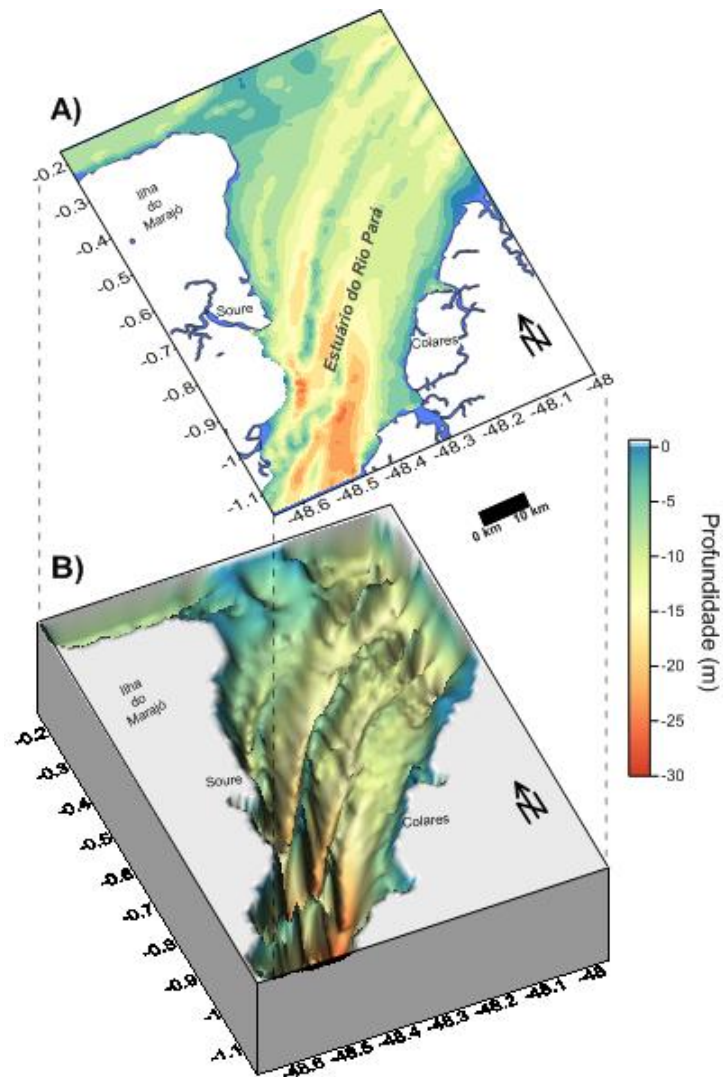


Figura 2 – Carta batimétrica do Estuário do Rio Pará. A) Imagem bidimensional do ambiente, evidenciando valores de profundidade. B) Imagem tridimensional do ambiente, evidenciando a forma morfológica do estuário.

Fonte: Do autor.

2.1.2 Clima

A região é dividida em dois períodos distintos do ano quanto a sua pluviosidade. De dezembro a junho verifica-se os maiores índices pluviométricos (período chuvoso) enquanto que de julho a dezembro esses valores são reduzidos (período seco). Cerca de 73% do total de chuva podem estar presente apenas nos meses de janeiro a abril,

enquanto setembro, outubro e novembro são especialmente mais secos (Moraes *et al.* 2005, El-Robrini 2006).

Aliado a esse fator, a região também possui um período de alta descarga fluvial (principalmente Abril e Maio; Prestes 2016), o aporte ERP produz uma pluma estuarina na plataforma continental interna, transportando grandes quantidades de MPS para a região costeira paraense (Corrêa 2005). A figura 3 exibe a normal climatológica para ambas as margens do ERP, considerando valores médios mensais de precipitação de 1982 a 2016

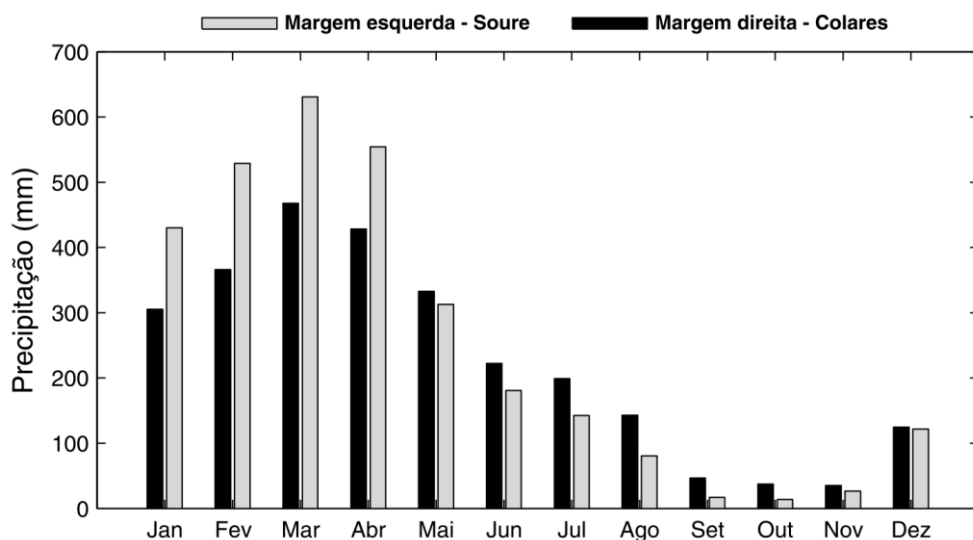


Figura 3 – Normal climatológica para a margem direita e margem esquerda do Estuário do Rio Pará, considerando a precipitação média de cada mês de 1982 a 2016
Fonte: ANA (2017) e INMET (2017).

2.1.3 Aspectos oceanográficos

A região está localizada na Zona de Mistura (ZM) do ERP e é influenciada por um regime de meso a macromaré semidiurna (figura 4). Possui uma amplitude de maré que varia de 1,5 a 5 metros, nas regiões mais internas e próximas a costa, respectivamente, e apresenta uma descarga fluvial da ordem de $10^4 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (Beardsley *et al.* 1995, Prestes 2016). Apresenta correntes com magnitude que atingem valores de $2,9 \text{ms}^{-1}$ (Prestes 2016), com um regime que inverte a direção preferencial por volta de 2,5 a 3 horas antes de cada preamar e baixa mar (Rosário 2016).

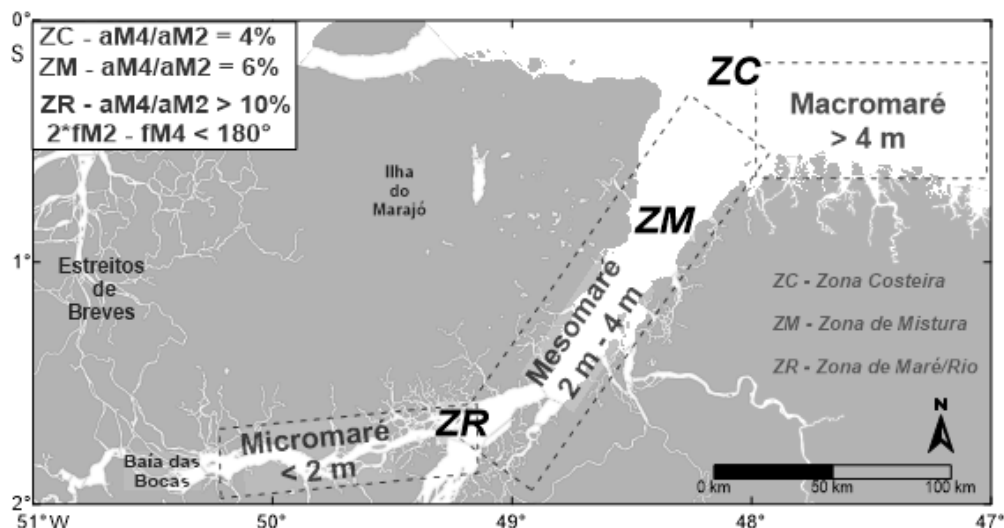


Figura 4 – Classificação do ERP e ambientes adjacentes em: i) Zona Costeira; ii) Zona de Mistura; e iii) Zona de Rio. Conforme as definições proposta por Kjerfve. Fonte: Prestes, 2016.

2.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

Foram realizadas duas campanhas oceanográficas para coleta de dados, sendo uma referente ao período seco (6 - 10 de outubro de 2014) e outra ao período chuvoso (1 - 4 de junho de 2015), ambas em maré de sizígia. Estas coletas de dados consistiram em medições horárias ao longo de um ciclo de maré semidiurno (13 h) em quatro pontos do ERP, sendo dois em cada margem, um à 45 km de distância da foz e outro à 60 km (figura 5).

Para a determinação do MPS, em cada campanha foi realizada coletas de água de fundo e superfície ao longo das quatro estações, com uma garrafa do tipo de Van Dorn. A turbidez, quantificada através do retroespalhamento óptico (REO), foi obtida com perfis horários ao longo da coluna d'água a partir de um sensor OBS (*Optical Backscatter Sensor*) modelo Infinity-turbi ATU74W-USB com uma frequência de medição de 1 Hz.

O princípio de funcionamento do equipamento é baseada na detecção da luz que é emitida e retroespalhada pelas partículas em suspensão, ao qual é convertida em sinal elétrico (Costa 2014). O sensor é calibrado com um algoritmo interno, que correlaciona a quantidade de luz do espectro infravermelho retroespalhada pela água com as concentrações equivalentes de partículas que já estão calibradas de fábrica. A precisão

do aparelho, para altas concentrações de quantidade de luz retroespalhada na coluna d'água, se utiliza parte por milhão (ppm, com precisão de ± 10 ppm ou $\pm 5\%$ e intervalo de medição 0-100.000). No caso do estuário do rio Pará será utilizado a precisão do aparelho para baixas concentrações, a unidade FTU - *Formazine Turbidity Unit* (precisão de ± 0.3 FTU ou $\pm 2\%$ e intervalo de medição 0-1000 FTU).

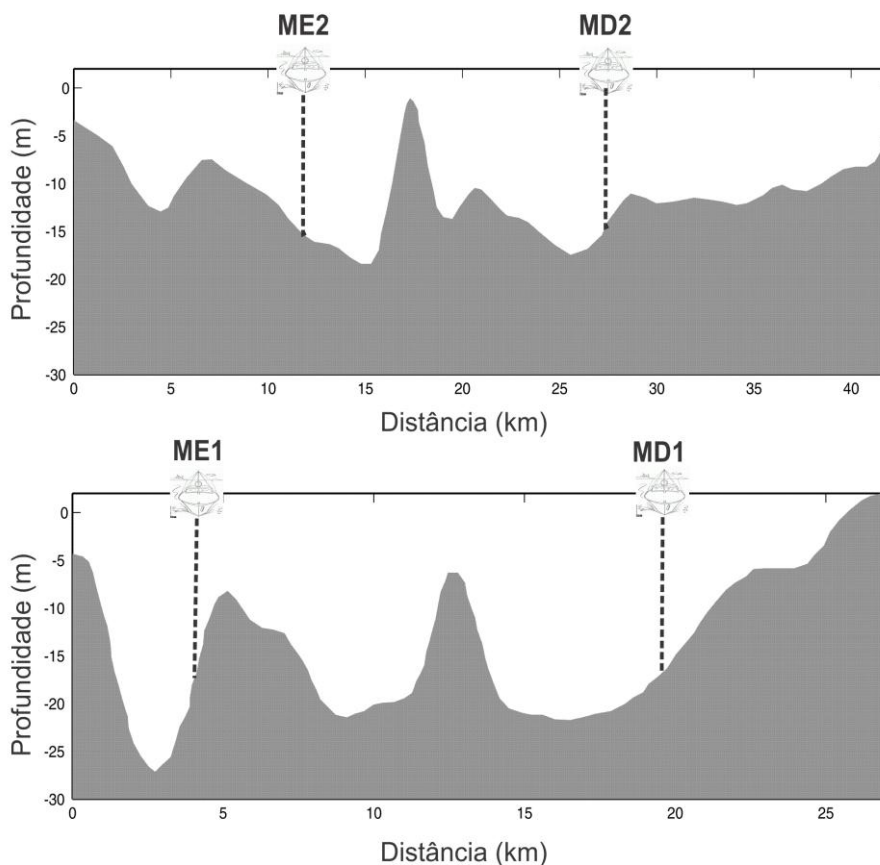


Figura 5 – Imagem ilustrativa da posição dos pontos amostrais de fundeio no ERP. O perfil batimétrico foi realizado a partir da carta náutica 303 da DHN.

Fonte: Modificado de Rosário (2016).

2.3 PROCESSAMENTO E ANÁLISE

2.3.1 Material particulado em suspensão (MPS)

Em laboratório não houve a distinção da parcela orgânica e inorgânica do MPS, a quantificação foi determinada pelo método da gravimetria de volatização segundo Baumgarten *et al.* (1996). No qual 250 mL de cada amostra foram filtradas com o

auxílio de uma bomba de vácuo, com filtros de fibra de celulose de $0,54 \mu\text{m}$ de poros e 47 mm de diâmetro. Os filtros foram previamente pesados (P1) e posteriormente foram transferidos para uma mufla, onde foi secado a 40°C por um período de tempo de 1 hora. Após esse período os filtros foram pesados (P2), e a diferença entre o P2 e o P1 fornece o peso do MPS. Para se obter o MPS em miligrama por litro (mgL^{-1}) foi utilizado a equação 1:

$$[\text{MPS}] = \frac{(P2-P1) \cdot 10^6}{V} \quad (1)$$

onde,

P2 - Peso do filtro com o material em suspensão seco

P1 - Peso do filtro vazio e seco

V - Volume da amostra filtrada

10^6 - Fator de conservação de unidade de gL^{-1} em mgL^{-1}

2.3.2 Turbidez

Devido à metodologia amostral, os dados espúrios na superfície (até 1,5 m) e próximo ao fundo foram descartados. Os dados de turbidez foram interpolados em profundidade adimensional, utilizando o método de interpolação *Spline* em ambiente MATLAB®. Onde as profundidades reais (z) foram convertidas em adimensionais (Z), em que $Z=0$ representa a superfície (0% de coluna d'água) e $Z=1$ o fundo (100%), Segundo descrito por Miranda *et al.* (2002). Este procedimento é importante devido às variações no nível da água causado pela maré, fazendo com que as medições ocorram em diferentes níveis abaixo da superfície livre. A profundidade adimensional é calculada através da equação 2:

$$Z = \frac{z}{h(t)} \quad (2)$$

onde,

Z - profundidade adimensional

z - profundidade real

h(t) - alturas instantâneas dos perfis em cada intervalo de tempo

2.3.3 Sólidos em Suspensão (SLS)

2.3.3.1 Concentração de sólidos em suspensão (C_{SLS})

Para o cálculo das C_{SLS} , foi utilizado o método da regressão linear dos mínimos quadrados entre os resultados obtidos de MPS e turbidez coletados *in situ*. Segundo Emery & Thomson (2014), o método da regressão linear dos mínimos quadrados é uma análise estatística de estimativa linear, que consiste no encaixe de uma reta comum a um conjunto de pontos, que são gerados através da relação entre duas propriedades nos eixos X e Y. Este procedimento tem como objetivo minimizar os desvios verticais (resíduos) dos pontos, de forma a ajustar a reta a menor distancia comum entre o conjunto de pontos (malha amostral). A regressão linear dos mínimos quadrados gera uma equação do primeiro grau, onde x é a variável independente e o r^2 é o residual da equação ou índice de confiabilidade.

Mantovanelli *et al.* (1999) verificaram que a relação da concentração de MPS e a turbidez nem sempre são observadas e alcançadas no ambiente, uma vez que a resposta óptica das partículas suspensas (capacidade de retroespalhamento) pode diferir de sua propriedade gravimétrica (peso por unidade de volume). Concluíram que para correlação do MPS e da turbidez, a coleta de MPS *in situ* é imprescindível para a calibração do sensor. Além disso, Essa correlação não pode ser extrapolada para outros ambientes fora os sistemas estuarinos, devido as variáveis em questão.

Da mesma forma, Schettini *et al.* (2010) utilizaram a mesma metodologia na baía da Tijuca – SC. Calibrou os dados obtidos com o sensor utilizando coletas de sedimento em suspensão *in situ*. Desta maneira, para o cálculo da C_{SLS} no ERP, foi utilizado a regressão linear dos mínimos quadrados entre o MPS e a turbidez, sendo que

os dados de MPS foram utilizados para calibrar os de turbidez. Para isso, valores de fundo e superfície foram separados dos perfis verticais de turbidez, similar ao encontrado nos dados de MPS, com a finalidade de igualar o número de amostras das duas propriedades. Desta forma, é possível correlacionar as amostras de superfície de MPS com os dados de superfície de turbidez, da mesma forma ocorre com as amostras de fundo.

A equação gerada através da regressão linear dos mínimos quadrados foi aplicada nos dados dos perfis verticais de turbidez, devido a sua malha amostral ser mais representativa. A figura 6 apresenta o modelo gerado através da correlação entre os dados de FTU (eixo x) e MPS (eixo y), exibindo a reta comum a menor distancia dos pontos gerados, além da equação gerada e o resíduo da equação (r^2). Apesar das grandezas entre ambos ser diferente, possuem uma relação diretamente proporcional. A C_{SLS} é dada em mgL^{-1} devido as concentrações de MPS serem dadas na mesma unidade.

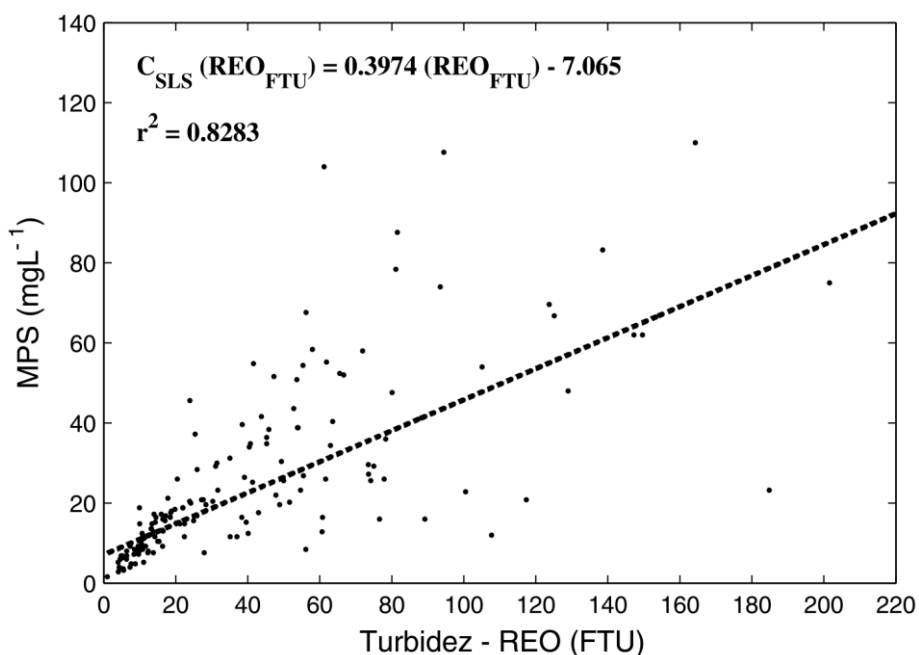


Figura 6 – Modelo gerado através da regressão linear entre Turbidez (FTU) no eixo X, e a Concentração de MPS no eixo Y. A equação $C_{SLS}(REO_{FTU}) = 0,3974(REO_{FTU}) - 7,065$ do primeiro grau foi gerada através da correlação entre as propriedades, e o valor de r^2 representa a confiabilidade da correlação (cerca de 80%).

Fonte: Do autor.

2.3.3.2 Transporte de sólidos em suspensão (T_{SLS})

O cálculo do T_{SLS} foi realizado conforme a equação de fluxo de propriedades para um perfil vertical, descrita por Miranda *et al.* (2002) e utilizada por Siegle *et al.* (2009) para o estuário de Camboriú. Substituindo da equação o termo A_t , que corresponde a área da seção transversal, por h_t , que representa a altura vertical da seção, temos a equação adaptada, usada para o cálculo do transporte residual de sólidos em suspensão ($\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$). O $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ é calculado através da equação 3:

$$F_t = 10^{-3} \cdot \bar{u} \cdot h_t \cdot C_t \quad (3)$$

onde,

F_t - transporte de sólidos em suspensão em função do tempo

10^{-3} - fator de conversão de grama para quilograma

\bar{u} - média da componente u da velocidade ao longo da coluna d'água

$h(t)$ – Altura média dos perfis

C_t - residual da C_{SLS}

Para o cálculo dos residuais da concentração de sólidos em suspensão ($\langle \overline{C_{SLS}} \rangle$), foram realizadas médias espacial dos perfis verticais. Contudo, segundo Miranda *et al.* (2002) os valores da propriedade devem ser ponderados nos instantes iniciais (t_0) e finais (t_n) pelo fator de $\frac{1}{2}$. Pois se assume que cada um desses valores são representativos somente para o intervalo de tempo, ou seja, a média é independente do tempo. Com a nova média espacial, realiza-se médias temporais para obter o resíduo. O T_{SLS} calculado para um ciclo de maré semidiurna, foi realizado a partir da equação 4:

$$T = F_t \cdot 46800 \quad (4)$$

onde,

T - transporte de sólidos em suspensão para um ciclo de maré semidiurno

46800 - Fator de conversão de segundos para um ciclo semidiurno

A lutoclina foi estimada através dos fortes gradientes das C_{SLS} em camadas próximas ao fundo, e da correlação visual entre os perfis residuais da concentração de sólidos em suspensão ($\langle C_{SLS} \rangle$) com os perfis residuais da componente u da velocidade determinados por Prestes (2016). Portanto, as profundidades médias da lutoclina não são exatas, são posições aproximadas ao longo da coluna d'água, pois não houve a sobreposição gráfica dos perfis residuais da C_{SLS} com os perfis residuais da componente u da velocidade. Para uma análise mais completa e detalhada, seria necessário uma malha amostras maior, além de coletas de dados de outras propriedades físicas.

3 RESULTADOS

Neste capítulo serão abordados todos os resultados referentes aos dados coletados e posteriormente analisados, referente as duas campanhas realizadas nos quatro pontos amostrais do presente trabalho. Serão apresentados resultados de MPS, turbidez e C_{SLS} , de acordo com as variações verticais e temporais das concentrações desses parâmetros, de forma a expor todos os pontos considerados relevantes e que de alguma forma contribuíram para o melhor entendimento das questões levantadas.

3.1 MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS)

Para o período seco os principais resultados obtidos para o MPS são apresentados na tabela 1. Nessa campanha, as menores concentrações de MPS foram encontradas na margem esquerda do ERP, nos pontos ME2 e ME1, de aproximadamente 1 mgL^{-1} para ambos. Os maiores valores de MPS foram observados na margem direita do estuário, 110 mgL^{-1} para o ponto MD2 e 72 mg.L^{-1} para MD1. Considerando amostras de fundo e superfície, as maiores concentrações médias de MPS também foram verificadas na margem direita do ERP, iguais a 37 mgL^{-1} e 22 mgL^{-1} para MD1 e MD2, respectivamente.

Entretanto, para o período chuvoso, os resultados indicaram padrões diferentes. As maiores concentrações de MPS foram observadas nos dois pontos mais internos ao estuário, de 185 mgL^{-1} em ME1 e 119 mgL^{-1} em MD1. Da mesma forma, os maiores valores médios foram encontrados nos mesmos pontos, com valores de 52 mgL^{-1} em ME1 e 47 mgL^{-1} em MD1. As menores concentrações de MPS foram verificadas nos dois pontos mais externos do ERP, de 12 mgL^{-1} e 19 mgL^{-1} para MD2 e ME2, respectivamente (tabela 1).

Tabela 1 – Valores máximos, médios e mínimos aproximados das concentrações de MPS dos quatro pontos amostrais, obtidas no período seco e chuvoso.

		Período seco			
		MD1	ME1	MD2	ME2
MPS	MIN (mg.L ⁻¹)	7 superfície	1 superfície	5 superfície	1 superfície
	MAX (mg.L ⁻¹)	72 fundo	19 superfície	110 fundo	47 fundo
	MED (mg.L ⁻¹)	37	18	22	13
		Período chuvoso			
		MD1	ME1	MD2	ME2
MPS	MIN (mg.L ⁻¹)	16 superfície	8 superfície	4 superfície	6 superfície
	MAX (mg.L ⁻¹)	119 fundo	185 fundo	87 fundo	29 fundo
	MED (mg.L ⁻¹)	47	52	12	19

Fonte: Do autor.

As maiores concentrações de MPS foram encontradas no período chuvoso da região (tabela 2). No ponto ME2 houve um aumento de cerca de 40% e no MD1 de 30%. O ponto ME1 apresentou a maior variação, Seus valores quase triplicaram. Contudo, em MD2 houve inversão nos padrões apresentados pelos demais pontos, de modo que suas concentrações de MPS reduziram de 582 mgL⁻¹ no período seco, para 335 mgL⁻¹ com a chegada do período chuvoso.

Tabela 2 Somatório das concentrações de MPS, considerando as amostras de fundo e superfície ao longo de um ciclo de maré semidiurno, para cada ponto amostral, referente ao período seco e chuvoso. Além dos valores totais das concentrações para cada campanha.

	Período seco				
	MD1	ME1	MD2	ME2	Total
Concentração de MPS (mgL ⁻¹)	979	483	582	353	2.398
	Período chuvoso				
	MD1	ME1	MD2	ME2	Total
Concentração de MPS (mgL ⁻¹)	1.245	1.358	335	498	3.438

Fonte: Do autor.

De maneira geral, as maiores concentrações de MPS são encontradas em amostras coletadas próximas ao fundo, com algumas exceções. Um exemplo ocorre no ponto MD1 no período chuvoso, onde as amostras 6 e 7 apresentaram concentrações maiores em superfície, atingindo valores próximos a 50 mgL^{-1} (figuras 7 e 8). Há também variação nos valores de MPS juntamente com a oscilação da maré, esse fato é melhor visualizado no período chuvoso, nos pontos MD1 e ME1. De forma geral, próximo da estufa de maré vazante, foram observados os maiores valores de MPS. Com exceção dos pontos MD2 e ME2, que no período seco alcançam grandes concentrações quanto mais próximo da estufa de maré enchente.

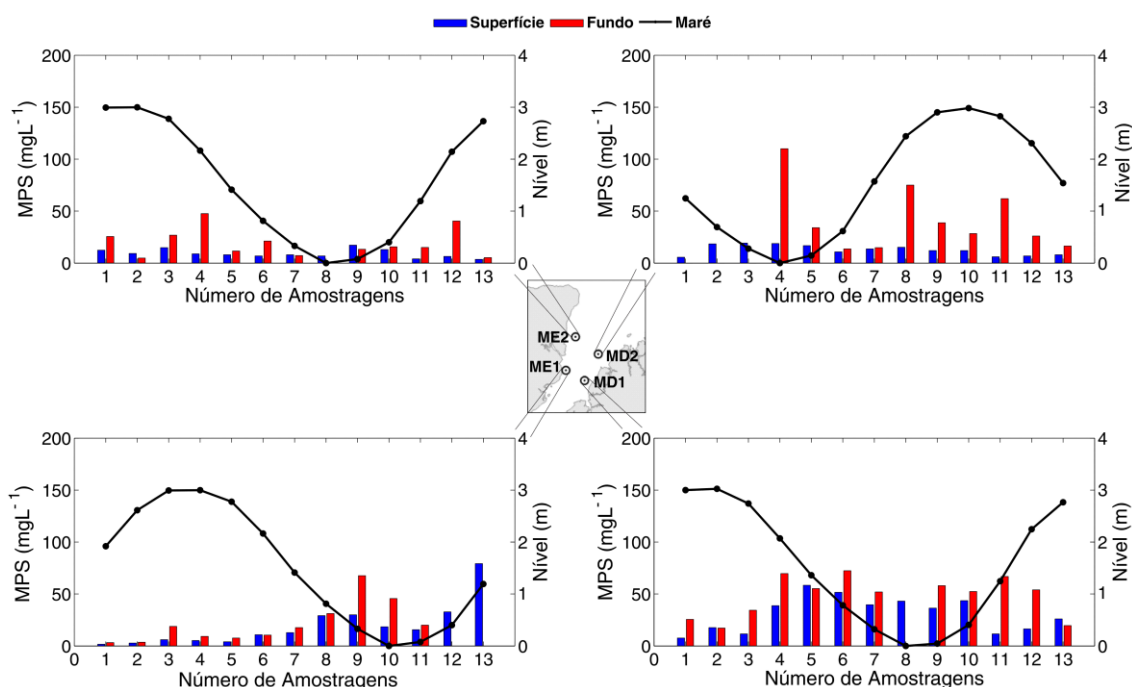


Figura 7 – Concentração de MPS em função da variação de nível causada pela maré referente ao período seco. Barras em vermelho representam amostras coletadas próximas ao fundo, e as barras em azul as coletadas em superfície. No eixo y as concentrações de MPS e o nível da maré em função do número de amostragens, no eixo x.

Fonte: Do autor.

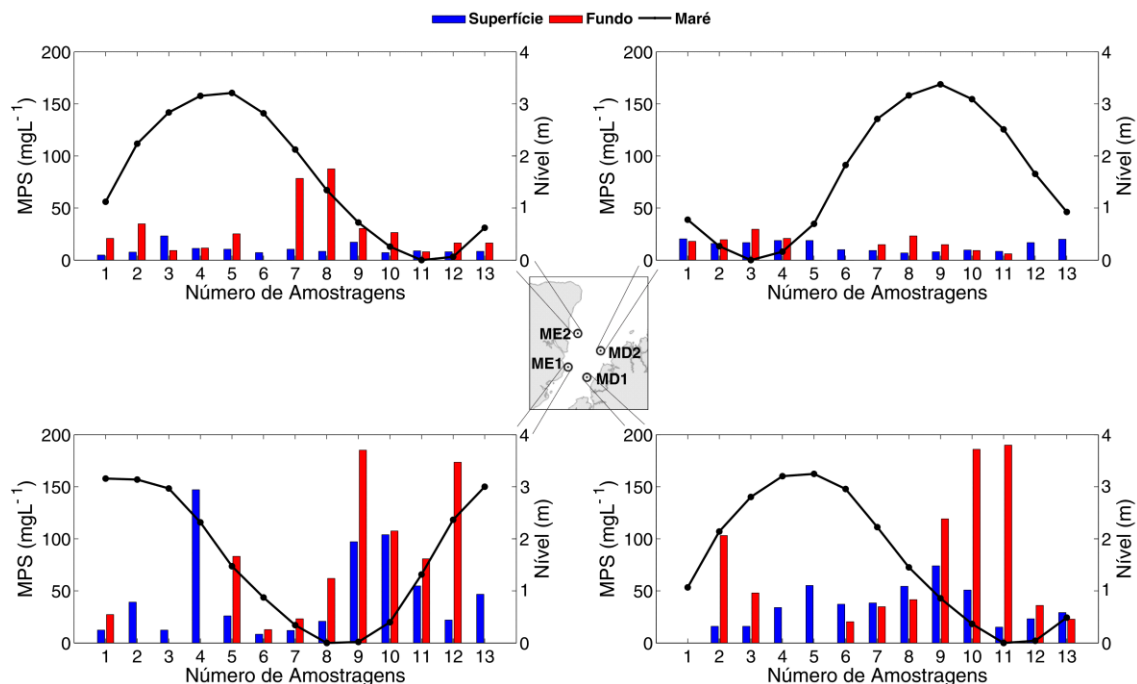


Figura 8 – Concentração de MPS em função da variação de nível causada pela maré referente ao período chuvoso. Barras em vermelho representam amostras coletadas próximas ao fundo, e as barras em azul as coletadas em superfície. No eixo y as concentrações de MPS e o nível da maré em função do número de amostragens, no eixo x.

Fonte: Do autor.

Vale ressaltar que algumas amostras de água sofreram perda durante o tempo entre sua coleta e posterior análise, tornando inviável a quantificação do MPS nessa amostra, bem como a realização de análises mais específicas, como por exemplo o cálculo do desvio padrão e da C_{SLS} .

3.2 TURBIDEZ

De maneira geral, os resultados da turbidez exibiram padrões de distribuição semelhantes ao encontrado nas concentrações de MPS. No período seco os menores valores de turbidez foram de aproximadamente 1 FTU e 2 FTU, para os pontos ME1 e MD2, respectivamente. Os maiores valores de turbidez foram verificados nos dois pontos da margem direita do estuário, MD1 e MD2, de 1181 FTU e 1888 FTU, respectivamente. As maiores médias também ocorreram na margem direita do ERP, de 110 FTU para o ponto MD2 e 71 FTU para MD1, assim como os dois maiores desvios padrões, de 248 e 93 para os pontos MD1 e MD2, respectivamente (tabela 3).

Tabela 3 – Valores máximos, médios, mínimos e desvio padrão aproximados referente a turbidez dos quatro pontos amostrais, para o período seco e chuvoso.

		Período seco			
		MD1	ME1	MD2	ME2
Turbidez	MAX	1181	95	1188	591
	MIN	11	1	2	7
	MED	71	25	110	38
	DESV. PAD.	248	21	93	74
		Período chuvoso			
		MD1	ME1	MD2	ME2
Turbidez	MAX	1125	261	381	592
	MIN	23	6	2	3
	MED	206	74	45	43
	DESV. PAD.	253	48	57	69

Fonte: Do autor.

De maneira análoga ao observado nas concentrações de MPS, a turbidez também apresentou mudança nos seus padrões de distribuição no período chuvoso. Os menores valores de turbidez foram encontrados nos dois pontos mais externos, cerca de 2 FTU para MD2 e 3 FTU para ME2. Os pontos MD1 e ME2 exibiram os maiores valores de turbidez encontrados para esta campanha, de 1125 FTU e 592 FTU, respectivamente. Contudo, as maiores medias foram verificadas nos dois pontos mais internos do estuário, com a máxima de 206 FTU em MD1, seguido de 74 FTU em ME1 (tabela 3). Com relação ao desvio padrão, os maiores valores foram observados em MD2 e ME2, cerca de 253 FTU e 69 FTU, respectivamente.

As figuras 9 e 10 apresentam a distribuição vertical dos valores de turbidez ao longo da coluna d'água, para os períodos seco e chuvoso. Nos dois pontos mais internos verificou-se o aumento mais significativos nos valores de FTU, na transição do período seco para o chuvoso. No ponto ME2 observou-se um aumento pouco perceptível graficamente, melhor visualizado na tabela 3. O ponto MD2 exibiu o mesmo padrão de distribuição sazonal observado nas concentrações de MPS, seus maiores valores de FTU foram observados no período seco, e apresentou um decréscimo com a chegada do período chuvoso.

Os resultados de turbidez obtidos apresentaram grandes gradientes entre seus valores, para todos os pontos coletados, desta forma optou-se pela representação gráfica dos resultados em \log_{10} . Dessa maneira, a gradação entre as cores mais "quentes" como

o vermelho e as cores mais "frias" como o azul é visualizada com maior nível de detalhes, tornando melhor a análise gráfica dos resultados de FTU, bem como a comparação entre margens, períodos sazonais e variações semidiurnas.

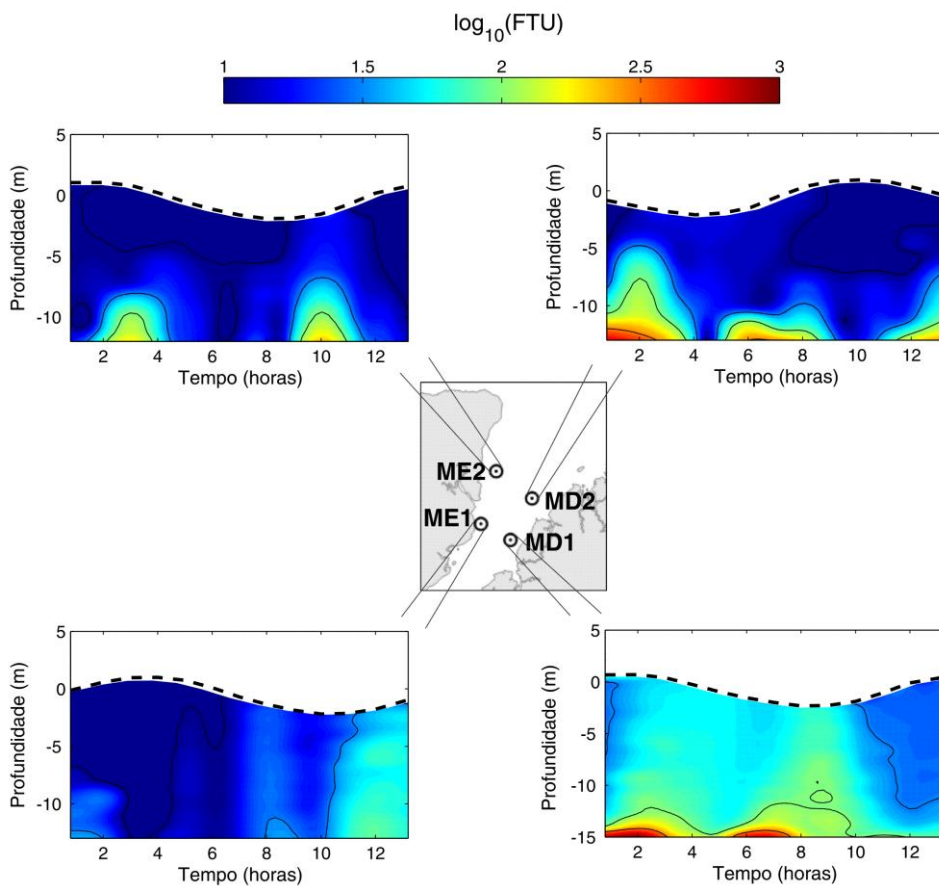


Figura 9 – Variações da turbidez ao longo da estrutura vertical em um ciclo de maré semidiurno, para o período seco. Cores "quentes" como o vermelho representa os maiores valores de FTU, enquanto cores "frias" como o azul representam os menores valores.

Fonte: Do autor.

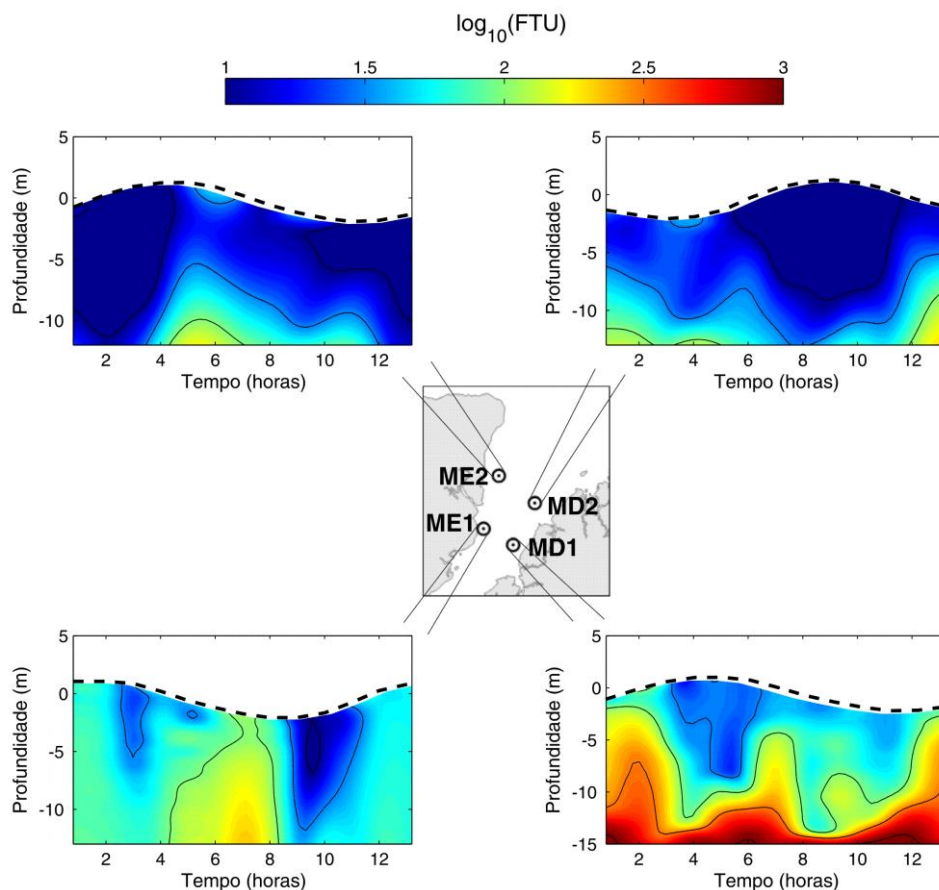


Figura 10 – Variações da turbidez ao longo da estrutura vertical em um ciclo de maré semidiurna, para o período chuvoso. Cores "quentes" como o vermelho representa os maiores valores de FTU, enquanto cores "frias" como o azul representam os menores valores.

Fonte: Do autor.

Analisando os perfis de turbidez de forma vertical, há um aumento nos valores de superfície em direção ao fundo. De forma geral, em pontos como o ME1 e ME2, a diferença entre superfície e fundo é reduzida, normalmente próxima a estofas de maré, tanto no período seco quando no chuvoso. Nos pontos MD1 e MD2 essa diferença é mais aparente, principalmente em MD1 (figuras 8 e 9).

3.3 CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO (C_{SLS})

Os resultados da C_{SLS} apresentados a seguir foi determinado com a correlação linear entre as concentrações de MPS e os valores de turbidez. A tabela 4 exibe os resultados das C_{SLS} referente aos quatro pontos amostrais, e para os dois períodos sazonais. Para o período seco, os maiores valores foram verificados na margem direita do ERP nos pontos MD1 e MD2, de aproximadamente 462mgL^{-1} e 467mgL^{-1} ,

respectivamente. As menores concentrações foram observadas na margem esquerda do estuário, em ME2 e ME1, com valores de cerca de 7 mgL^{-1} e 7 mgL^{-1} , respectivamente. As médias seguiram a mesma distribuição dos máximos da campanha, com seus maiores valores encontrados na margem direita, de 34 mgL^{-1} para MD1 e de 49 mgL^{-1} para MD2.

Contudo, há mudança nos padrões de distribuição da C_{SLS} com a chegada do período chuvoso. Para essa campanha, os máximos encontrados são referentes aos pontos MD1 e ME2, com concentrações de 443 mgL^{-1} e 236 mgL^{-1} , respectivamente (tabela 4). As menores concentrações são verificadas nos dois pontos mais externos ao estuário, 7 mgL^{-1} para ME2 e 8 mgL^{-1} para MD2. E as maiores médias deste período são observadas nos dois pontos mais internos, com os maiores valores de 89 mgL^{-1} e 35 mgL^{-1} para MD1 e ME1, respectivamente.

Tabela 4 – Concentrações máximas, mínimas e médias dos sólidos em suspensão, referente aos períodos seco e chuvoso e para os quatro pontos amostrais.

		MD1	ME1	MD2	ME2
Seco					
CSLS (mg.L^{-1})	MAX	462	43	467	236
	MIN	11	7	7	7
	MED	34	17	49	21
Chuvoso					
CSLS (mg.L^{-1})	MAX	443	108	154	236
	MIN	16	9	8	7
	MED	89	35	24	24

Fonte: Do autor.

As maiores C_{SLS} foram obtidas no período chuvoso da região. Os pontos MD1, ME1 e ME2 com a chegada do período de maior precipitação, apresentaram aumento nas suas concentrações, de aproximadamente 150%, 115% e 10%, respectivamente. Somente no ponto MD2 os padrões sazonais foram diferentes dos demais, sua concentração reduziu em 50%. O total da C_{SLS} para o período seco foi de 41.821 e para o período chuvoso foi de 58.087 (tabela 5).

Tabela 5 – Somatório das C_{SLS} considerando sua distribuição vertical na coluna d'água, ao longo de um ciclo de maré semidiurno, a C_{SLS} total obtida em cada período sazonal

	MD1	ME1	MD2	ME2	Total
Seco					
CSLS (mg.L^{-1})	11.762	5.748	16.887	7.423	41.821
Chuvoso					
CSLS (mg.L^{-1})	29.379	12.188	8.406	8.112	58.087

Fonte: Do autor.

As figuras 11 e 12 apresentam ao longo da coluna d'água a distribuição da C_{SLS} no decorrer de um ciclo de maré, referente aos dois períodos sazonais. De modo geral, os maiores valores de C_{SLS} ocorrem mais próximo ao substrato. No período seco, a diferença entre a distribuição das C_{SLS} próxima ao fundo e ao longo da coluna d'água é mais acentuada. Nessa campanha as maiores concentrações são observadas próximas ao fundo na margem direita do estuário, nos pontos MD2 e MD1, respectivamente (figura 11).

Entretanto, no período chuvoso os resultados exibiram diferenças nos padrões de distribuição. Sendo as máximas C_{SLS} observadas nos dois pontos mais internos, MD1 e ME1, respectivamente. O ponto ME2 apresentou um acréscimo pouco perceptível graficamente, sendo mais bem visualizado na tabela 5, enquanto que em MD2 houve um decréscimo nas concentrações. De uma forma geral, nesta campanha a diferença entre as C_{SLS} próximas ao fundo e ao longo da coluna d'água é pouco acentuada (figura 12).

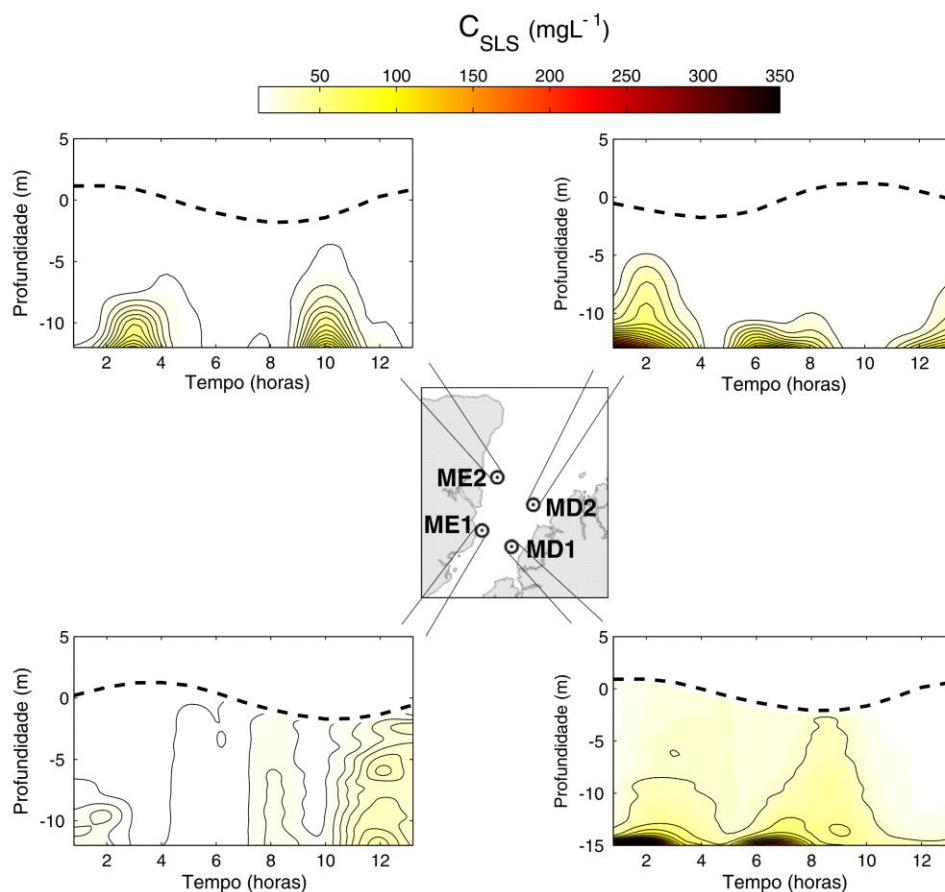


Figura 11 – Variações na estrutura vertical da C_{SLS} ao longo de um ciclo de maré semidiurno, referente ao período seco. A) e B) pontos externos, ME2 e MD2 respectivamente; C) e D) pontos internos, ME1 e MD1, respectivamente.

Fonte: Do autor.

As variações das C_{SLS} ocorrerem juntamente com a cooscilação da onda de maré dentro do corpo estuarino. Nos pontos MD1 e MD2 no período seco esse fato é melhor representado, onde seus maiores valores da C_{SLS} foram $462,67 \text{ mgL}^{-1}$ e $467,56 \text{ mgL}^{-1}$, respectivamente, ocorrendo próximos às estofas de maré. Em ambos os pontos da margem esquerda esse padrão também é verificado, entretanto, é melhor visualizado no período chuvoso (figuras 11 e 12).

Note que a distribuição espacial e temporal da C_{SLS} é semelhante ao observado no FTU. De forma geral, isso ocorre devido aos valores obtidos da C_{SLS} ter sido modelado a partir das amostras de MPS e turbidez coletadas *in situ*. Dessa maneira, essa distribuição tende a ser semelhante quanto mais representativo for o modelo gerado para o observado nas amostras coletadas.

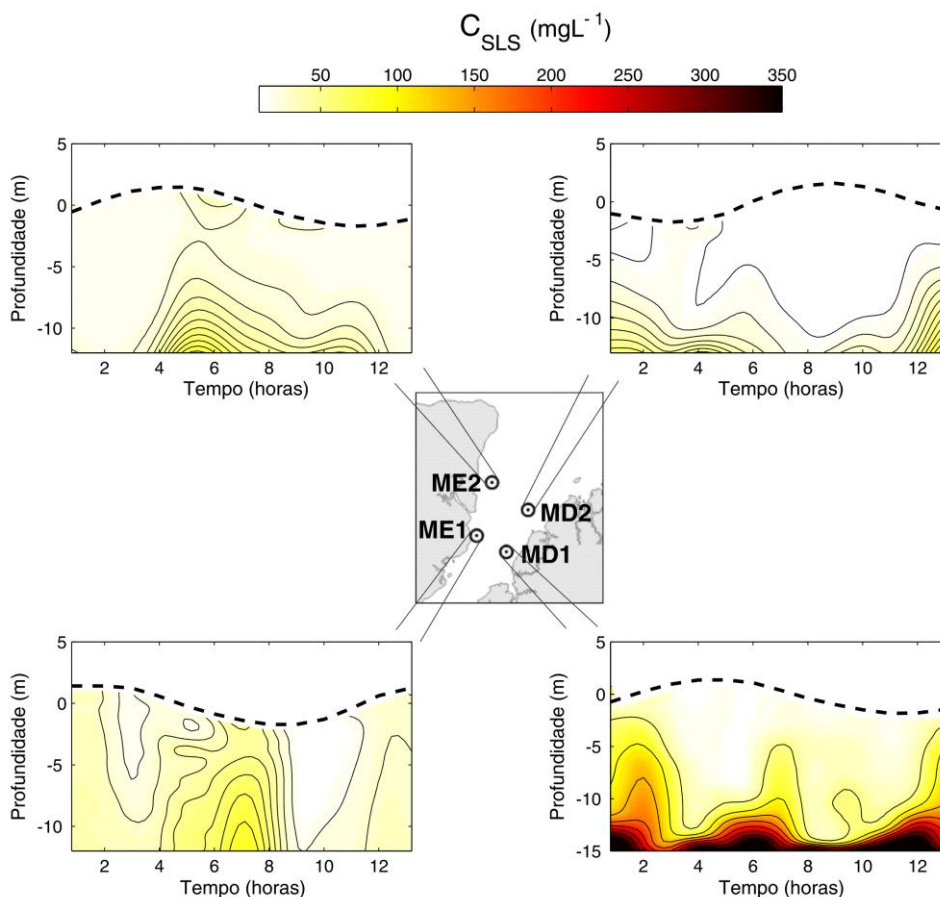


Figura 12 – Variações na estrutura vertical da C_{SLS} ao longo de um ciclo de maré semidiurno, referente ao período chuvoso. A) e B) pontos externos, ME2 e MD2 respectivamente; C) e D) pontos internos, ME1 e MD1, respectivamente.

Fonte: Do autor.

Os perfis residuais das Concentrações de Sólidos em Suspensão ($\langle C_{SLS} \rangle$) do ERP são apresentados na figura 13. De modo geral, em ambos os períodos sazonais, os dois pontos da margem direita apresentaram os maiores gradientes verticais das C_{SLS} . No período seco a medida que os perfis médios ganham profundidade, há um ponto onde as concentrações aumentam de maneira acentuada. Com cerca de 70% de coluna d'água o ponto MD2 aumenta seu $\langle C_{SLS(z)} \rangle$ significativamente, a partir de 90% de coluna d'água o mesmo ocorre em MD1.

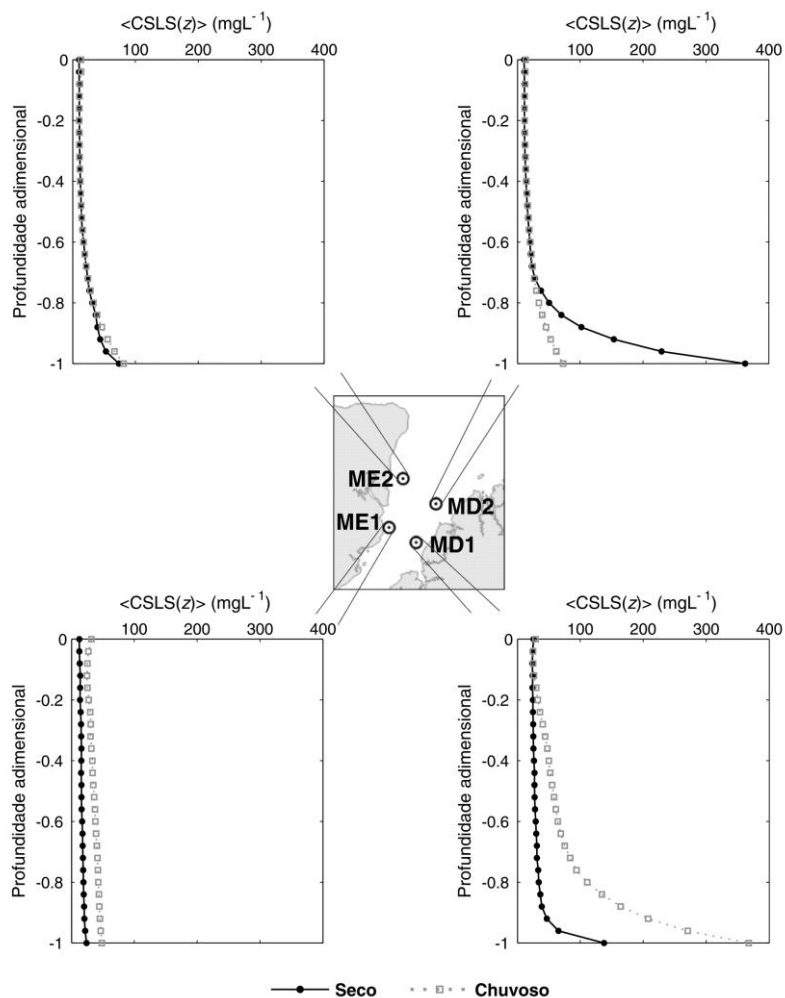


Figura 13 – Perfis verticais residuais da $\overline{C_{SLS}}$, para o período seco (linhas pretas) e chuvoso (linhas cinzas).

Fonte: Do autor.

No período chuvoso, com aproximadamente 80% de coluna d'água em MD2, os $\overline{C_{SLS(z)}}$ exibem esse aumento repentino, enquanto que em MD1 esse aumento ocorre com cerca de 70% de coluna d'água. No ponto ME2, em ambos períodos sazonais, verifica-se um aumento repentino dos $\overline{C_{SLS(z)}}$, entre 80% e 90%. Em ME1, não ocorre a presença desse gradiente vertical de profundidade observado nos demais pontos.

A figura 14 apresenta médias espaciais para as Concentrações de Sólidos em Suspensão ($\overline{C_{SLS}}$) em cada ponto amostral, referente aos dois períodos sazonais. De forma semelhante ao verificado nas análises espaciais e dos perfis verticais residuais das $\overline{C_{SLS}}$, os pontos da margem direita apresentaram as maiores concentrações. No período seco seus valores são aproximadamente o dobro se comparados com a margem

esquerda, enquanto que no período chuvoso, as C_{SLS} na margem direita são cerca de 80% maiores que na margem esquerda.

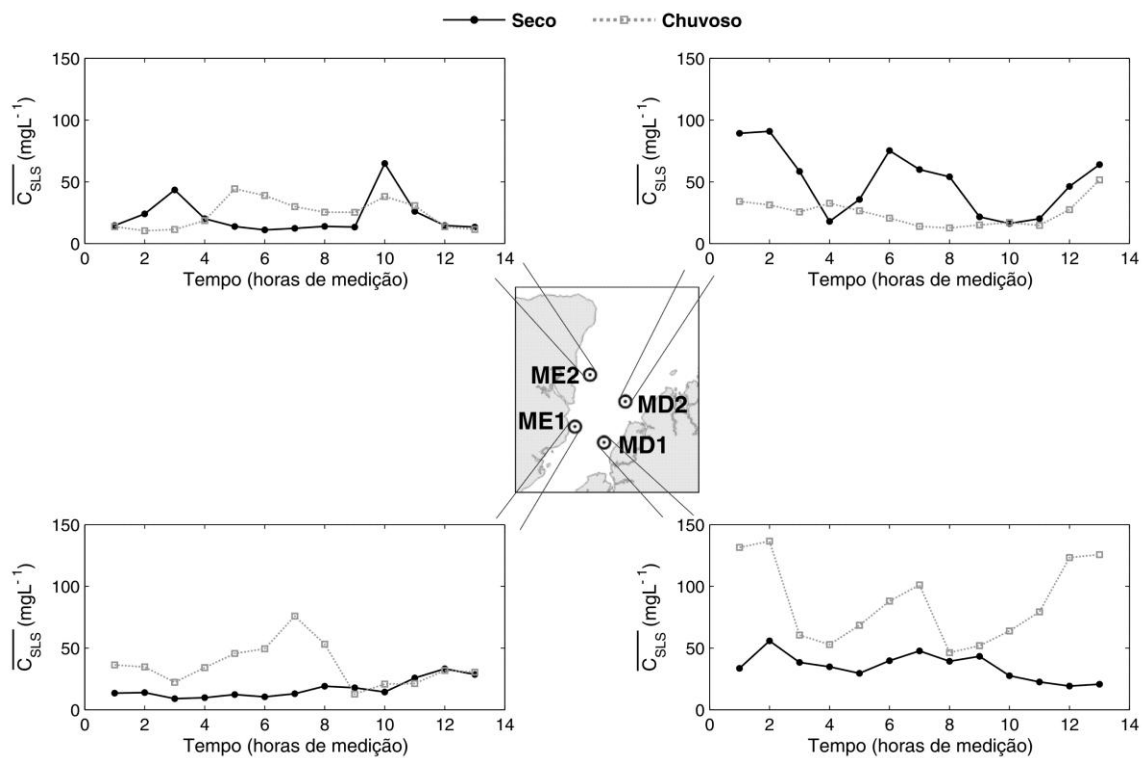


Figura 14 – Médias espaciais dos perfis verticais da C_{SLS} para os períodos seco (linhas pretas) e chuvoso (linhas cinzas).

Fonte: Do autor.

4 DISCUSSÕES

No presente capítulo, serão apresentados os transportes residuais de sólidos em suspensão ($\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$), os transportes residuais em camadas de fundo ($\langle \overline{T_{SLS(F)}} \rangle$) e superfície ($\langle \overline{T_{SLS(S)}} \rangle$), para cada margem do ERP. Além da correlação entre a concentração de sólidos em suspensão de fundo ($C_{SLS(F)}$) e ao longo da coluna d'água ($\overline{C_{SLS}}$), para os quatro pontos amostrais. Tendo como foco principal a diferenciação das propriedades entre as margens.

4.1 TRANSPORTE RESIDUAL DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO

Com os resultados obtidos realizou-se um balanço para as margens do ERP a partir do $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$. Na margem direita a variação do período seco para o período chuvoso foi de 6321 a 7239 kgm^{-1} , caracterizando exportação de SLS para o oceano adjacente. Enquanto na margem esquerda essa diferença foi de -135 a -1908 kgm^{-1} , caracterizando importação de SLS para o sistema estuarino (figuras 15).

Diferenças no T_{SLS} entre margens de um estuário podem ser atribuídas a diferentes aspectos, um deles é as variações da componente u das velocidades. Prestes (2016) definiu no ERP um balanço positivo da componente u na margem direita, caracterizando a direção resultante da corrente rumo ao oceano adjacente, e negativo na margem esquerda, caracterizando essa direção resultante rumo continente adentro, em ambos os períodos sazonais. Considerado a equação 3, nota-se que a componente u da velocidade é uma das variáveis utilizadas para o cálculo do $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$. Portanto, qualquer alteração que ocorra com essa propriedade, implica diretamente em variações no do $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ também.

Semelhante ao observado no ERP, Filho (2015) determinou o transporte de MPS ao longo do canal oeste e canal leste do sistema estuarino de Itapessoca (PE). Concluiu que a distribuição espacial do transporte residual de MPS está em fase com os residuais da componente u , onde valores positivos de velocidade (direção a montante) indicavam à entrada de MPS no sistema, e valores negativos a saída do ambiente (direção ao jusante). O canal oeste apresentou uma estrutura lateralmente bidirecional, enquanto a margem direita importava sedimento ($+u$), a margem esquerda exportava ($-u$). Apesar do sistema estuarino de Itapessoca ser em termos de largura, comprimento e

profundidade menor que o ERP, suas distribuições quanto ao $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ foram semelhantes.

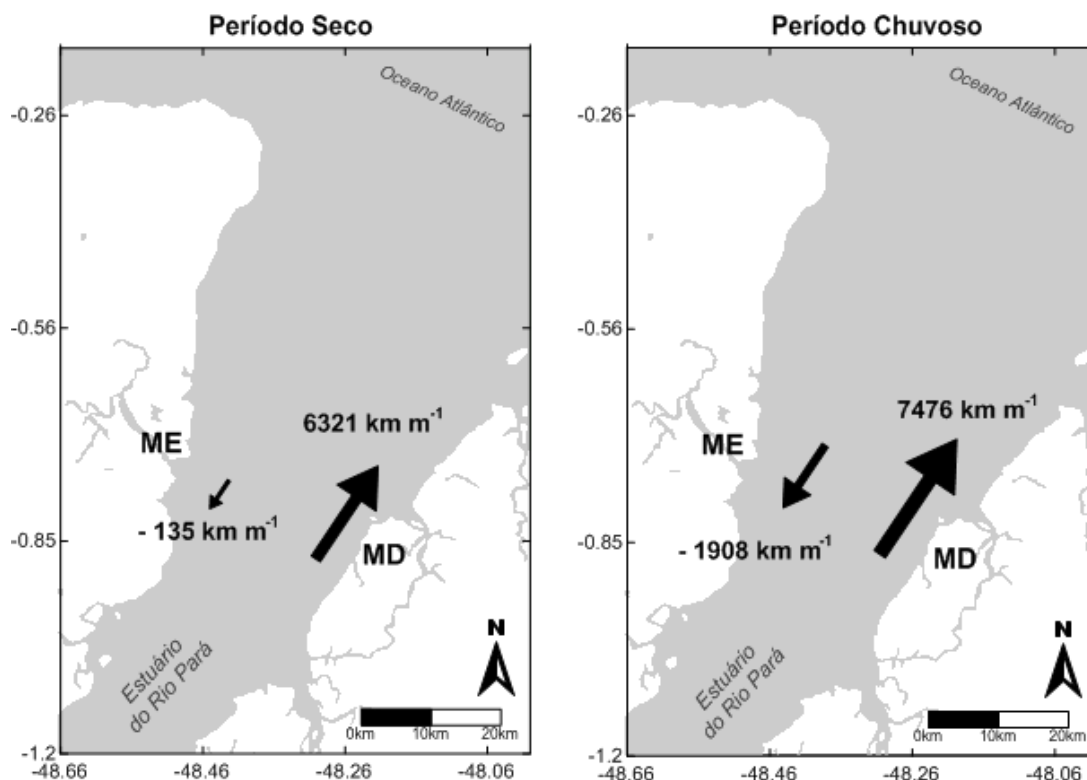


Figura 15 – Balanço dos $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ ao longo do período seco e chuvoso para as margem do ERP. MD e ME referenre as margens direitas e esquerdas, respectivamente.

Fonte: Do autor.

O ERP sofre grande influência da sazonalidade climática. Durante o período de maior precipitação e maior descarga da região, tanto a C_{SLS} quanto o $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ apresentam um aumento significativo. Considerando o aporte externo de SLS, há alguns prováveis ambientes de origem dos sólidos suspensos transportados para o estuário.

Proveniente da contribuição interna ao sistema estuarino, há alguns importantes rios que deságuam no ERP. Costa (2014) Quantificou o aporte hídrico e de MPS para o estuário proveniente de alguns de seus principais tributários, principalmente o rio Pará e Tocantins, considerando dois períodos sazonais. Concluiu que no período seco o aporte de MPS varia entre 7,3 a 9,5 mil toneladas dividida em dois cursos de exportação, uma em direção ao ERP e outra em direção ao rio Amazonas. Entretanto, no período chuvoso

a quantidade de MPS exportada atingiu valores de cerca de 12,5 mil toneladas, tendo o ERP o único destino para esse material.

Entretanto, apesar do aumento significativo da quantidade de sólidos transportados proveniente dos princípios tributários do ERP, há também uma curso de importação, identificado na margem esquerda do estuário. Os resultados sugerem que nessa margem, certa parcela dos sólidos em suspensão podem ser de origem externa sistema estuarino. Lentz & Limerbuner (1995) e posteriormente Mascarenhas *et al.* (2016), observaram variações sazonais na seção leste da pluma do rio Amazonas, próxima a foz do ERP. Concluíram que mesmo na porção mais próxima do ERP, o Rio Amazonas ainda tem grande influência devido as extensas proporções que sua pluma alcança.

Em ambientes estuarinos, a intrusão da maré é uma das principais forçantes responsáveis por transportar e regular as C_{SLS} no estuário. Coleman e Wright (1978) publicaram alguns dos primeiros trabalhos identificando a relação de SLS carregados por macromaré para a parte interna de um sistema estuarino, na parte oeste da Austrália. Posteriormente Allen *et al.* (1980) analisou o aporte de SLS nos estuários de *Gironde* e de *Aulne*, na França, com amplitude de macromaré. Concluiu que um dos principais responsáveis por transportar sólidos suspensos para os estuários era a intrusão da maré, principalmente no estuário de *Aulne*.

Contudo, a ausência de amostras espacialmente e temporalmente mais representativas, acaba inviabilizando a identificação da origem externa dos SLS em ambas as margens. Principalmente na margem esquerda, onde parte desses SLS poderia ser proveniente da pluma do rio Amazonas, transportado através da intrusão da maré no sistema, principalmente nos períodos de maior precipitação e maior descarga das regiões.

Há outros fatores que podem estar relacionados às diferenças laterais observadas no $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ no ERP. Rosário (2016) observou que na entrada do ERP, há uma barreira arenosa que divide o estuário em dois canais principais. A batimetria associada à largura da boca causa diferenças na propagação das marés entre as margens esquerda e direita, bem como diferenças no fluxo do rio. Devido a esse fator, diferenças laterais na variabilidade salina do ERP foram constatadas.

A relação da salinidade e dos sólidos em suspensão está, dentre outros fatores, na floculação dos agregados das partículas que constituem um floco (Schettini 2001). Em termos de floculação salina, essas partículas são formadas através da compensação da carga negativa dos constituintes com a adição de íons positivos presentes na água circundante, em outras palavras, no sal disponível no meio (Schettini 2001).

Portanto, a distribuição espacial e temporal da salinidade no ambiente pode ser um fator a ser levado em consideração, com o objetivo de melhor compreender as variações sazonais e semidiurnas do $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ também. Rosário (2016) analisou a circulação e a distribuição da salinidade na ZM do ERP durante o período de alta e baixa descarga fluvial da região, utilizando quatro pontos de coleta em cada margem, sendo um a 60 km de distancia da foz e outro a 30 km. Observou que os maiores valores de salinidade foram encontrados durante o período de baixa descarga, e os menores durante o período de alta descarga.

Da mesma forma, Schettini (2013), utilizou a mesma correlação considerando marés de sizígia e quadratura, no Estuário de Caravelas. Foi verificada uma relação direta entre a distribuição da salinidade e a concentração de sedimentos em suspensão, alcançando os maiores valores próximos a desembocadura do estuário, principalmente em marés de sizígia (Pereira 2010). Entretanto, a vazão estimada do Estuário de Caravelas combinada de todos a de mais de cinco rios que desaguam nas proximidades, é de cerca de $120 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto do ERP é estimada em $10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Prestes 2016).

De maneira geral, a C_{SLS} no ERP exibiu uma correlação inversa com a distribuição da salinidade. Todos os pontos amostrais apresentaram aumento na C_{SLS} no período chuvoso, devido ao aumento do T_{SLS} para a região (figura 15), com exceção do ponto MD2, que exibiu seus maiores valores durante o período seco, similar ao observado na distribuição da salinidade. Essa fato sugere que para o ERP, as componentes responsáveis por regular a C_{SLS} e o T_{SLS} são também responsáveis pela distribuição da salinidade no estuário, entretanto, em uma correlação inversa.

Em ambientes estuarinos toda a dinâmica dos materiais suspensos na coluna d'água são reguladas por alterações físicas, químicas e biológicas que ocorrem a medida que a água doce é transferida para a zona costeira adjacente e que a água adjacente adentra o sistema (Naudin *et al.* 1997, Postma 1967). Da mesma forma, os sais

suspensos nos estuários apresentam semelhanças nesse comportamento, por possuir reguladores similares ao dos SLS, como descarga do rio, hidrodinâmica e principalmente a influencia do oceano adjacente (Schettini 2001).

4.2 TRANSPORTE DAS CAMADAS SUPERFICIAIS E DE FUNDO

Através da estrutura vertical dos residuais da CSLS e das componentes u da velocidade calculadas por Prestes (2016), foi estimado o transporte de sólidos em suspensão em camadas de fundo ($\langle \overline{T_{SLS(F)}} \rangle$) e em camadas de superfície ($\langle \overline{T_{SLS(S)}} \rangle$), ao longo das 4 estações de coleta no ERP. De forma semelhante, Siegle *et al.* (2009) calculou o transporte de sólidos em suspensão ao longo de perfis longitudinais e verticais no estuário do rio Camboriu (SC), subdividindo os resultados ao longo da coluna d'água em *bottom* e *upper layer*. Desta forma, foi possível observar o transporte em camadas, concluindo que em marés de quadratura o sedimento em suspensão entra no sistema estuarino através do transporte de fundo, próximo ao substrato.

Entretanto, para a estimativa do $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ em diferentes profundidades, as velocidades utilizadas para a realização do cálculo não foram os instantâneos da componente u da velocidade, foram às médias da ao longo de toda a coluna d'água. Com isso, os resultados obtidos não são exatos para todas as profundidades, são valores aproximados aos instantâneos ao longo de cada perfil vertical.

De maneira geral, os resultados obtidos referente ao $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ da margem esquerda não apresentam grande diferença entre as camadas de fundo e superfície, em ambos os períodos sazonais. Portanto, as C_{SLS} ao longo da estrutura vertical da coluna d'água tendem a ser mais homogênea nesta margem (figuras 11, 12 e 13). Entretanto na margem direita, os resultados indicam que o $\langle \overline{T_{SLS(F)}} \rangle$ é maior que $\langle \overline{T_{SLS(S)}} \rangle$. Portanto, as C_{SLS} nesta margem tende a atingir valores mais elevados em camadas próximas ao leito, devido à grande quantidade de sólidos suspensos que são transportado a essas profundidades (figuras 11, 12 e 13).

A figura 16 exhibe os $\langle \overline{T_{SLS(F)}} \rangle$ e $\langle \overline{T_{SLS(S)}} \rangle$, para cada margem, onde é apresentada a lutoclina. Que segundo Ross e Metha (1989), é a faixa limítrofe que divide os sedimentos que estão em suspensão em camadas de fundo e em camadas de superfície, onde é verificado fortes gradientes de concentração de sedimento. De

maneira geral, esta camada se forma quando os perfis residuais da concentração de sedimentos em suspensão e da componentes u da velocidade se cruzam, causando certa vertical da coluna d'água. Dessa forma, acima da lutoclina há a predominância de escoamento turbulento, e abaixo há o domínio de escoamento viscoso, onde se observa as concentrações mais altas de sedimento, com presença de lama fluida em certos casos (Ross & Metha 1989, Vizion & Metha 2001).

Note que os valores apresentados são resultantes, originados do balanço entre os dois pontos da margem direita e esquerda. Resultados negativos indicam entrada da $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ no sistema estuarino, em direção a montante, e positivos representam a saída do ambiente, em direção ao oceano adjacente. Contudo, analisando cada ponto amostral de forma isolada, verifica-se que não houve movimentos verticais bidirecionais. Em outras palavras, os resultados exibidos na margem esquerda durante o período seco, indicam que em superfície, o balanço dos valores de $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ entre ME1 e ME2 foi superior e de sentido contrário ao verificado em camadas de fundo.

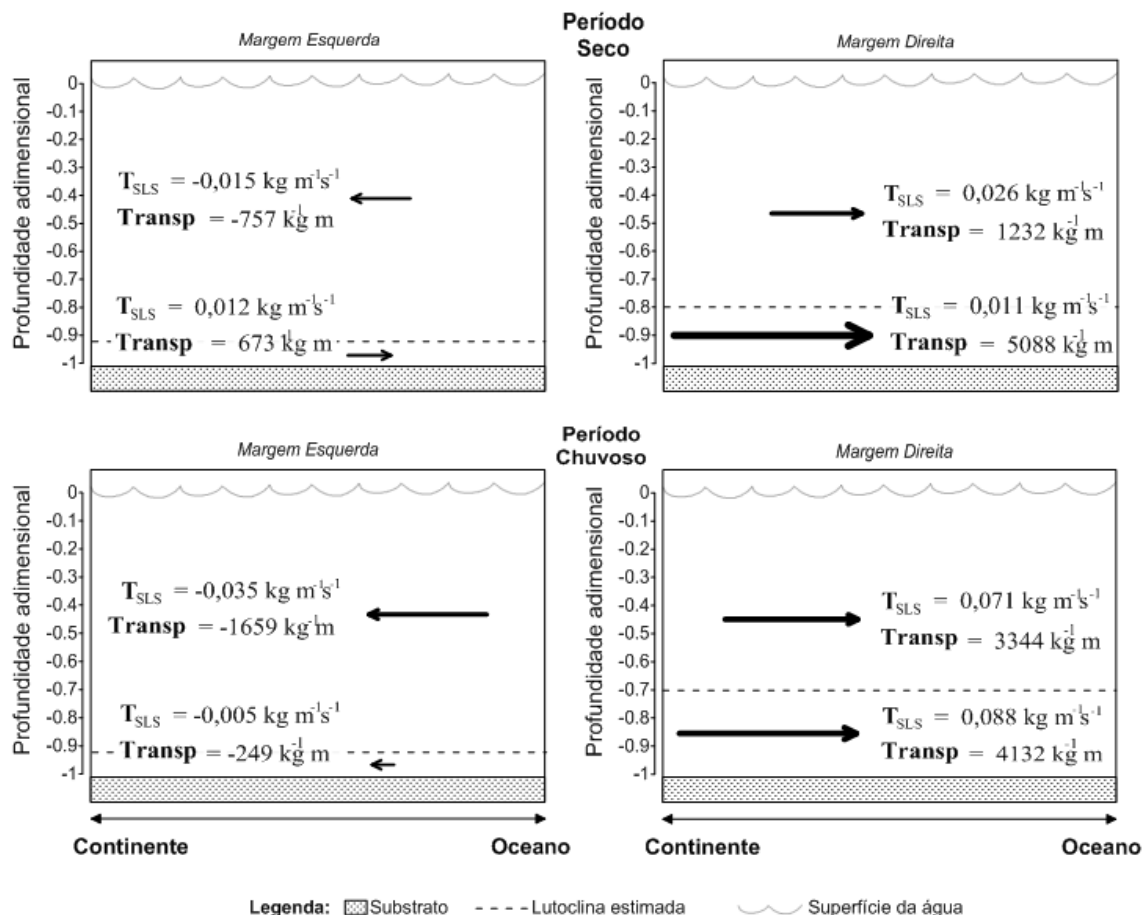


Figura 16 – Esquema representativo para o Transporte de sólidos em suspensão (T_{SLS}) e o transporte de sólidos em suspensão ao longo de um ciclo de maré semidiurno ($Transp$) em camadas de próximas ao fundo e superfície, para ambos os períodos sazonais; setas à esquerda simbolizam o transporte da propriedade em direção a montante do estuário (continente), e setas a direita referentes ao transporte da propriedade em direção a jusante do sistema estuarino (oceano).

Fonte: Do autor.

A lutocline apresenta profundidades diferentes em cada margem, sendo mais rasa na margem direita e mais profunda na margem esquerda. Kineke *et al.* (1996) realizou alguns estudos na região amazônica referente a essa camada limítrofe. Através do projeto AmasSeds (*A Multidisciplinary Amazon Shelf SEDiment Study*), verificou extensas regiões de lama fluida sobre a maior parte da plataforma interna e externa. Entretanto, houve áreas como os setores mais rasos do Cabo Norte, localizado a oeste da foz do rio Amazonas, onde não foi identificada grande estratificação vertical dos sedimentos suspensos. Esse fato foi atribuído aos intensos processos de mistura ao qual esse setor está sujeito, portanto não há a presença de lama fluida e nem formação da lutocline.

Posteriormente, Gabioux (2002) e Gabioux *et al.* (2005), analisaram o comportamento da lama fluida sobre a plataforma continental Amazônica e sua relação com a influencia maré. Observou que entre o Cabo Norte e o Cabo Cassiopre, extremo oeste da foz do rio Amazonas, e na frente da desembocadura do rio Amazonas, há presença de lutoclinas devido a menor influencia da maré. Foram identificadas através de fortes gradientes de concentrações de sedimentos verificados em perfis verticais, e concluiu que nos primeiros metros acima do leito, o escoamento é predominantemente viscoso.

No ERP, Prestes (2016) constatou que na margem esquerda ocorrem misturas predominantemente por advecção, enquanto que na margem direita ocorre principalmente por difusão. Os resultados sugerem que devido aos intensos processos de mistura ao qual margem esquerda está sujeita, a lutoclina é mais profunda nessa margem, por outro lado a margem direita possui uma lutoclina mais rasa, podendo ser em decorrência da predominância de processos difusivos nessa margem.

Outro fator a ser considerado é a natureza de fundo do ERP. Corrêa (2005) analisou a composição do substrato ao longo da ZM do estuário. Na margem esquerda foram encontradas as maiores concentrações de areia, com teores maiores que 50%, e na margem direita houve predominância de silte, onde as porcentagens variam de 30 a 50%. Segundo Ross e Mehta (1989), ambientes com altas concentrações de sedimentos finos suspensos tem como característica a formação de lutoclina. Portanto, os resultados indicam que a presença bem definida da lutoclina na margem direita está em fase com com a distribuição e o transporte da natureza dos sólidos no ERP.

4.3 DIFERENCIAÇÃO LATERAL NO TRANSPORTE DE SÓLIDOS EM SUSPENSÃO

Para investigar a importância da ressuspensão dos sólidos depositados no substrato no controle da distribuição vertical dos SLS, foi utilizada uma correlação entre a concentração de sólidos em suspensão nas camadas de fundo ($C_{SLS(F)}$) e as médias espaciais ao longo da coluna d'água ($\overline{C_{SLS}}$), proposta por Nichols (1984). Determinou-se que os sólidos suspensos presentes no estuário são proveniente da ressuspensão do material depositado no leito ou são transportados de ambientes externos sistema

estuarino. Valores de r^2 considerados altos (acima de 50%), indicam predominância de processos de mistura advectivos. As figuras 17 e 18 apresentam a correlação entre $C_{SLS(F)}$ e $\overline{C_{SLS}}$ para os quatro pontos amostrais e considerando os períodos seco e chuvoso.

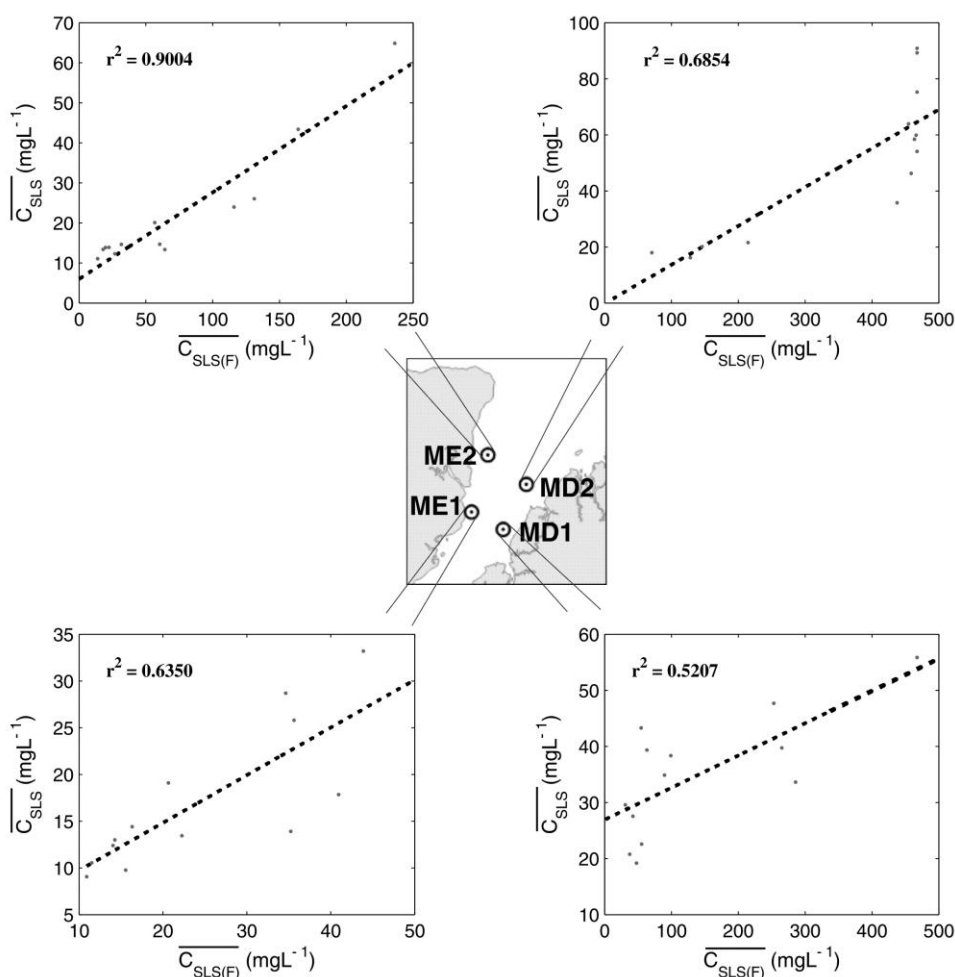


Figura 17 –Regressão linear entre a ($C_{SLS(F)}$) com ($\overline{C_{SLS}}$) para o período seco, e seus respectivos r^2 .
Fonte: Do autor.

No período seco, comparando os dois pontos mais externos (MD2 e ME2) a maior correlação foi encontrada na ME2, cerca de 90%. O mesmo é observado nos pontos mais internos, onde em ME1 foi aproximadamente de 65%. Contudo, no período chuvoso, apesar da margem esquerda ainda possuir uma correlação maior que na margem direita, cerca de 85 %, pontos como ME2 e MD1 apresentaram decréscimo, e MD1 demonstrou o menor valor entre as duas campanhas (figura 18). Siegle *et al.*

(2009) utilizou a mesma analogia para determinar a origem do aporte de sedimento suspensão, no estuário de Camboriú. Concluiu que cerca de 79% do aporte para o sistema estuarino provem do material presente no substrato, devido sua ressuspensão pelas correntes de maré.

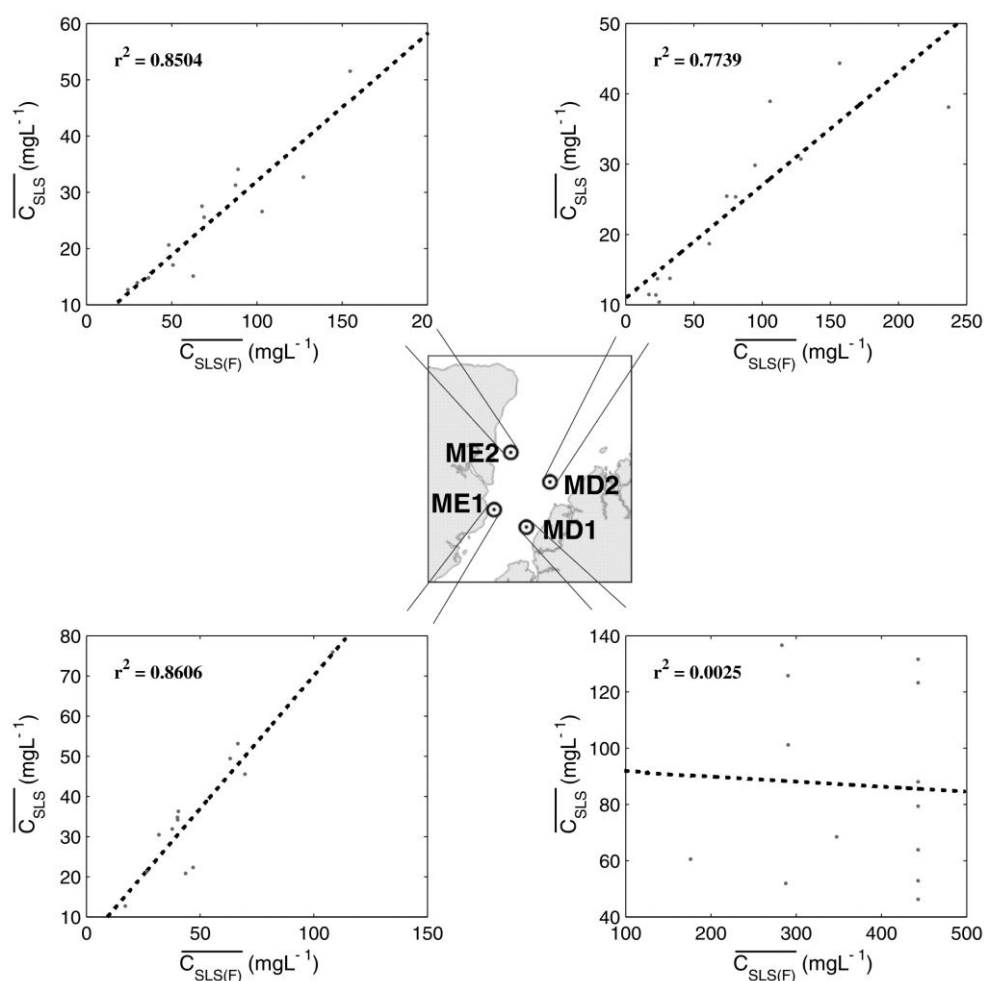


Figura 18 – Correlação linear entre a $(C_{SLS(F)})$ com $(\overline{C_{SLS}})$ para o período chuvoso, e seus respectivos r^2 .

Fonte: Do autor.

Na ZM do ERP, Prestes (2016) analisou processos turbulentos e a mistura vertical através dos números de *Richardson* (Ri) e *Reynolds* (Re), em dois pontos de cada margem do sistema estuarino, um a 45 Km da foz e outro a 60 Km. Concluiu que na margem esquerda há intensas misturas verticais devido aos fluxos turbulentos predominantes nesta margem, enquanto na margem direita os termos viscosos e os

fluxos laminares foram prevalentes. Segundo Miranda *et al.* (2002) a intensidade da turbulência em um estuário controla a distribuição vertical das propriedades de massa.

Desta forma, as diferenças laterais sugerem que na margem esquerda a principal fonte das C_{SLS} transportados para o meio provem do material depositado no substrato, através da ressuspensão. Enquanto que na margem direita, parte dos sólidos suspensos presente na coluna d'água é oriundo de fontes externas aos pontos de coleta.

Da mesma forma, Lee *et al.* (2013) calculou e correlacionou o número de Ri com a CSS no estuário de Han, a leste do mar Amarelo, com domínio de macromaré. Verificou que o grau de estratificação vertical estava em fase com o número de Ri , e concluiu que a CSS era mais bem misturada ao longo da coluna d'água quanto mais próximo Ri ficava 0,25, ou seja, quando o grau de estratificação era menor, semelhante ao observado no ERP.

Um ponto importante segundo Allen *et al.* (1980) é o fato de no estuário de *Gironde* na França, que é dominado por um regime de macromaré, as marés de sizígia tem maior capacidade de ressuspender e transportar sedimentos depositados, do que marés de quadratura. Contudo, a vazão anual do estuário de *Gironde* é estimada em $760 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, ou seja, possui uma grandeza muito menor quando comparado ao ERP, com uma média anual de $10^4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Prestes 2014). Portanto, seria necessário uma malha amostral temporalmente e espacialmente mais significativa para uma melhor compreensão do comportamento dos SLS na ZM do ERP.

De acordo com a análise da composição e granulométrica do substrato ao longo da ZM do ERP, Corrêa (2005) classificou a hidrodinâmica do ambiente segundo o diagrama de Pejrup. Concluiu que a parte oeste do ERP (margem esquerda) há uma morfologia que é formada por um relevo de bancos, coroas e canais, com um sedimento de fundo que varia de areia média a fina, que estão sob ação de um regime hidrodinâmico de maior energia. A parte leste do estuário (margem direita) tem por característica uma morfologia mais suave e com presença de canais, onde a sedimentação varia de silt grosso a fino, que são depositados em regimes de menor energia.

Da mesma forma, Batista (2013) analisou a granulometria do ERP em seu principal canal de navegação, na porção oeste do ERP. Considerando os pontos de

amostragem do presente trabalho, foi observado que na margem esquerda do estuário, a granulometria varia de areia fina a muito fina, com alguma porção de areia média em determinados trechos. Segundo Schettini (2001), considerando a dinâmica dos materiais finos, se um ambiente apresenta condições plenamente turbulentas, é possível a manutenção de elevadas concentrações de material em suspensão, que pode variar de acordo com as condições de escoamento ao longo de um ciclo de maré.

Levando em conta as condições altamente turbulentas na margem esquerda do ERP, onde ocorre intensa mistura vertical por advecção, os resultados indicam que nesta margem há intensa ressuspensão do material depositado ou próximo ao substrato. Corroborando com a análise feita entre a $C_{SLS(F)}$ e a $\overline{C_{SLS}}$, para determinar a fonte dos SLS presente na coluna d'água.

Ainda de acordo com Dyer (1997), levando em conta a granulometria da margem direita, grãos finos e muito finos tendem a se depositar em ambientes energeticamente mais estáveis, onde o processo predominante seja decantação, enquanto que sedimentos com granulometria maior conseguem se depositar em ambientes mais instáveis, com hidrodinâmica mais forte. No entanto, quando o material fino se deposita, devido às propriedades coesivas da argila, é necessário um ambiente com hidrodinâmica mais forte, mais instável, para que haja a remobilização desses grãos causando sua ressuspensão. Portanto, a margem direita exibe uma lutoclina mais espessa devido a esse ambiente esta sujeito a altas concentrações de sedimentos finos suspensos sendo transportados, o que caracteriza a formação de lutoclina, em decorrência dos gradientes da C_{SLS} ao longo da coluna d'água (Ross & Mehta 1989).

As diferenças laterais indicam que não há estratificação vertical na margem esquerda devido a natureza de fundo ser de origem arenosa, depositada em ambientes com alta hidrodinâmica, onde esse sedimento é mais facilmente ressuspendido. Por outro lado, a margem direita possui um regime hidrodinâmico mais estável com predominância de sedimentação de silte.

Diferenças laterais quanto a morfologia também são observadas no ERP. Rosário (2016) observou que na entrada do sistema estuarino, há uma barreira arenosa que divide o estuário em dois canais principais e concluiu que a intrusão da maré geralmente é maior e mais intensa na margem esquerda do estuário.

Portanto, levando em conta as diferenças laterais identificadas quanto ao $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$, $\langle \overline{T_{SLS(F)}} \rangle$, $\langle \overline{T_{SLS(S)}} \rangle$, $\langle \overline{C_{SLS(z)}} \rangle$ e a $\overline{C_{SLS}}$ no ERP, o ERP apresenta uma estrutura lateralmente bidirecional, pois em um mesmo sistema estuarino, enquanto a margem direita exporta SLS para o oceano adjacente, a margem esquerda importa para parte interna ao ambiente. A margem esquerda exibe uma estrutura verticalmente bem misturada e a margem direita verticalmente estratificada, considerando as posições estimada da lutoclina e os transportes de fundo e superfície.

5 CONCLUSÕES

A compreensão dos processos de T_{SLS} é um estudo muito complexo no que tange sistemas estuarinos, por envolver uma série de outras variáveis a serem consideradas a cerca da ambiente. Pela primeira vez foi realizado no ERP uma análise quantitativa envolvendo C_{SLS} e T_{SLS} . O estuário foi estudado verticalmente e longitudinalmente, em um período considerado de alta precipitação e outro de baixa, para quatro pontos amostrais divididos entre as margens.

Sobre os $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ laterais do ERP, concluiu-se que durante o período chuvoso, ambas as margens apresentam um aumento na quantidade de sólidos suspensos transportados para o ambiente. Entretanto, a margem direita exibiu um $\langle \overline{T_{SLS}} \rangle$ rumo ao oceano adjacente, caracterizando exportação, enquanto a margem esquerda apresentou uma contribuição interna para o estuário, caracterizando importação de sólidos. O ERP foi classificado como lateralmente bidirecional.

As análises verticais indicaram grandes C_{SLS} próximos ao substrato na margem direita, e perfis mais bem misturados na margem esquerda. As comparações entre o $\langle \overline{T_{SLS(F)}} \rangle$ e o $\langle \overline{T_{SLS(S)}} \rangle$, indicaram que na margem esquerda, as diferenças entre fundo e superfície são reduzidas quando comparadas com a margem direita. Os maiores valores encontrados próximos ao fundo nesta margem, indicaram grandes C_{SLS} nessa faixa. Contudo, a margem esquerda exibiu padrões diferentes, com os maiores valores observados em camadas superficiais, indicando que neste ponto as C_{SLS} são mais bem misturadas na coluna d'água.

A lutoclina apresentou comportamento sazonal na margem direita, tornando-se mais rasa no período chuvoso. Enquanto que na margem esquerda, não houve diferenças na profundidade entre os período. As diferenças laterais indicadas foram relacionadas ao fato de que na margem esquerda ocorrem misturas por advecção, dificultando a formação da lutoclina, enquanto que na margem direita ocorre principalmente por difusão.

A correlação $\langle C_{SLS(z)} \rangle$ e a $\overline{C_{SLS}}$ indicaram que na margem esquerda, o principal contribuinte dos SLS presentes na coluna d'água é proveniente da ressuspensão do material depositado no leito. Na margem direita, os resultados sugeriram que boa parte da C_{SLS} presente na estrutura vertical desta margem é oriundo de fonte externa,

principalmente no ponto MD1, que durante o período chuvoso, atingiu o menor valor da correlação encontrada na análise.

A margem esquerda apresentou estruturas verticais mais bem misturadas em comparação com a margem direita. De acordo com a natureza de fundo do ERP, a margem esquerda possui hidrodinâmica mais instável que a margem direita, devido a maior quantidade de areia presente no substrato. Indicando que a o material depositado na margem esquerda é mais facilmente ressuspenso, considerando que a margem direita apresenta um teor maior de silt em profundidade.

O T_{SLS} e C_{SLS} foram investigados com algumas limitações, devido à malha amostral não ser espacialmente e temporalmente mais significativa, inviabilizando uma análise mais completa do sistema. Estudos futuros mais específicos, como o cálculo do transporte advectivo de sedimento ou dos transportes instantâneos, deverão ser realizados, com o foco de aprofundar o conhecimento sobre o transporte e o fluxo de sólidos suspensos no ERP, tornando mais tangível essa fronteira entre a ciência e o ambiente.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional De Águas (ANA). 2017. Disponível em <<http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>>. Acesso em: 8 de Março de 2017.
- Agência Nacional De Transportes Aquaviários (ANTAQ). 2010. Disponível em: <http://www.antaq.gov.br/Portal/Portos_PrincipaisPortos.asp>. Acesso em: 14 de Fevereiro de 2017.
- Allen G. P., Salomon J. C., Bassoullet P., Du Penhoat Y., De Grandpré C. 1980. Effects of tides on mixing and suspended sediment transport in macrotidal estuaries. *Sedimentary Geology*. **26**(1 - 3): 69-90.
- Aveline L. C., 1980. Fauna dos manguezais brasileiros. *Revista Brasileira de Geografia*. **42**(2): 786-821.
- Ávila R. A., 2013. *Distribuição do material particulado em suspensão e suas inter-relações com diferentes propriedades no estuário da Lagoa dos Patos*. TS Tese. Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande. 91p.
- Batista A. J. F. 2013. *Construção de mapas de distribuição granulométrica e batimetria do canal do Quiri, Baía do Marajó e Rio Pará-PA*. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 66p.
- Baumgarten M. G. Z., Rocha J. M. B., Niencheski L. F. H. 1996. *Manual de análises em Oceanografia Química*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande, 132p.
- Beardsley R. C., Candela J., Limeburner R., Geyer W. R., Lentz S. J., Belmiro M. C., Cacchione D., Carneiro N. 1995. The M2 tide on the Amazon shelf. *Journal of Geophysical Research*, **100**(2): 2283-2319.
- Cameron W. M., Pritchard D. W. 1963. Estuaries. In: HILL, M. N. (Ed.). *The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Sea*. New York, John Wiley & Sons, p. 306–324.
- Corrêa I. C. S. 2005. Aplicação do diagrama de Pejrup na interpretação da sedimentação e da dinâmica do Estuário da Baía do Marajó-PA. *Pesquisa em Geociências*, **32**(2): 109-118.
- Costa M. S. 2014. *Aporte hídrico e do material particulado em suspensão para a baía do Marajó: influência dos rios Amazonas e Tocantins*. MS Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belém. 83p.
- Coleman J. M., & Wright L. D. 1978. Sedimentation in an arid macrotidal alluvial river system: Ord river, Western Australia. *Journal of Geology*. **86**(5): 621-642. Disponível em: < http://www.jstor.org/stable/30060683?seq=1#page_scan_tab_contents>. Acesso em: 20 de março de 2017.
- Dyer K. R. 1997. *Estuaries: A physical introduction*. John Wiley and Sons, 195p.

El-Robrini M., Silva M. A. M. A., Souza Filho P. W. M., El-Robrini M. H. S., Silva Júnior O. G., França C. F. 2006. Pará. In: Muehe D. (ed). *Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro*. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Brasília. p. 41 – 87.

Emery W. J., Thomson R, E. 2001. *Date analysis methods in physical oceanography*. Newnes, 641p.

Filho J. C. O. 2015. *Hidrodinâmica e transporte de sal e sedimento em suspensão no sistema estuarino da ilha de itapessoca, PE, Brasil*. MS Dissertação, Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 59p.

Gabioux M. 2002. *influência da lama em suspensão sobre a propagação da maré na plataforma amazônica*. TS Tese, Programa de Pós Graduação em Engenharia do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 109p.

Gabioux M., Vizion S. B., Paiva A. M. 2005. Tidal propagation over fluid mud layers on the Amazon shelf. *Continental Shelf Research*. **25**(1): 113-125.

Instituto Nacional De Meteorologia (INMET). 2017. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 6 de Março de 2017.

Kjerfve B. 1987. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: Day J. W., Hall C. A. S., Kemp W. M., Yáñez-Arancibia A. (eds). *Estuarine Ecology*. Jhon Wiley & Sons , New York, p. 47-78.

Kineke G. C., Sternberg R. W., Trowbridge J. H. 1996. Fluid-mud processes on the Amazon continental shelf. *Continental Shelf Research*, **16**(5/6): 667-696.

Lee H. J., Park J. K. Y., Lee S. H., Lee J. M., Kim T. K. 2013. Suspended sediment transport in a Rock-Bound, macrotidal estuary: Han Estuary, eastern Yellow Sea. *Journal of Coastal Research*. **29**(2): 358-371.

Mantovanelli A., Noenberg M. A., Marone E., Silva E. T. 1999. Avaliação da resposta do sensor de turbidez em diferentes concentrações e tamanhos de sedimento e comparação com medições no ambiente. *Boletim Paranaense de Geociências*, **47**(1): 101-109.

Mascarenhas A. C. C., Gomes G. S., Lima A. P. Y., Silva H. K. N., Santana L. S., Rosário R. P., Rollnic M. 2016. Seasonal variations of the amazona river plume with focus on the eastern sector. *Journal of Coastal Research*, **SI**(75): 532-536.

Miranda L. B., Castro M. C., Kjerfve B. 2012. *Princípios de oceanografia de estuários*. Editora da Universidade de São Paulo, 426p.

Mobley C. D. 1995. The optical properties of water. In: Bass M. (ed). *Handbook of Optics: Fundamentals, Techniques and design*, New York, McGraw-Hill and Optical Society of America, p. 1 – 56.

- Moraes A. C. R. 2007. *Contribuição para a gestão da zona costeira do Brasil. Elementos para uma geografia do Litoral Brasileiro*. Editora Annablume, 232 p.
- Moraes B. C., Costa J. M. N., Costa A. C. L., Costa M. H. 2005. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. *Acta Amazônica*, **35**(2): 207-214.
- Naudin J. J., Cauwet G., Chrétiennot-Dinet M. J., Deniaux B., Devenon J. L., Pauc H. 1997. River discharge and wind influence upon particulate transfer at the land-ocean interection: case study of rhone river plume. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. **45**(1): 303-316.
- Nichols M. M. 1984. Effects of fine sediment resuspension in estuaries .In: Mehta A. J. (Ed.). *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*. Berlin, Springer-Verlag, p 5-42.
- Nittrouer C. A., Wright L. D., 1994. Transport of particles across continental shelves. *Reviews of Geophysics*, **32**(1): 85-113.
- Paphitis D. E., Collins M. B. 2005. Sediment resuspension events within the (microtidal) coastal waters of Thermaikos Gulf, northern Greece. *Continental Shelf Research*, **25**(1): 2350-2365.
- Pereira, M. D., Siegle, E., Miranda, L. B., Schettini, C. A. F. 2010. Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão sazonal em um estuário dominado por maré: Estuário de Caravélas (BA). *Revista Brasileira de Geofísica*. **28**(3): 427-444.
- Perillo G. M. E. 1995. Definitions and Geomorphologic Classification of Estuaries. *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. **53**(1): 17-47.
- Postma H. 1967. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. *American Association for the Advancement of Science*. **83**(1): 158 - 179.
- Prestes Y. O. 2016. *Interações físicas entre o estuário do rio Pará e a plataforma continental no norte do Brasil*. MS Dissertação, Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 122p.
- Prestes Y. O., Rosário R. P., Rollnic M. Souza M. 2014. Volume transport in the tidal limit of the Pará River, Brazil. In: Proceedings of the 17th Physics of Estuaries and Coastal Seas (PECS) conference, Porto de Galinhas. *Anais*. p.19-24.
- Rosário R. P., 2016. *Análise de processos oceanográficos no estuário do rio Pará*. TS Tese, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 139p.
- Rosário R. P., Borba T. A. C., Santos A. S., Rollnic M. 2016. Variability of salinity in Pará River Estuary: 2D analysis with flexible mesh model. *Journal of Coastal Research*. **SI**(75): 128-132.
- Ross M. A., & Metha A. J., 1989. On the Mechanics of Lutoclines an Fluid Mud. *Journal of Coastal Research*, **SI**(5): 51-61. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/25735365?seq=1#page_scan_tab_contents>. Acesso em: 20 de março de 2017.

- Schettini C. A. F., Almeida D. C., Siegle E., Alencar A. C. B. 2010. A snapshot of suspended sediment and fluid mud occurrence in a mixed-energy embayment, Tijucas Bay, Brazil. *Geology Marine Lett*, **30**(1): 47-62.
- Schettini, C. A. F., Pereira, M. D., Siegle, E., Miranda, L. B., Silva, M. P. 2013. Residual fluxes of suspended sediment in a tidally dominated tropical estuary. *Continental Shelf Research*. **70**(1): 27-35.
- Schettini C. A. F. 2001. *Dinâmica de sedimentos finos no estuário do rio itajaí-Açu-SC*. TS Tese. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 85p.
- Siegle E., Schettini C. A. F., Klein A. H. F., Toldo Junior E. E. 2009. Hydrodynamics and suspended sediment transport in the camboriú estuary – Brazil: pre jetty conditions. *Brazilian Journal Oceanography*. **57**(2): 123-135.
- Silva I. O., 2009. *Distribuição da Vazão Fluvial no Estuário do Rio Amazonas*. MS Dissertação. Programa de Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 106p.
- Souza R. R. 2006. *Modelagem Numérica Da Circulação De Correntes De Maré Da Baía Do Marajó E Rio Pará (PA)*. MS Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 180p.
- Vinzon S. B., Mehta A. J. 2001. Boundary layer effects due to suspended sediment in the Amazon River estuary. In: McAnally, W.H. & Mehta A.J. *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes, Marine Science 3*, Elsevier, p. 359-373.