

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E ECOLOGIA
METRADO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL

Rodolfo Teixeira Alves

Dinâmica Sedimentar no Sistema Estuarino do Piraquê-Açu - Aracruz/ES

Orientadora: Valéria da Silva Quaresma

**Vitória
Julho de 2018**

RESUMO

Estuários são ambientes costeiros de enorme importância ambiental, social e econômica. No contexto da dinâmica sedimentar, estes ambientes atuam principalmente como exportadores de sedimento para a plataforma, porém em algumas situações, eles também podem importar material para dentro do sistema. Dentre os principais estuários do estado do Espírito Santo, o Sistema Estuarino do Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim (SEPAPM) destaca-se por possuir a maior área de manguezal do estado (Barroso, 2004). Inúmeros artigos enfocam as características biológicas, químicas, físicas e sedimentológicas desse ambiente (Barroso, 2004; Neves, 2010; Melado, 2011; Leite, 2012; Silva et al., 2013; Monteiro, 2015, dentre outros). Entretanto, ainda há poucas informações sobre a dinâmica sedimentar do SEPAPM. Dessa maneira, o presente trabalho tem como objetivo principal estimar o balanço sedimentar total na seção inferior do estuário sob diferentes condições de maré (sizígia e quadratura) e de vazão fluvial (período seco e chuvoso), assim como avaliar sua contribuição sedimentar para a plataforma. Utilizando dados coletados *in situ* de corrente, temperatura, salinidade e material particulado em suspensão, foi analisado o comportamento hidrodinâmico dentro do sistema estuarino, bem como a quantificação da carga total de sedimento transportado através de equações de carga de fundo e carga em suspensão propostas por Van Rijn (2007). De um modo geral, o estuário apresentou uma fraca estratificação da coluna d'água, caracterizado, portanto, por um processo de mistura por difusão turbulenta. Fato esse observado através do cálculo do *Número de Richardson por camada* (Ri_L), cujos valores ficaram inferiores a 20. A exceção foi o braço norte do estuário (rio Piraquê-Açu), que durante as quadraturas apresentou a formação de uma cunha salina e Ri_L superior a 20, sendo caracterizado pelo processo dominante de mistura por entranhamento (*entrainment*). Em relação ao balanço sedimentar, o estuário se comportou como exportador de sedimento em quase todas as campanhas realizadas, com exceção do período de sizígia chuvoso, onde houve importação de sedimento. O transporte de carga em suspensão foi superior ao transporte de carga de fundo em todas as campanhas analisadas, e os períodos de sizígia apresentaram maiores volumes de transporte em relação aos períodos de quadratura. Anualmente, calcula-se que o SEPAPM seja responsável por exportar aproximadamente 10,5 toneladas de sedimento para a plataforma.

Lista de Figuras

Figura 1. Localização do Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim.....	7
Figura 2. Mapa de granulometria média do SEPAPM e plataforma adjacente.	8
Figura 3. Mapa batimétrico do SEPAPM.	10
Figura 4. Pontos de amostragem da desembocadura do SEPAPM.	10
Figura 5. Índice pluviométrico do município de Aracruz, 2010.	13
Figura 6. Variação da maré durante as quatro campanhas amostrais no SEPAPM.	13
Figura 7. Salinidade e Temperatura no rio Piraquê-Açu.	14
Figura 8. Velocidade e Direção das correntes no rio Piraquê-Açu.	15
Figura 9. Variação da concentração de MPS na coluna d'água no rio piraquê-açu.	16
Figura 10. Número de Richardson por Camada (Ri_L) no rio piraquê-açu.	16
Figura 11. Transporte de sedimento no rio piraquê-açu.	17
Figura 12. Salinidade e Temperatura no rio Piraquê-Mirim.	19
Figura 13. Velocidade e Direção das correntes no rio piraquê-mirim.....	19
Figura 14. Variação da concentração de MPS na coluna d'água no rio piraquê-mirim.	21
Figura 15. Número de Richardson por Camada (Ri_L) no rio Piraquê-Mirim.	21
Figura 16. Transporte de sedimento no rio Piraquê-Mirim.	22
Figura 17. Salinidade e Temperatura na quadratura seca da desembocadura.	24
Figura 18. Salinidade e Temperatura na sizígia seca da desembocadura.	25
Figura 19. Salinidade e Temperatura na quadratura chuvosa da desembocadura.	26
Figura 20. Salinidade e Temperatura na sizígia chuvosa da desembocadura.....	26
Figura 21. Velocidade e Direção das correntes na quadratura seca da desembocadura.	27
Figura 22. Velocidade e Direção das correntes na sizígia seca da desembocadura.	28
Figura 23. Velocidade e Direção das correntes na quadratura chuvosa da desembocadura.	29
Figura 24. Velocidade e Direção das correntes na sizígia chuvosa da desembocadura.	29
Figura 25. Variação da concentração de MPS na quadratura seca da desembocadura.	30
Figura 26. Variação da concentração de MPS na sizígia seca da desembocadura.	31
Figura 27. Variação da concentração de MPS na quadratura chuvosa da desembocadura.	31
Figura 28. Variação da concentração de MPS na sizígia chuvosa da desembocadura... ..	32
Figura 29. Número de Richardson por Camada na Quadratura Seca da desembocadura.	32
Figura 30. Número de Richardson por Camada na Sizígia Seca da desembocadura.	33
Figura 31. Número de Richardson por Camada na Quadratura Chuvosa da desembocadura.	33
Figura 32. Número de Richardson por Camada na Sizígia Chuvosa da desembocadura.	33
Figura 33. Transporte de sedimento na quadratura seca da desembocadura.	34
Figura 34. Transporte de sedimento na sizígia seca da desembocadura.	35
Figura 35. Transporte de sedimento na quadratura chuvosa da desembocadura.....	36
Figura 36. Transporte de sedimento na sizígia chuvosa da desembocadura.	37
Figura 37. Transporte de carga de fundo no SEPAPM.	42
Figura 38. Transporte de carga em suspensão no SEPAPM.	45
Figura 39. Transporte de carga total de sedimento no SEPAPM.	47

Lista de Tabelas

Tabela 1. Taxas de transporte de carga em suspensão, carga de fundo e carga total para cada campanha.....	41
---	----

Sumário

1. Introdução.....	6
1.1. Estuários e Dinâmica Sedimentar.....	6
1.2. Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim	7
3. Materiais e Métodos	9
4. Resultados.....	12
4.1. Braço Norte (rio Piraquê-Açu)	13
4.2. Braço sul (rio Piraquê-Mirim)	18
4.3. Seção Inferior (Desembocadura)	23
5. Discussão	38
5.1. Transporte de carga de fundo (Q_b).....	41
5.2. Transporte de carga em suspensão (Q_s)	44
5.3. Transporte de carga total (Q_t).....	46
6. Conclusão	49
Bibliografia.....	51

1. Introdução

1.1. Estuários e Dinâmica Sedimentar

Existem diversas definições para estuários, que variam de acordo com o interesse de estudo. Uma das mais utilizadas com foco em sedimentologia é a de Dalrymple et al. (1992) que os define como ambientes que recebem sedimentos a partir do rio e do mar, e por isso podem ser classificados segundo suas fácies sedimentares influenciadas por processos fluviais e marinhos.

Contudo, tentar enquadrar um estuário ou bacia costeira em qualquer tipo de classificação não é tão simples. A maioria destes ambientes pode apresentar diferentes comportamentos, dependendo de variações da maré (enchente, vazante, sizígia e quadratura), da descarga fluvial (períodos seco e chuvoso) e de forçantes atmosféricas (ventos). Além disso, o sistema pode variar sua estratificação diariamente ou ao longo do ano, apresentando padrões de circulação diferentes (Miranda et al., 2002).

Estuários são historicamente regiões com ampla variedade de atividades humanas, ideais para o estabelecimento de portos, complexos industriais e centros urbanos. Atividades pesqueiras, recreação e turismo também ocorrem nestes ambientes, sendo importante fonte de sustento de inúmeras famílias (Miranda et al. 2002).

O estudo da sedimentologia estuarina tem um importante papel na compreensão da ecologia desse ecossistema. De acordo com Gartner (2004), o sedimento de fundo em estuários tem função de habitat para organismos bentônicos, assim como também são indicadores de nutrientes e metais tóxicos, tais como pesticidas e metais que são adsorvidos pelas partículas de sedimento. Assim, o sucesso reprodutivo de muitas espécies de peixes e crustáceos está associado à granulometria dos sedimentos presentes no leito do canal e nos bancos arenosos (Poore et al., 2014). Já o material que se encontra em suspensão pode afetar a fotossíntese pela limitação da penetração de luz, ocasionando a morte de espécies por eutrofização (Gartner, 2004; Alves et al., 2013).

Segundo Dyer (1995), os estuários funcionam como um filtro para materiais particulados e dissolvidos na água carreados pelos rios na descarga continental com destino final o mar. Dessa forma, eles também têm uma importante função no transporte e distribuição de propriedades nas regiões costeiras.

A circulação estuarina é essencialmente governada pelas variações horizontais no gradiente de pressão, causadas pelas diferenças de densidade da água (componente baroclínica) e pela oscilação periódica da maré (componente barotrópica), criando complexo padrão de fluxos ao longo desses sistemas (Dyer, 1997). Quando se objetiva estudar as características da circulação estuarina e avaliar a contribuição dos processos e mecanismos a ela relacionados, as análises se baseiam principalmente na estratificação de densidade da água e nos regimes de fluxo das correntes. A definição do local de origem das partículas e a quantificação da contribuição das fontes marinha e/ou continental são essenciais para o entendimento do papel da circulação estuarina, bem como a caracterização de um sistema como retentor ou exportador para a zona costeira (Dyer, 1995; Zem, 2008). Portanto, a hidrodinâmica de um estuário é o resultado da interação entre a morfologia da bacia estuarina, o aporte fluvial e o regime de marés (D'Aquino et al., 2011).

O transporte sedimentar pode ser definido como o transporte de partículas com tamanhos na faixa de 0,05 a 2 mm, como as encontradas em leitos de rios, estuários e águas costeiras (van Rijn, 1993). De acordo com Nichols e Biggs (1985), o transporte de sedimento no estuário pode ocorrer como carga de fundo ou em suspensão. Os modos

de transporte diferem de acordo com a forma de transmissão da energia das partículas. O transporte de carga de fundo ocorre numa fina camada com espessura equivalente ao diâmetro do grão ou em contato próximo ao fundo. A energia é transmitida no contato entre os grãos através de movimentos de rastejamento, rolamento e saltação. No transporte de carga em suspensão, a energia é transmitida pela turbulência da água, movendo-se mais rápido do que a carga de fundo.

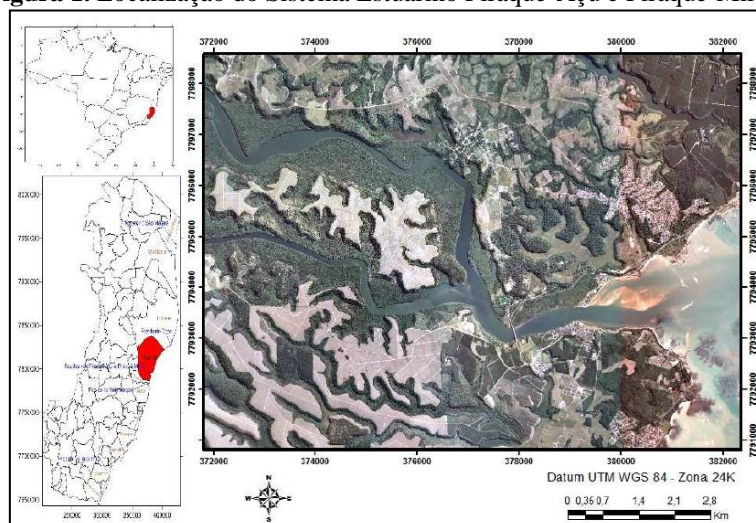
Nittrouer e Wright (1994) acrescentam que estes dois tipos de transporte são controlados e modificados por processos gravitacionais, difusivos e advectivos, tais como a velocidade das correntes, a densidade do fluido, a granulometria do sedimento, além de formas de fundo e das influências biológicas.

1.2. Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim

O Sistema Estuarino do Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim (SEPAPM) está localizado no município de Aracruz, e tem grande importância ambiental por possuir a maior área de manguezal do estado (Barroso, 2004). Apresenta uma forma de “Y”, com sua desembocadura com orientação O-E, e os seus braços norte e sul dispostos em direção NO e O, respectivamente (Figura 1). O estuário também se destaca por possuir um banco arenoso na desembocadura do estuário (Neves, 2013; Silva et al., 2013).

De acordo com Suguio et al. (1985), o estuário do rio Piraquê teve sua origem pelo afogamento de vales de rios durante a última elevação do nível do mar, no período quaternário. O SEPAPM é morfologicamente controlado por depósitos Neogênicos, representados pela Formação Barreiras (Silva et al., 2013).

Figura 1. Localização do Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim.



Fonte: Neves (2010).

Mendonça e Oliveira (2007) classificam o clima da região como tropical úmido-seco, que apresenta grande associação sazonal entre a temperatura e umidade. Anualmente a precipitação é menor que 1300 mm, apresentando, normalmente, período chuvoso entre os meses de outubro e março, e período seco entre os meses de abril e setembro.

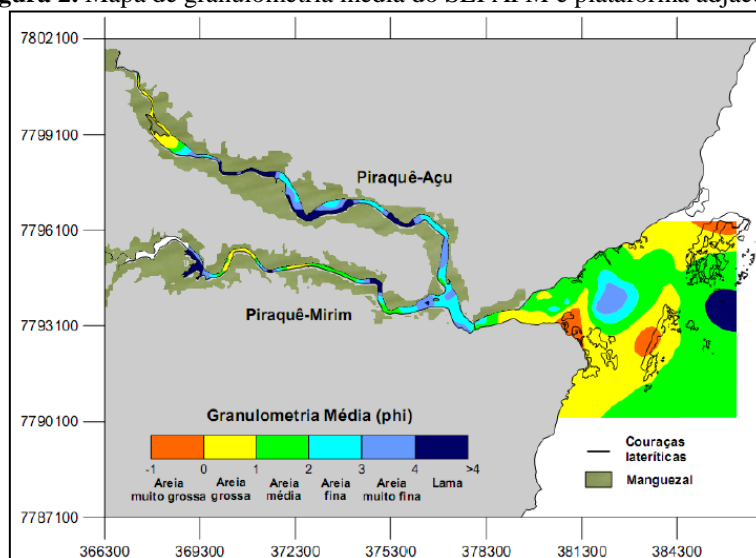
Segundo Albino et al. (2016) e Oliveira e Quaresma (2017), há um predomínio dos ventos alísios de NE na região, com intensos ventos de SE durante a entrada de frentes frias. Isto tem efeito direto nos principais setores de origem das ondas no litoral capixaba, que possuem direções predominantes de NE-E e SE-E, correspondendo ao padrão de circulação dos ventos da região. Já o regime de maré encontrado no litoral

capixaba é classificado como semidiurna e micromaré (< 2 m), com uma amplitude variando entre 1,4-1,5 m.

Barroso (2004), analisando a escala vertical de salinidade do SEPAPM, classificou o rio Piraquê-Açu como um estuário do tipo cunha salina, o rio Piraquê-Mirim como um estuário do tipo verticalmente homogêneo, e a porção da confluência até a foz como um estuário do tipo parcialmente estratificado, com presença de uma fraca haloclina. Entretanto, Neves (2010), ao estudar os braços deste estuário, afirma que o rio Piraquê-Açu apresenta uma pycnoclina bem definida nos primeiros 2 metros de profundidade apenas nos períodos de quadratura, enquanto nos períodos de sizígia sua coluna d'água permanece totalmente misturada. Melado (2011) confirmou resultados de Barroso (2004), ao observar uma fraca estratificação da coluna d'água na seção inferior da desembocadura, com uma mistura parcial da coluna d'água durante a quadratura, e totalmente misturada nas sizígias. Os braços norte e sul do estuário caracterizam-se por águas mais quentes, enquanto da confluência até a foz a água tende a ser ligeiramente mais fria (Silva, 2014).

Silva et al. (2013) observaram uma dominância tanto no estuário como na plataforma adjacente de sedimentos médios e finos, ficando os sedimentos grossos restritos a algumas regiões mais energéticas ou próximo a sua área fonte (figura 2). No mesmo trabalho, constatou-se uma passagem de um ambiente com domínio terrígeno, representado pelas classes de areias litoclásticas e litobioclásticas, para um ambiente de domínio marinho, representado pelas classes de areias biolitoclásticas e bioclásticas.

Figura 2. Mapa de granulometria média do SEPAPM e plataforma adjacente.



Fonte: Silva (2012).

Um importante aspecto geomorfológico presente na desembocadura desse estuário é a presença de terraços de abrasão (couraças lateríticas) próximo a isóбата de 15 metros. Segundo Albino et al. (2016), estas feições interferem intensamente na dinâmica local, sendo responsável pelo baixo transporte longitudinal de sedimentos, e pela dissipação de energia das ondas.

Apesar de estudos pontuais no estuário e região costeira, a influência do SEPAPM na plataforma continental adjacente ainda é pouco conhecida. Os principais trabalhos na área são recentes, abrangendo tópicos de aquicultura, dinâmica sedimentar, geoquímica e geofísica (Barroso, 2004; Boni, 2010; Franco, 2010; Neves, 2010;

Melado, 2011; Leite, 2012; Neves, 2013; Silva et al., 2013; Silva, 2014; Monteiro, 2015).

Estudos sobre transporte sedimentar estuarino ajudam a avaliar as contribuições marinha e continental, permitindo entender melhor o papel da circulação no processo de transferência de materiais para a zona costeira, além de auxiliar na compreensão da evolução da linha de costa e plataforma continental adjacente (Mantovanelli et al., 2003; Neto, 2010; D'Aquino et al., 2011). Além disso, também dão subsídios para estudos de navegação, poluição, ciclos biogeoquímicos, dentre outros (Lobo et al., 2004; Garonce e Quaresma, 2014; Bertoldi, 2014; Mayerle et al., 2015).

Portanto, o objetivo do presente estudo é estimar o balanço sedimentar total na seção inferior do Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim (SEPAPM) sob diferentes condições de maré e vazão fluvial, e sua contribuição sedimentar para a plataforma. Para tal, foi necessário analisar o comportamento hidrodinâmico dentro do sistema estuarino, bem como quantificar a carga total de sedimento transportado entre os braços norte e sul e a desembocadura do SEPAPM através de equações próprias de transporte de sedimento, utilizando dados coletados in situ de corrente, temperatura, salinidade e material particulado em suspensão.

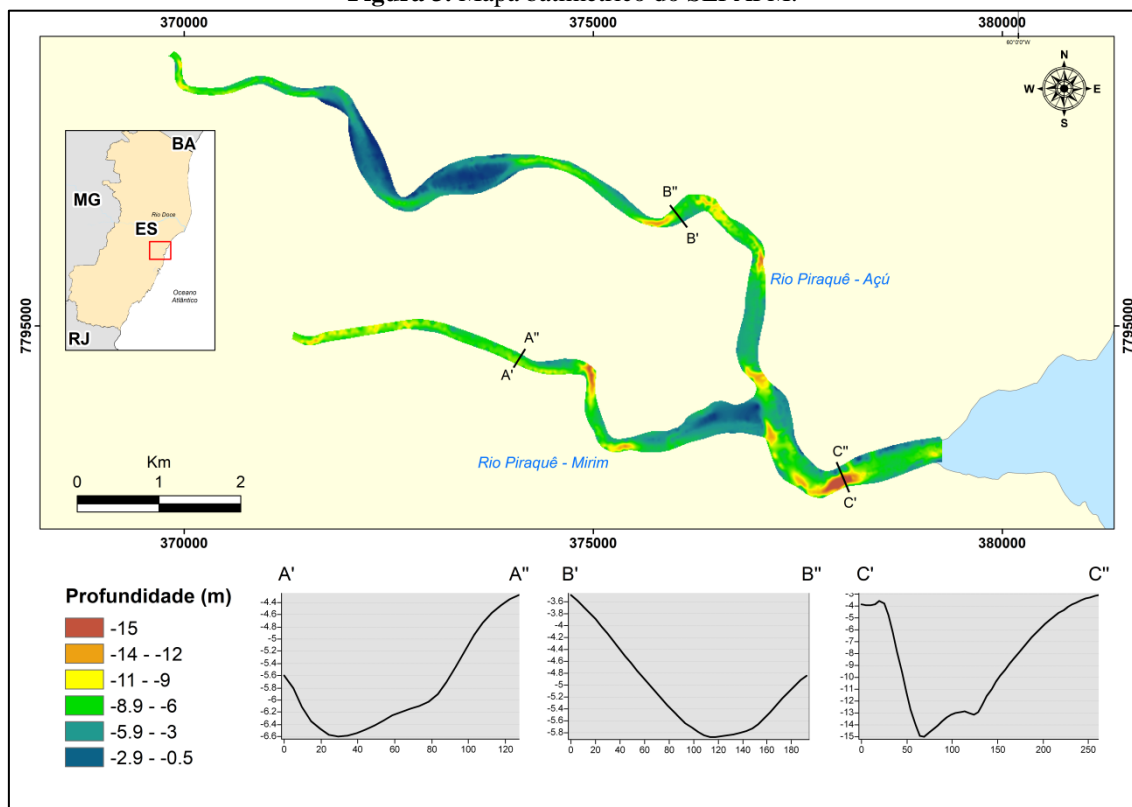
3. Materiais e Métodos

Para realização deste trabalho, foram analisados dados hidrodinâmicos e sedimentares do Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim (SEPAPM) obtidos do projeto “Processos geoquímicos, físicos e sedimentares de um estuário com múltiplos usos do seu entorno”, realizado em 2010, pelo Laboratório de Geologia Marinha do Departamento de Oceanografia da UFES.

O projeto consistiu de campanhas oceanográficas no SEPAPM que visaram analisar os períodos seco e chuvoso, durante marés de quadratura e sizígia. Os levantamentos foram realizados nos meses de fevereiro, março e julho de 2010. Selecionaram-se três pontos de amostragem, de forma que a parte central e desembocadura do estuário fossem analisadas (figura 3). O primeiro ponto ficou no braço norte (Piraquê-açu), o segundo no braço sul (Piraquê-mirim) e o terceiro na seção inferior da desembocadura. Nos dois braços, devido à forma de fundo em “U”, foram fundeados ADPs, enquanto na seção inferior, próximo à desembocadura, foram realizados perfis transversais com um ADP acoplado a uma embarcação. Isso ocorreu devido às diferenças morfológicas entre os braços do sistema e a desembocadura. A parte inferior do estuário, além de mais larga (250 metros), apresenta um canal profundo na margem sul, e um leito 3 vezes mais raso na margem norte (Silva et al., 2013), o que poderia levar à diferenças no comportamento hidrodinâmico.

A coleta de dados hidrodinâmicos foi realizada simultaneamente nos 3 pontos amostrais. Cada campanha teve uma duração de 13 horas, correspondendo a um ciclo de maré da região. Nos dois braços, devido ao perfil transversal ser em formato de U, optou-se por fundear perfiladores acústicos do tipo ADP, sendo um modelo da Nortek AS Aquadopp (2 MHz) no braço norte, e o outro um modelo da Sontek XR Argonaut (1,5 MHz) no braço sul. Na seção inferior da desembocadura, utilizou-se um ADP modelo M9 River Surveyour da Sontek (3 MHz) acoplado a uma embarcação, fazendo perfis transversais ao longo do dia.

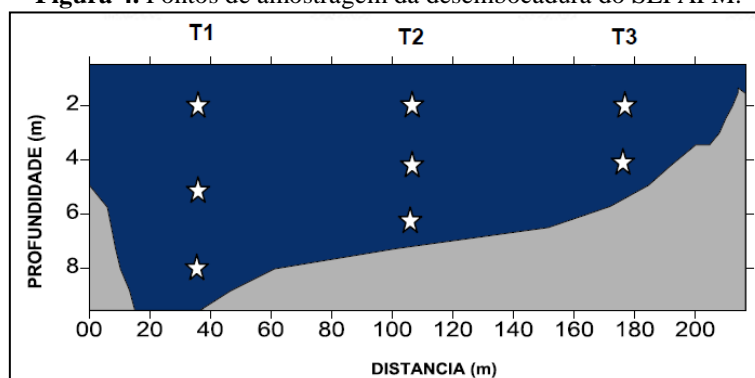
Figura 3. Mapa batimétrico do SEPAPM.



Perfil A (rio Piraquê-Mirim), Perfil B (rio Piraquê-Açu) e Perfil C (seção inferior da desembocadura).

Dados de salinidade e temperatura foram coletados com o auxílio de sensores CTD. Nos braços do rio foram utilizadas uma sonda modelo RBR XR-620CTDmF (6 Hz) e outra modelo da Falmouth Scientific. Na desembocadura utilizou-se um OBS 3A – Campbell Scientific. Os sensores foram perfilados na coluna d'água a cada hora, da superfície ao fundo, perfazendo um ciclo de maré. No caso da desembocadura, devido a sua extensão, dividiu-se a seção em 3 pontos amostrais (figura 4): um na margem sul, onde fica o canal profundo, outro na seção intermediária do rio, e o terceiro na margem norte, onde é mais raso.

Figura 4. Pontos de amostragem da desembocadura do SEPAPM.



T1 representa a margem sul, T2 a seção intermediária e T3 a margem norte. **Fonte:** Melado (2011)

Além das análises físico-químicas, amostras de água em três profundidades diferentes (0,5 m abaixo da superfície, meio da coluna d'água e cerca de 0,5 m acima do fundo) foram coletadas a cada hora, tanto nos rios quanto na desembocadura, para posterior análise de material particulado em suspensão.

Os dados brutos obtidos com os ADPs foram processados, obtendo-se informações de hora, profundidade, velocidade e direção das correntes, sinal de retorno (SNR), assim como dados de trajeto percorrido, no caso da desembocadura. Com os perfiladores CTD foram extraídos dados de salinidade e temperatura de acordo com a profundidade. A partir destes dados, obtiveram-se os valores de densidade, os quais foram calculados utilizando a equação de estado da água do mar à pressão atmosférica $p = p(S,T)$. A água coletada foi filtrada pelo método de Strickland e Parsons (1972), separando a fração particulada através de membranas de fibra de vidro de 0,45 μm . Por último, dados sedimentológicos (d_{50}) foram obtidos do trabalho de Silva et al. (2013).

A calibração dos dados de MPS nas campanhas amostrais foi feita pelo método de correlação e regressão linear de Pearson com os dados de retorno de sinal do ADP (Moura et al., 2010). Esse método analisa a relação entre valores de duas variáveis no eixo cartesiano x e y , obtendo-se uma reta de ajuste à dispersão dos valores, um coeficiente de correlação r^2 indica a intensidade da correlação entre as variáveis, sendo mais fortemente correlacionadas quando o valor de r^2 estiver próximo de 1, e fracamente correlacionável (ou sem correlação) quando o valor de r^2 estiver próximo a 0 (Correa, 2003).

Após o processamento dos dados, analisou-se a estratificação da coluna d'água pelo *Número Adimensional de Richardson por Camada* (Ri_L). Dyer (1982) propôs limites práticos para este número de acordo com os regimes de mistura, sendo assim, quando: $Ri_L > 20$, a turbulência gerada pelo fundo foi incapaz de diminuir a estratificação, dando origem aos estuários estratificados; $20 > Ri_L > 2$, a mistura está crescendo ativamente, como acontecem nos estuários parcialmente misturados; $Ri_L < 2$, ocorre uma mistura completa da coluna d'água, caracterizando os estuários bem misturados.

O *Número de Richardson por camada* é dado por:

$$Ri_L = (g h \delta\rho)/(\bar{u}^2 \rho)$$

Sendo g a aceleração da gravidade, h a profundidade do local, \bar{u} a velocidade média da coluna d'água, $\delta\rho$ a diferença entre a densidade do fundo e da superfície e ρ a densidade média da coluna d'água.

O *Número de Richardson por Camada* também pode ser um indicativo do processo dominante de mistura, o qual indica a estabilidade do fluxo. Para valores maiores que 0,25, o processo de mistura é por entranhamento (entrainment), enquanto que valores menores que 0,25, o processo dominante se dá por difusão turbulenta (Dyer, 1997). Em suma, o Ri_L demonstra a importância relativa entre a força estabilizadora da coluna d'água (o gradiente vertical de densidade) e a força desestabilizadora da coluna d'água (o cisalhamento da velocidade).

Em uma terceira etapa, para cálculo de carga total e balanço sedimentar, foram calculados os transportes em suspensão e carga de fundo através das fórmulas de van Rijn (2007a, 2007b, 2016).

As fórmulas de van Rijn (2007a, 2007b, 2016) foram escolhidas devido a sua simplicidade, e por terem sido estudadas em condições próximas das encontradas no estuário do SEPAPM. As fórmulas de carga em suspensão e de fundo foram desenvolvidas para ambientes sem influência de ondas, fluxos oscilatórios, diâmetros das partículas variando entre 130 e 970 μm , e velocidades de até 1,8 m/s.

A equação de transporte de carga de fundo simplificada por van Rijn (2007a) em condições de correntes apenas, é dada por:

$$Q_b = \alpha_b \rho_s U h (d_{50}/h)^{1,2} (Me)^\eta$$

Onde Q_b é o transporte de carga de fundo (kg/s/m), ρ_s a densidade do sedimento (kg/m³), U a velocidade média na coluna d'água (m/s), h a profundidade (m), d_{50} o tamanho médio da partícula (m), α_b e η são constantes, valendo 0,015 e 1,5, respectivamente, e Me o parâmetro de mobilidade (m), sendo calculado por:

$$Me = (U - U_{cr}) / [(s-1) g d_{50}]^{1/2}$$

Sendo U_{cr} a velocidade crítica para o início do movimento (m/s), s a densidade específica e g a gravidade (m/s²).

Já a equação de transporte de sedimento em suspensão simplificada por van Rijn (2007b, 2016), utilizando dados de Soulsby (1997), é dada por:

$$Q_s = \alpha_s \rho_s U d_{50} Me^{2,4} (D_*)^{-0,6}$$

Onde α_s é uma constante de valor 0,015, e D_* o tamanho adimensional da partícula, medido por:

$$D_* = d_{50} [(s-1) g / \nu^2]^{1/3}$$

Onde ν é a viscosidade dinâmica (m²/s).

Dessa forma, para calcular o transporte total de sedimento, basta somar os valores de transporte de carga em suspensão (Q_s) e carga de fundo (Q_b):

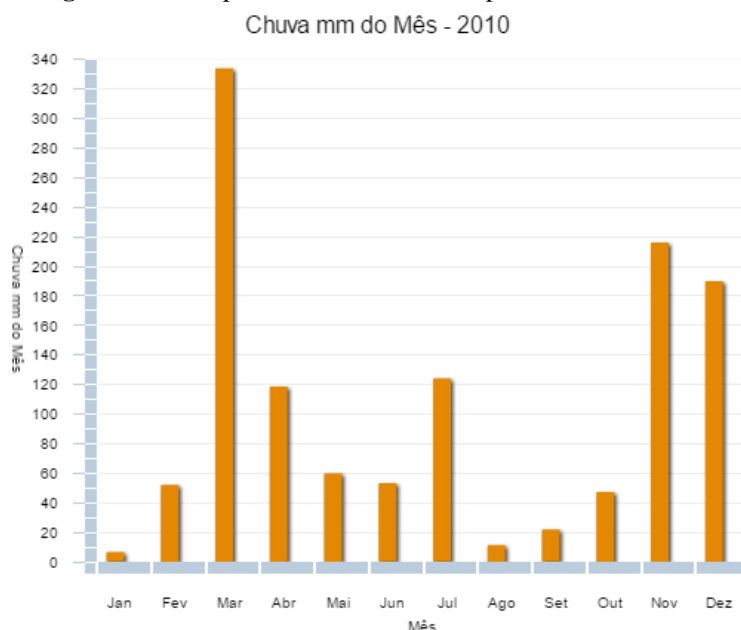
$$Q_t = Q_s + Q_b$$

Os dados de Q_b e Q_s foram calculados por hora em todas as campanhas e pontos amostrais. A soma dos valores de Q_b e Q_s , separadamente, em cada período analisado gerou a resultante de transporte diário de carga de fundo e sedimento em suspensão. Enquanto que a soma dos valores de totais diários de Q_b e Q_s gerou o transporte de carga total de sedimento e seu vetor resultante nas campanhas analisadas (van Rijn 2007a, 2007b).

4. Resultados

A figura 5 apresenta o índice pluviométrico do município de Aracruz no ano de 2010. As campanhas ocorreram no final de fevereiro e início de março (23/02 e 01/03) com a intenção de obter dados do período chuvoso característico da região, e no mês de julho (20 e 26/07), para o período seco. Devido à baixa quantidade de chuvas registrada durante as campanhas de fevereiro e início de março, optou-se por considerar este o período seco da fase amostral. Da mesma forma, como ocorreram chuvas intensas durante as campanhas de julho, optou-se por identificar estas campanhas como do período chuvoso. Para identificação das campanhas, a quadratura das estações seca e chuvosa foi designada de QS e QC, respectivamente. Da mesma forma, as campanhas de sizígia nas estações seca e chuvosa foram identificadas como SS e SC, respectivamente.

Figura 5. Índice pluviométrico do município de Aracruz, 2010.

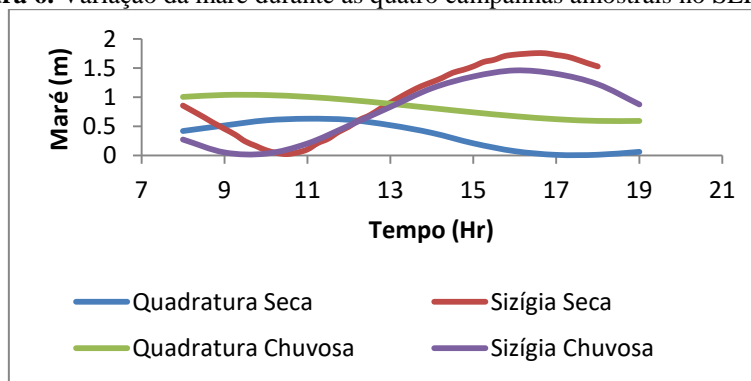


Fonte: ANA (Agência Nacional de Águas)

Os resultados do trabalho serão discutidos abaixo para cada ponto amostral, de acordo com o período (seco ou chuvoso) e fase de maré (quadratura ou sizígia). Durante as campanhas de quadratura seca (fevereiro de 2010), no rio Piraquê-Mirim, e quadratura chuvosa (julho de 2010), no rio Piraquê-Açu, ocorreram alguns problemas de coleta e os dados foram descartados para estas estações amostrais nesses períodos.

Para as quatro campanhas amostrais, a figura 6 apresenta as variações do nível d'água registrado.

Figura 6. Variação da maré durante as quatro campanhas amostrais no SEPAPM.



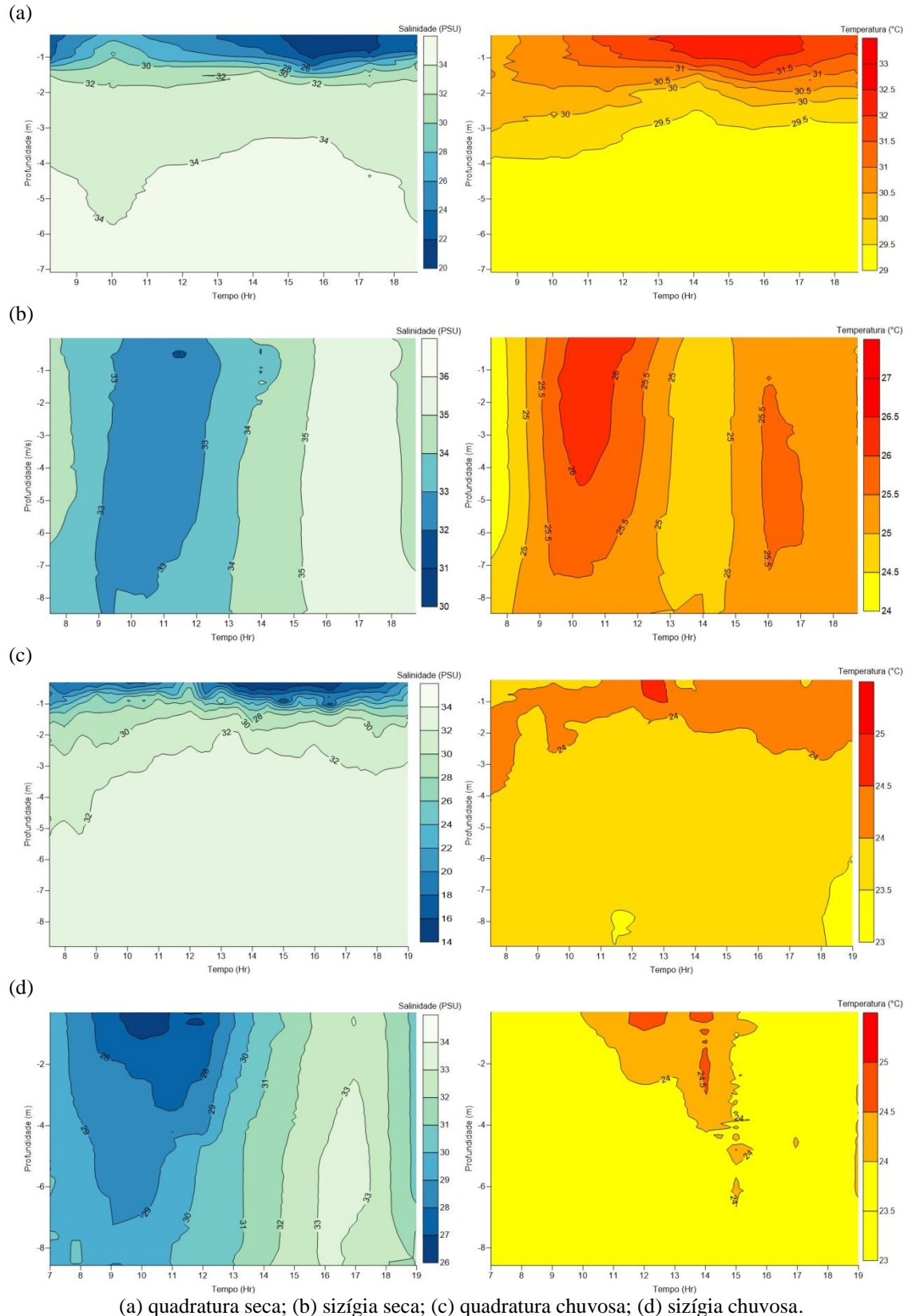
4.1. Braço Norte (rio Piraquê-Açu)

O rio Piraquê-Açu teve comportamento variado de salinidade e temperatura ao longo das estações e regimes de maré (figuras 7a, 7b, 7c e 7d). A salinidade apresentou valores mínimos de 15 PSU na quadratura chuvosa e máximo de 35,3 PSU na sizígia seca. As quadraturas apresentaram gradientes de salinidade, chegando a variar 17 PSU no período chuvoso (figura 7c). Observou-se uma picnoclina aparente a 2 metros de profundidade apenas na quadratura. Esse mesmo padrão não foi encontrado na sizígia.

As temperaturas apresentaram pouca variação entre superfície e fundo. O mínimo medido foi de 23,35 °C na quadratura chuvosa e máximo de 32,3 °C na

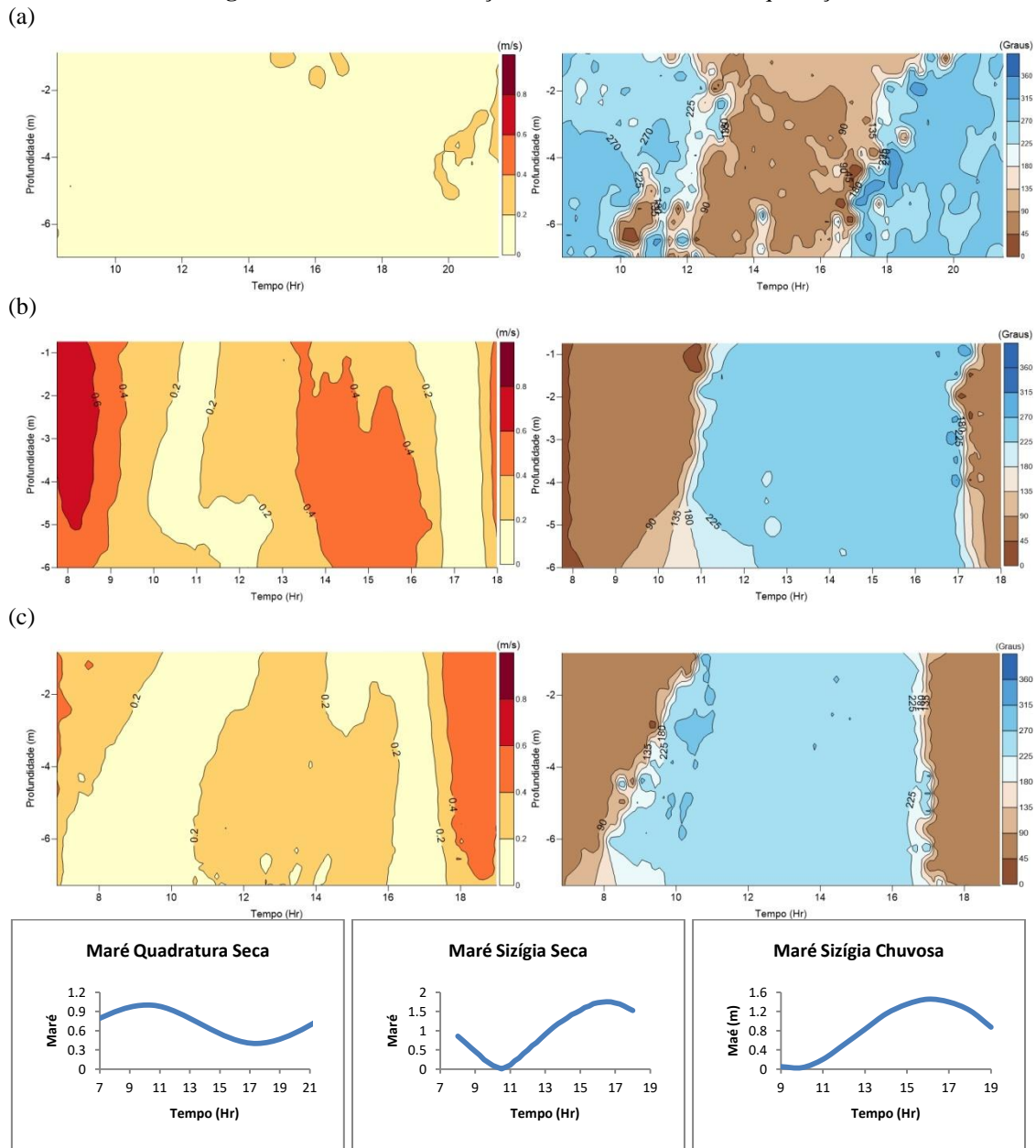
quadratura seca. A maior amplitude térmica registrada foi de 3,12 °C as 14hr, durante a vazante da quadratura seca (figura 7a). O período seco apresentou maiores temperaturas em relação ao período chuvoso. Não foi possível observar a formação de termoclina em nenhuma campanha.

Figura 7. Salinidade e Temperatura no rio Piraquê-Açu.



A velocidade das correntes apresentou-se maior nas sizígias em relação às quadraturas (figuras 8a, 8b e 8c). A velocidade máxima registrada foi de 0,75 m/s durante a vazante da sizígia seca (figura 8b). Durante as sizígias, a velocidade nas vazantes foram maiores do que nas enchentes, enquanto na quadratura as velocidades de vazante e enchente tiveram pouca diferença. A coluna d'água não apresentou estratificações aparente da velocidade.

Figura 8. Velocidade e Direção das correntes no rio Piraquê-Açu.

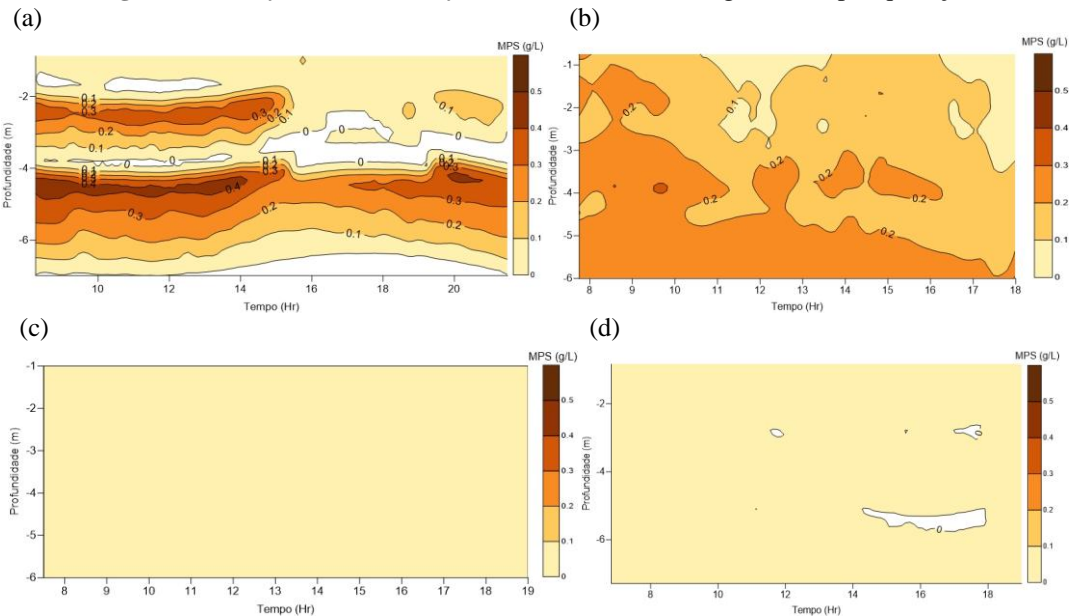


(a) quadratura seca; (b) sizígia seca; (c) sizígia chuvosa.

O material particulado em suspensão apresentou maiores concentrações na coluna d'água durante o período seco (figuras 9a, 9b, 9c e 9d). O valor máximo registrado foi de 0,45 g/L na quadratura seca, durante o meio da enchente (figura 9a). Observa-se que as maiores concentrações de MPS estão em duas profundidades distintas na quadratura seca (2,5 e 4,5 metros de profundidade), correspondendo ao

período que vai do meio da enchente até o fim da vazante. Já o período chuvoso apresentou baixos valores de MPS na coluna d'água, com maiores valores encontrados na sizígia chuvosa (0,06 mg/L) durante a vazante (figura 9d).

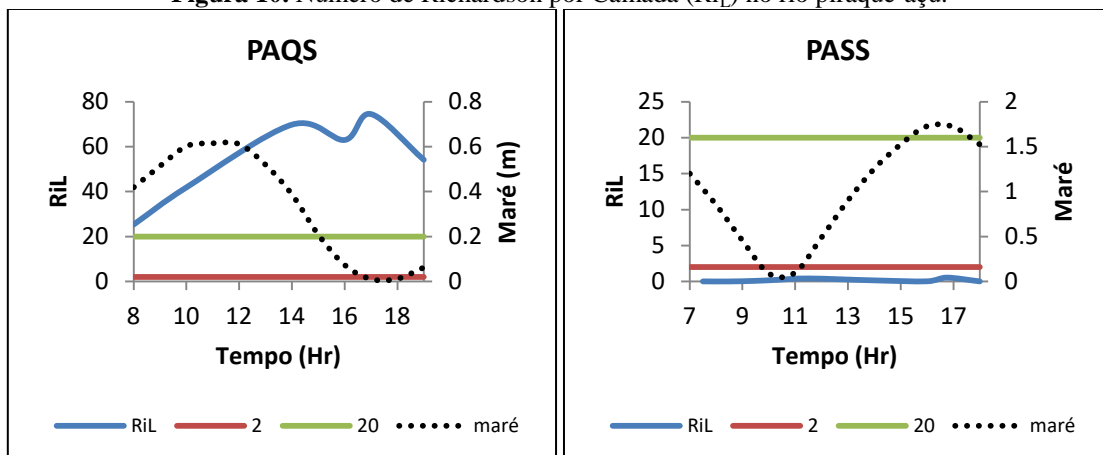
Figura 9. Variação da concentração de MPS na coluna d'água no rio piraquê-açu.

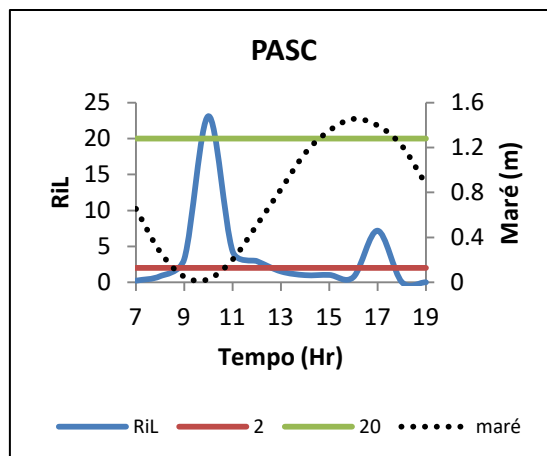


(a) quadratura seca; (b) sizígia seca; (c) quadratura chuvosa; (d) sizígia chuvosa.

O cálculo do *Número de Richardson por Camada* apresentou resultados distintos para quadratura e sizígia (figura 10). A quadratura apresentou valores de Ri_L maiores que 20, o que indica a estratificação da coluna d'água, e o processo dominante de mistura por entranhamento (entrainment). Já durante as sizíguas, o Ri_L medido foi menor que 2, indicando uma coluna d'água totalmente misturada, e o processo de mistura por difusão turbulenta. Contudo, durante a sizígia chuvosa, houve dois picos de Ri_L maiores que 2, às 10h e às 17h, correspondendo aos períodos de estufa de maré.

Figura 10. Número de Richardson por Camada (Ri_L) no rio piraquê-açu.

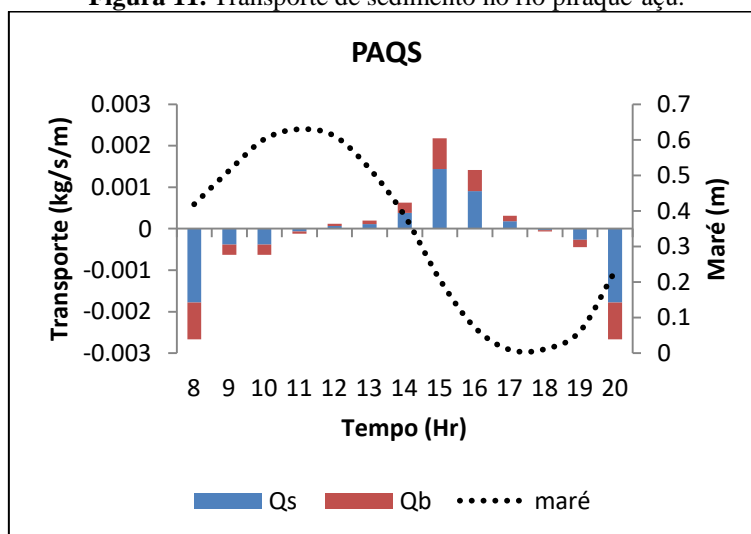


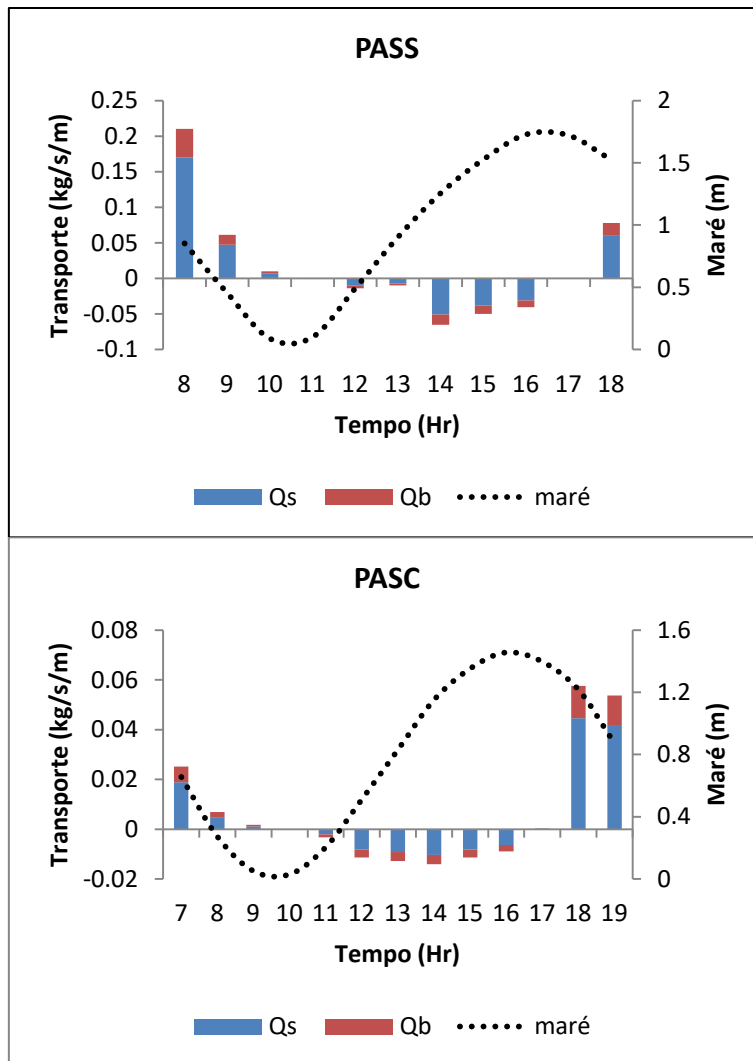


PAQS (Piraquê-Açu Quadratura Seca); PASS (Piraquê-Açu Sizígia Seca); PASC (Piraquê-Açu Sizígia Chuvosa).

Os transportes de sedimento através da carga de fundo e em suspensão estão representados na figura 11. Observa-se que o transporte acompanhou a variação da maré em todas as campanhas, sendo que nas estofas de maré o transporte total é quase nulo. Na quadratura, os maiores volumes de transporte ocorreram durante as enchentes. Já nas sizíguas, os maiores transportes foram durante as vazantes. O transporte em suspensão foi maior do que o de carga de fundo em todas as campanhas. Observou-se que a proporção entre transporte de carga de fundo e carga em suspensão (Q_b/Q_s) representou 50% na quadratura, enquanto nos períodos de sizígia essa proporção foi de apenas 20%. O Piraquê-Açu, durante a quadratura, apresentou um vetor resultante de transporte negativo (-0,003 kg/s/m), o que indica uma importação de sedimento neste braço do rio. Nas sizíguas, observaram-se valores positivos do vetor resultante de transporte (0,180 e 0,084 kg/s/m para o período seco e chuvoso, respectivamente), indicando uma predominância de exportação de sedimento. Os maiores valores de transporte de carga de fundo e em suspensão foram registrados na sizígia seca às 8 horas, durante a vazante (0,04 e 0,17 kg/s/m, respectivamente).

Figura 11. Transporte de sedimento no rio piraquê-açu.



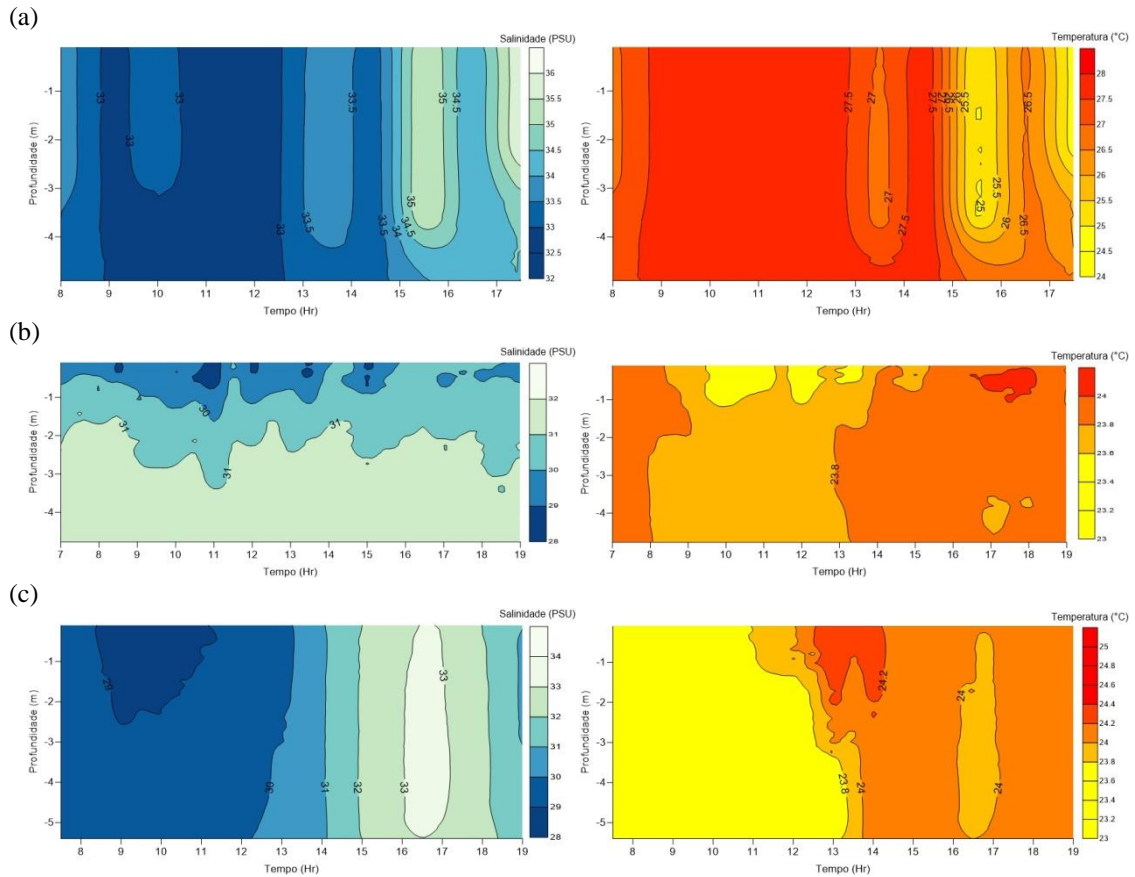


Em azul está o transporte de carga em suspensão (Qs) e em vermelho está o transporte de carga de fundo (Qb). PAQS (Piraquê-Açu Quadratura Seca); PASS (Piraquê-Açu Sизígia Seca); PASC (Piraquê-Açu Sизígia Chuvosa).

4.2. Braço sul (rio Piraquê-Mirim)

No rio Piraquê-Mirim os dados de salinidade e temperatura não apresentaram estratificação aparente da coluna d'água nas campanhas amostrais (figuras 12a, 12b e 12c). A salinidade mínima registrada foi de 28,87 PSU na sизígia chuvosa e máxima de 35,97 PSU na sизígia seca. A maior variação de salinidade (4,4 PSU) foi registrada na sизígia chuvosa (figura 12c). O período seco apresentou as maiores salinidades e temperaturas. A menor temperatura registrada foi 23,41 °C na quadratura chuvosa (figura 12b), e a máxima foi de 27,86 °C na sизígia seca (figura 12a). A maior variação de temperatura (3,1 °C) foi registrada na sизígia seca.

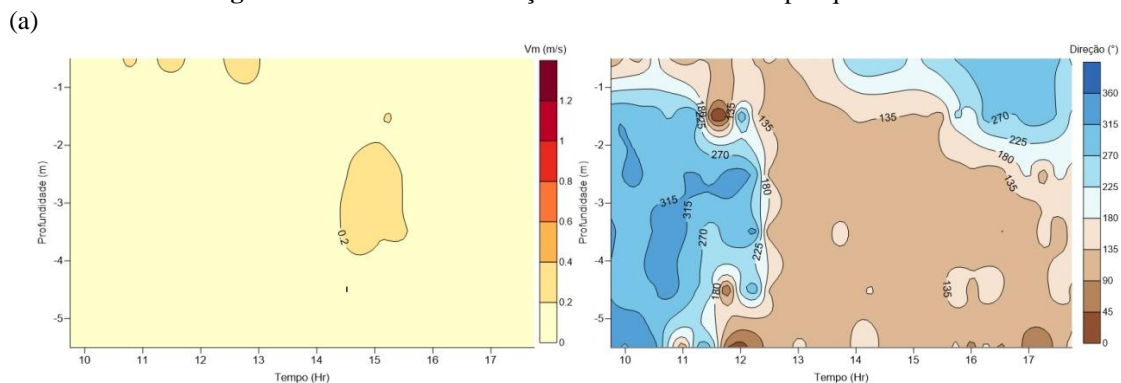
Figura 12. Salinidade e Temperatura no rio Piraquê-Mirim.

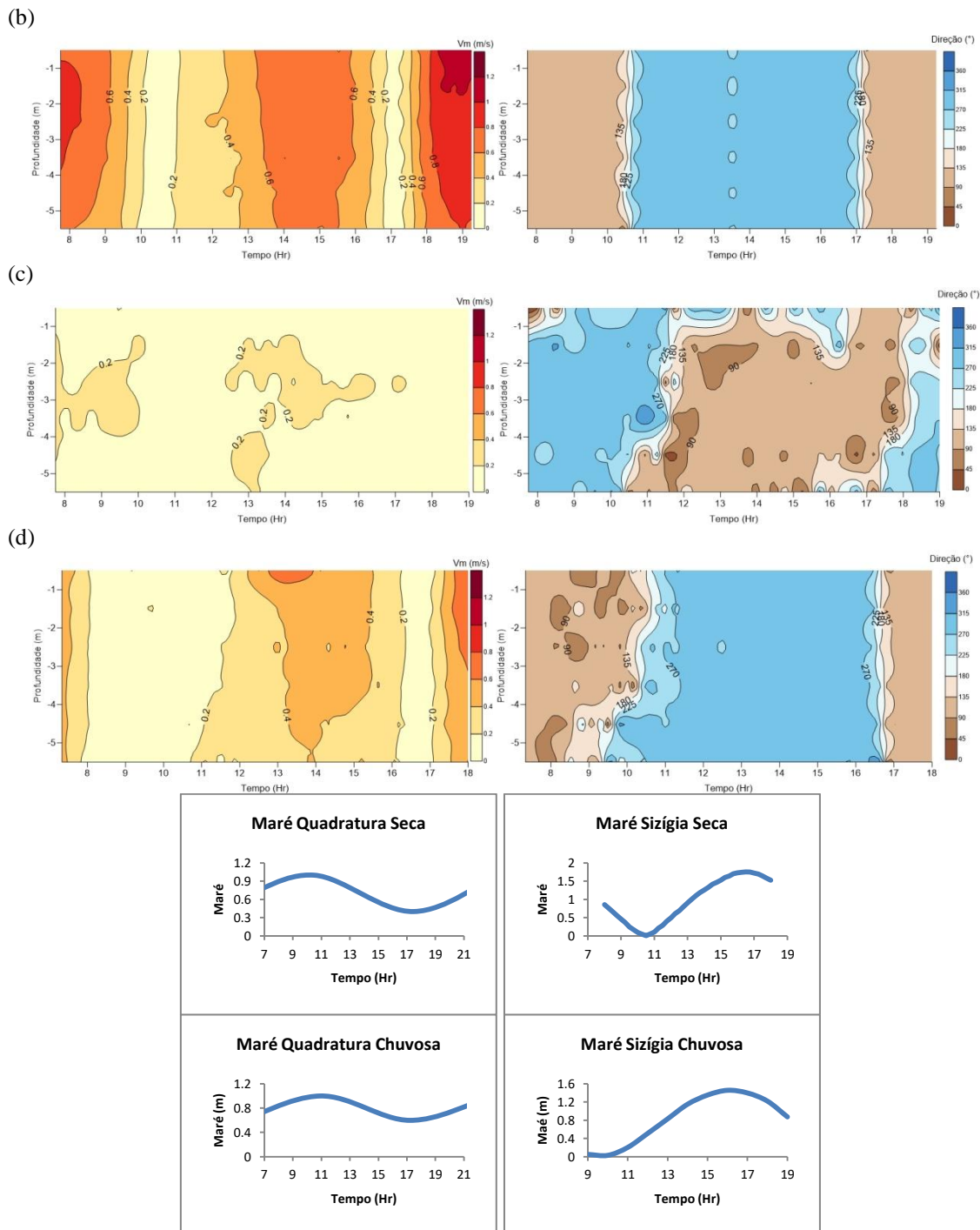


(a) Sízgia Seca; (b) Quadratura Chuvosa; (c) Sízgia Chuvosa.

As velocidades de corrente apresentaram-se maiores nas sizígias do que na quadratura, com valores que chegam a ser 70% maiores (figuras 13a, 13b, 13c e 13d). A magnitude máxima (1,13 m/s) foi encontrada na vazante da sizígia seca (figura 13b). O período seco apresentou velocidades de vazante maiores do que na enchente, o mesmo não foi observado no período chuvoso. Nos períodos de quadratura, observou-se, durante as inversões de maré, que a superfície muda de direção primeiro em relação ao restante da coluna d'água.

Figura 13. Velocidade e Direção das correntes no rio piraquê-mirim.

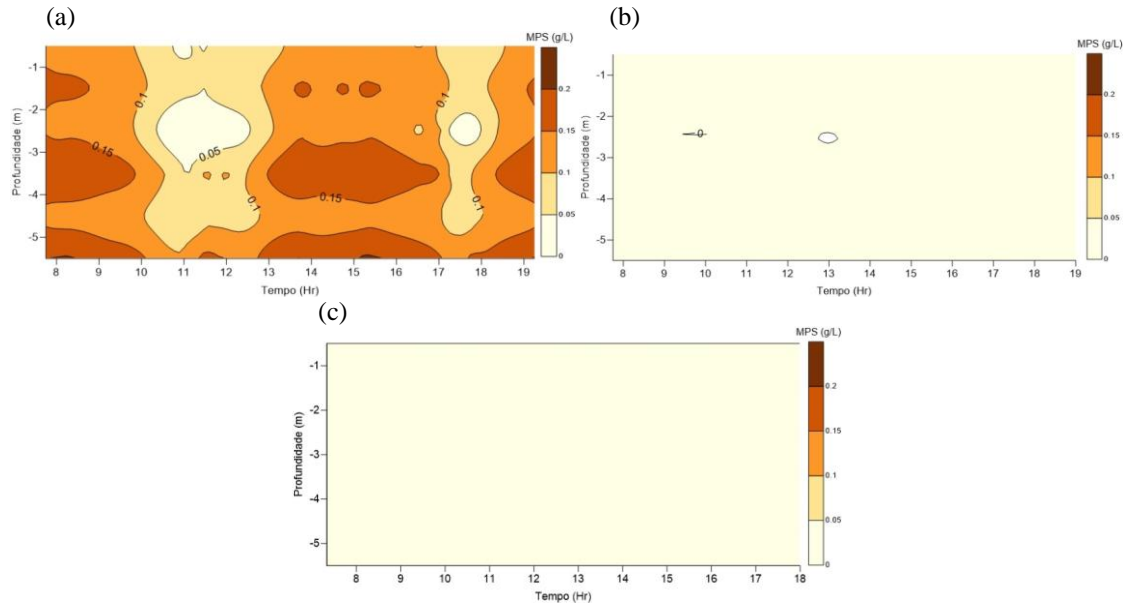




(a) quadratura seca; (b) sizígia seca; (c) quadratura chuvosa, (d) sizígia chuvosa.

O material particulado em suspensão apresentou maiores valores no período seco (figuras 14a, 14b e 14c). O período chuvoso apresentou baixos valores de MPS na coluna d'água, sendo praticamente homogêneo ao longo do ciclo da maré em toda a sua profundidade (figuras 14b e 14c). No período seco, observou-se que as maiores concentrações de MPS estão presentes no meio e fundo da coluna d'água (3,5 e 5,5 metros), tanto nos momentos de vazante quanto de enchente, sendo que nos períodos de estofa a concentração tende a zero (figura 14a).

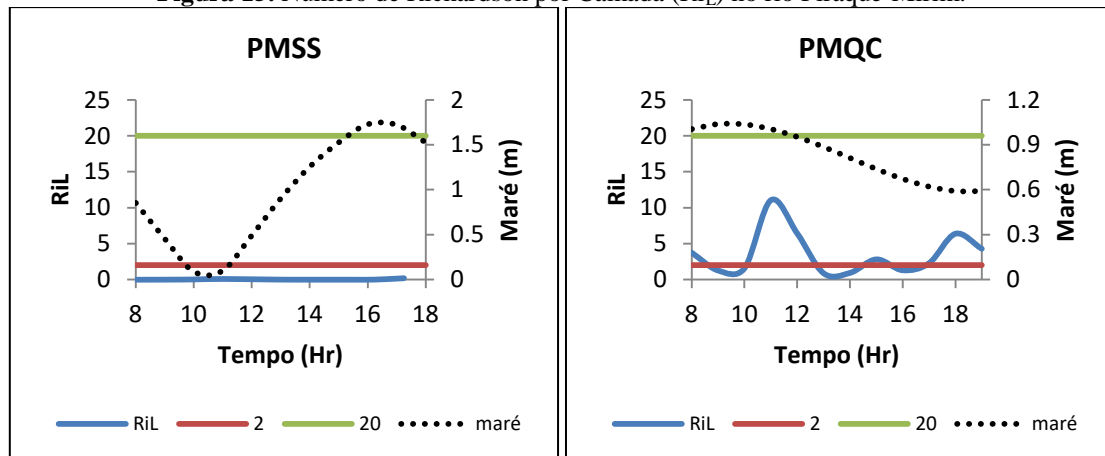
Figura 14. Variação da concentração de MPS na coluna d'água no rio piraquê-mirim.

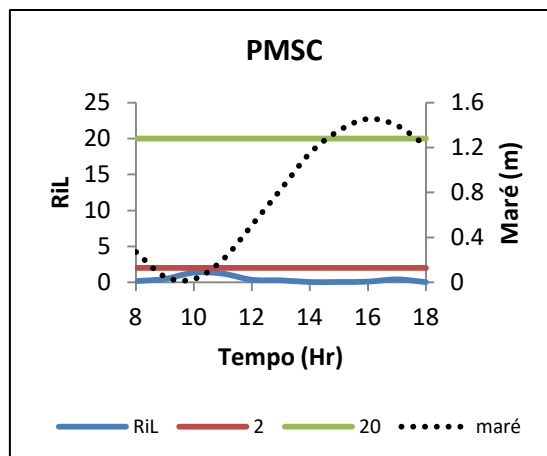


(a) Sizígia Seca; (b) Quadratura Chuvosa; (c) Sizígia Chuvosa.

O Número de Richardson por Camada apresentou valores menores que 2 para todas as campanhas (figura 15), com exceção de dois picos na quadratura chuvosa, às 11 e 18 horas, maiores que 2 e menores que 20, durante as estofas de maré. Dessa forma, esse braço do estuário pode ser classificado como totalmente misturado nos períodos amostrados, com um processo de mistura da coluna d'água por difusão turbulenta.

Figura 15. Número de Richardson por Camada (Ri_L) no rio Piraquê-Mirim.

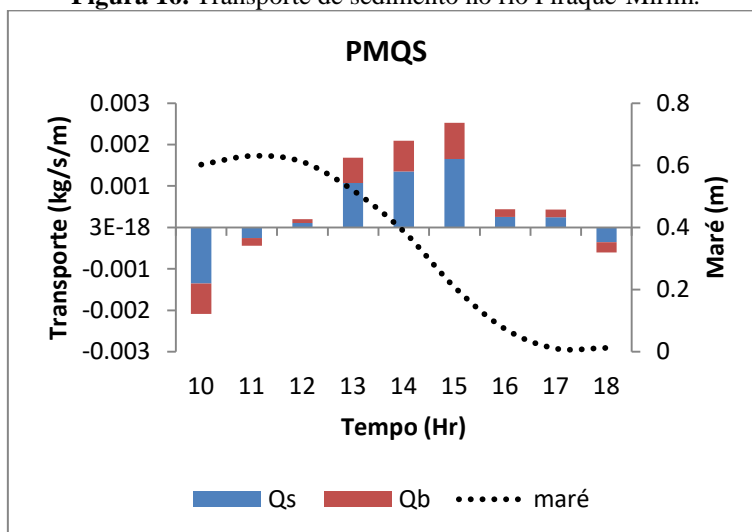


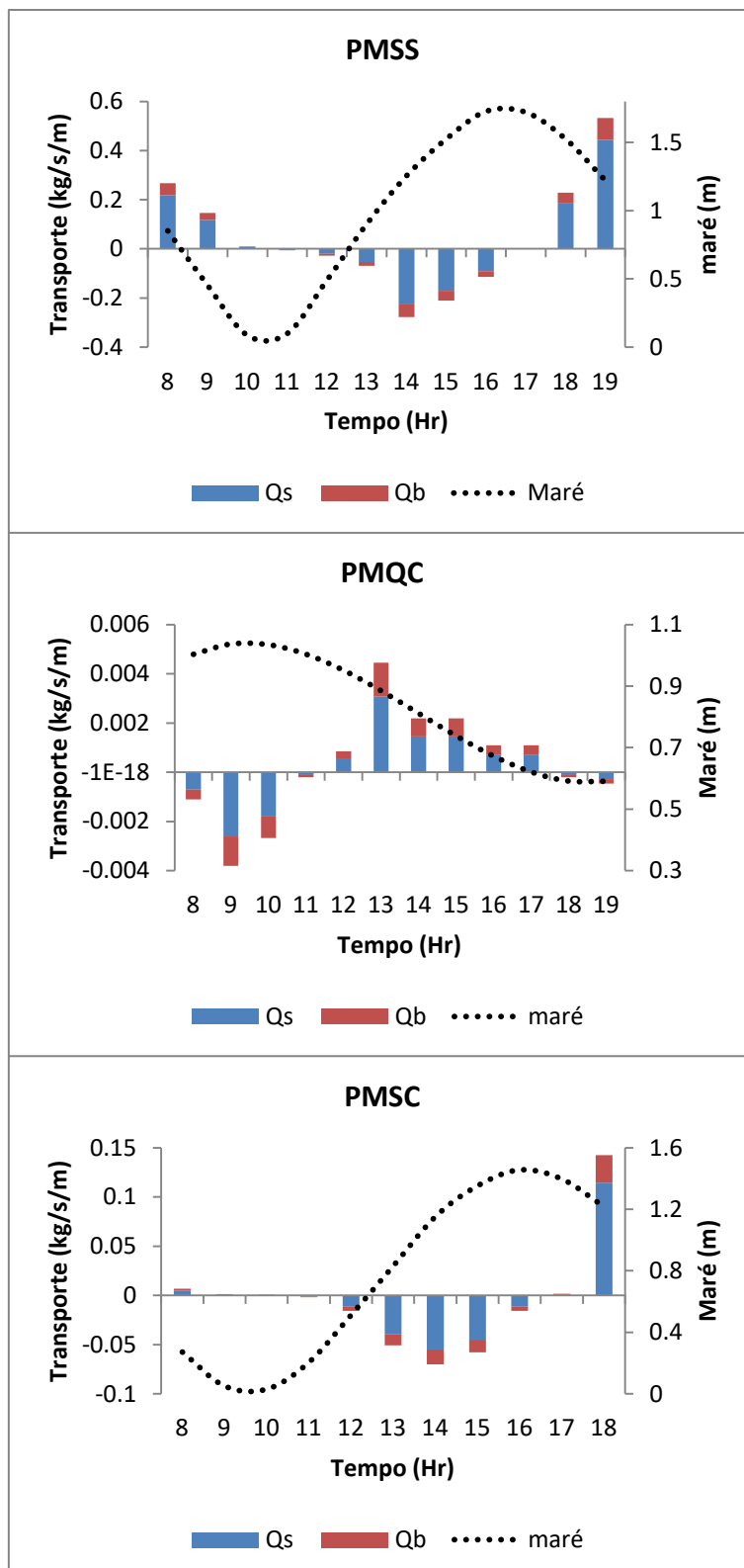


PMSS (Piraquê-Mirim Sizígia Seca); PMQC (Piraquê-Mirim Quadratura Chuvosa); PMSC (Piraquê-Mirim Sizígia Chuvosa).

O transporte de carga de fundo e em suspensão para as campanhas amostrais no rio Piraquê-Mirim estão representados na figura 16. O período de sizígia apresentou os maiores valores amostrais de transporte. Em todas as campanhas, os maiores valores de transporte ocorreram nos períodos de vazante. O transporte de carga em suspensão foi maior que o de carga de fundo em todas as campanhas também. As proporções de transporte de carga de fundo e carga em suspensão (Q_b/Q_s) foram muito próximas em quase todas as campanhas (30%), com exceção da sizígia seca, com uma proporção de 16%. O rio Piraquê-Mirim apresentou um vetor positivo de transporte nas campanhas de quadratura (0,005 e 0,003 kg/s/m) e sizígia seca (0,481 kg/s/m), sendo dessa forma, um exportador de sedimento nesses períodos. Já na sizígia chuvosa, o vetor resultante apresentou valor negativo (-0,059 kg/s/m), ocorrendo, nessa situação, importação de sedimento. Os maiores valores de transporte de carga de fundo e em suspensão foram registrados na sizígia seca às 19 horas, durante a vazante (0,088 e 0,443 kg/s/m, respectivamente).

Figura 16. Transporte de sedimento no rio Piraquê-Mirim.





Em azul está o transporte de carga em suspensão (Qs) e em vermelho está o transporte de carga de fundo (Qb). PMQS (Piraquê-Mirim Quadratura Seca); PMSS (Piraquê-Mirim Sizígia Seca); PMQC (Piraquê-Mirim Quadratura Chuvosa); PMSC (Piraquê-Mirim Sizígia Chuvosa).

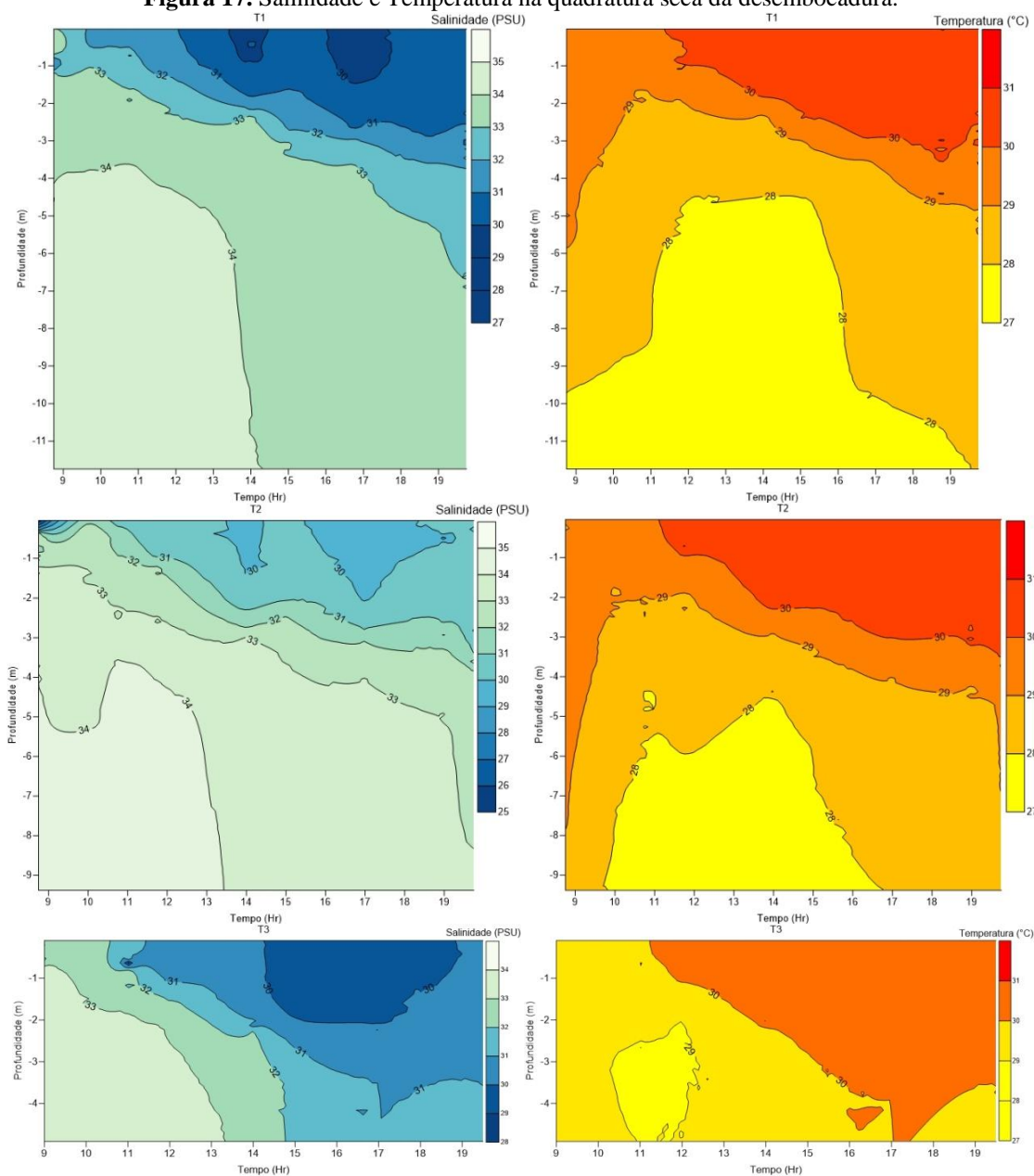
4.3. Seção Inferior (Desembocadura)

Como já abordado por Melado (2011) e Silva (2014), a desembocadura mostrou diferenças nos gradientes de salinidade e temperatura nas campanhas amostrais (figuras

17 a 20). Os períodos de sizígia apresentaram maiores valores de salinidade e menores valores de temperatura em relação à quadratura. A maior salinidade registrada (36 PSU) foi durante a sizígia seca (figura 18), enquanto a menor (22 PSU) foi durante a quadratura chuvosa. Não houve presença de pycnoclina nas campanhas, com exceção da quadratura chuvosa, que apresentou uma variação superior de 8 PSU nos primeiros 2 metros de profundidade. A maior temperatura (31 °C) foi registrada na quadratura seca (figura 17), e a menor (22 °C) na quadratura chuvosa (figura 19). Em nenhuma das campanhas houve presença de termoclina, com variações de temperatura menores que 2 °C na coluna d'água.

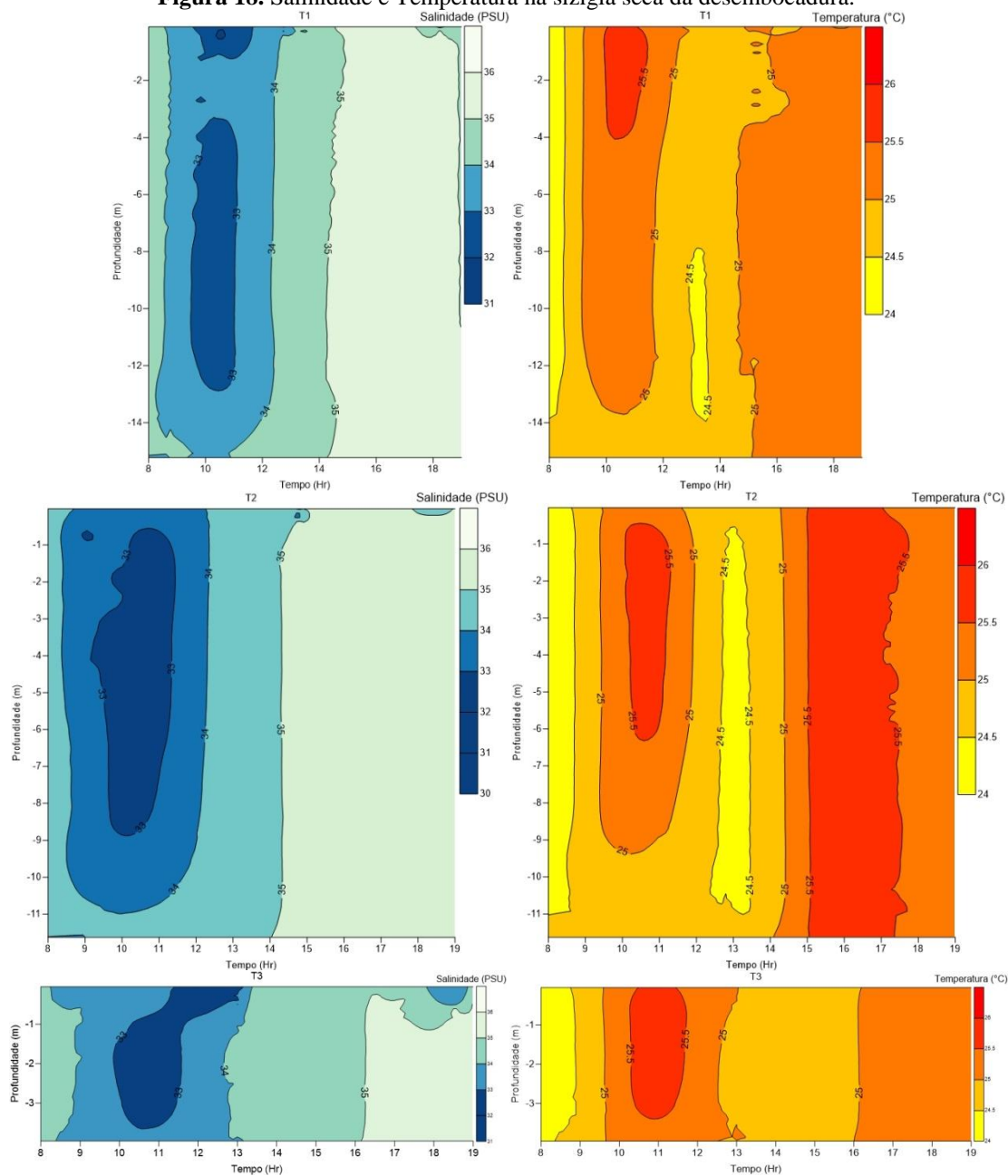
Transversalmente, observa-se que não existem diferenças significativas na variação de temperatura entre a margem norte e sul (pontos T1 e T3). Em relação à salinidade, durante as sizígias não houve diferenças na seção do estuário, já nas quadraturas ocorreu variações onde a margem sul apresentou valores maiores que a margem norte, principalmente na quadratura chuvosa (figura 19).

Figura 17. Salinidade e Temperatura na quadratura seca da desembocadura.



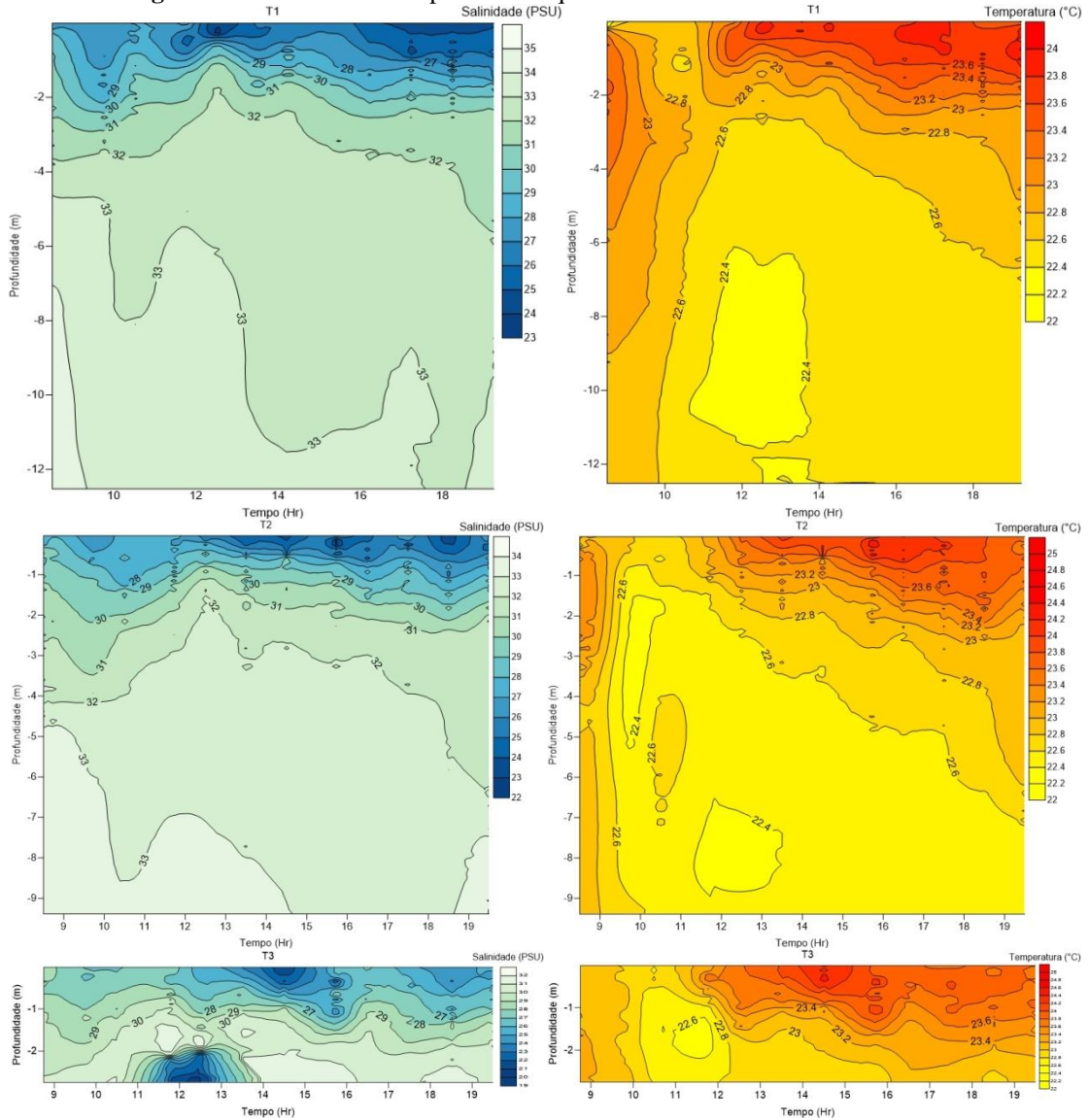
T1 (margem sul), T2 (seção intermediária) e T3 (margem norte).

Figura 18. Salinidade e Temperatura na sizígia seca da desembocadura.



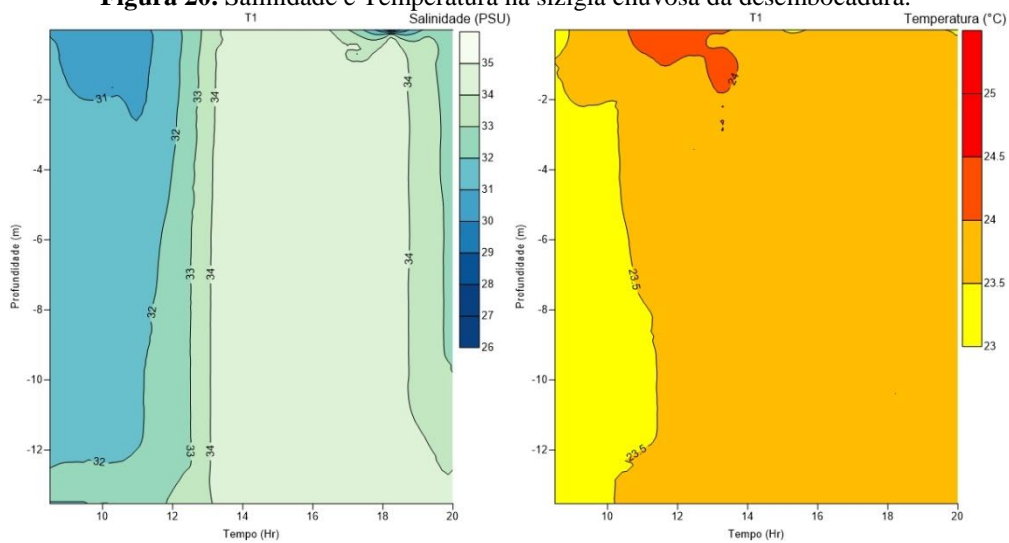
T1 (margem sul), T2 (seção intermediária) e T3 (margem norte).

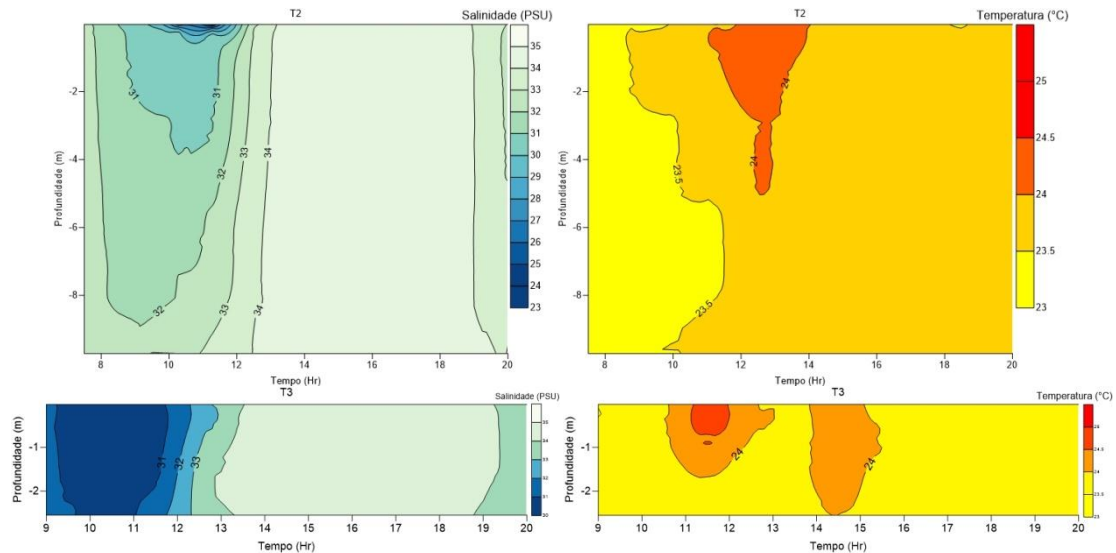
Figura 19. Salinidade e Temperatura na quadratura chuvosa da desembocadura.



T1 (margem sul), T2 (seção intermediária) e T3 (margem norte).

Figura 20. Salinidade e Temperatura na sizígia chuvosa da desembocadura.

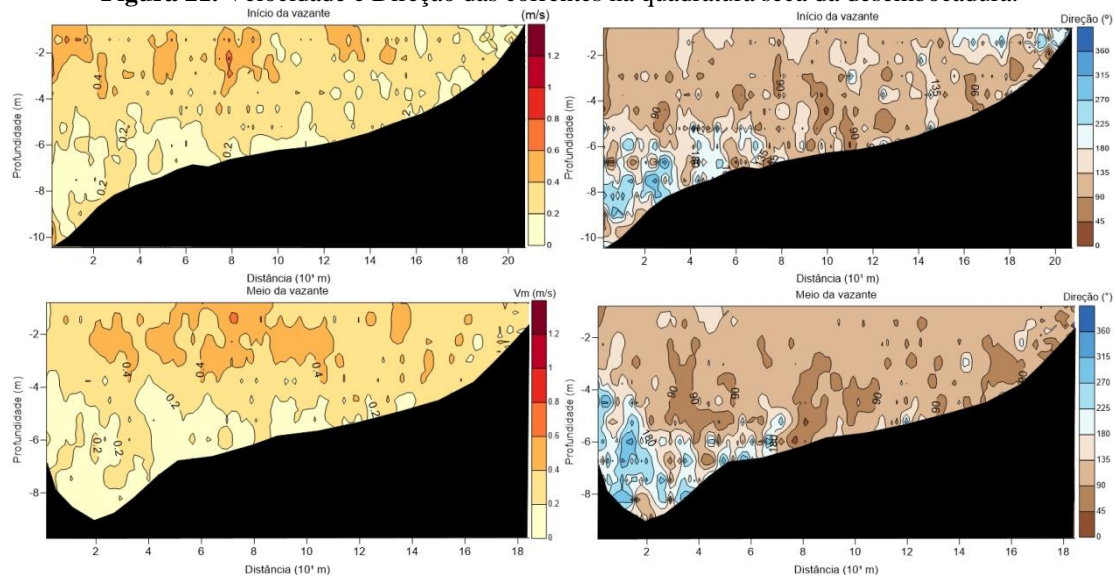




T1 (margem sul), T2 (seção intermediária) e T3 (margem norte).

A velocidade e direção das correntes nas campanhas amostrais são apresentadas nas figuras 21 a 24. Foi selecionado o início e meio da vazante e enchente, por serem os momentos mais representativos da maré. O início da vazante é importante por ser o instante onde as primeiras camadas de sedimento que foram depositadas durante a estufa de maré são ressuspensas, enquanto o meio da vazante representa as maiores velocidades da maré saindo do estuário. O início da enchente também acompanha um momento de transição (baixamar), e o meio da enchente é o momento onde se encontram as maiores velocidades entrando no sistema. Observou-se que nos períodos de vazante da quadratura e sizígia chuvosa ocorre um stress junto ao fundo, que devido à diminuição da velocidade, provoca uma rotação na direção da corrente (figuras 21, 23 e 24). As maiores velocidades das correntes são encontradas nas sizíguas. Durante as vazantes, observou-se que as maiores velocidades encontram-se na margem sul, enquanto que na enchente essas velocidades são maiores na porção central da secção. A maior velocidade registrada foi de 2 m/s, durante a vazante da quadratura seca (figura 21).

Figura 21. Velocidade e Direção das correntes na quadratura seca da desembocadura.



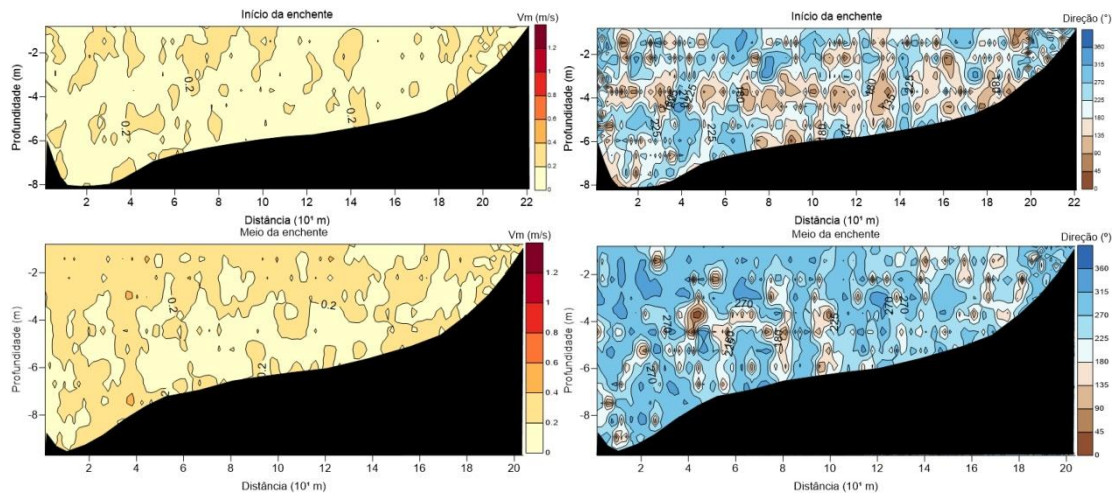


Figura 22. Velocidade e Direção das correntes na sizígia seca da desembocadura.

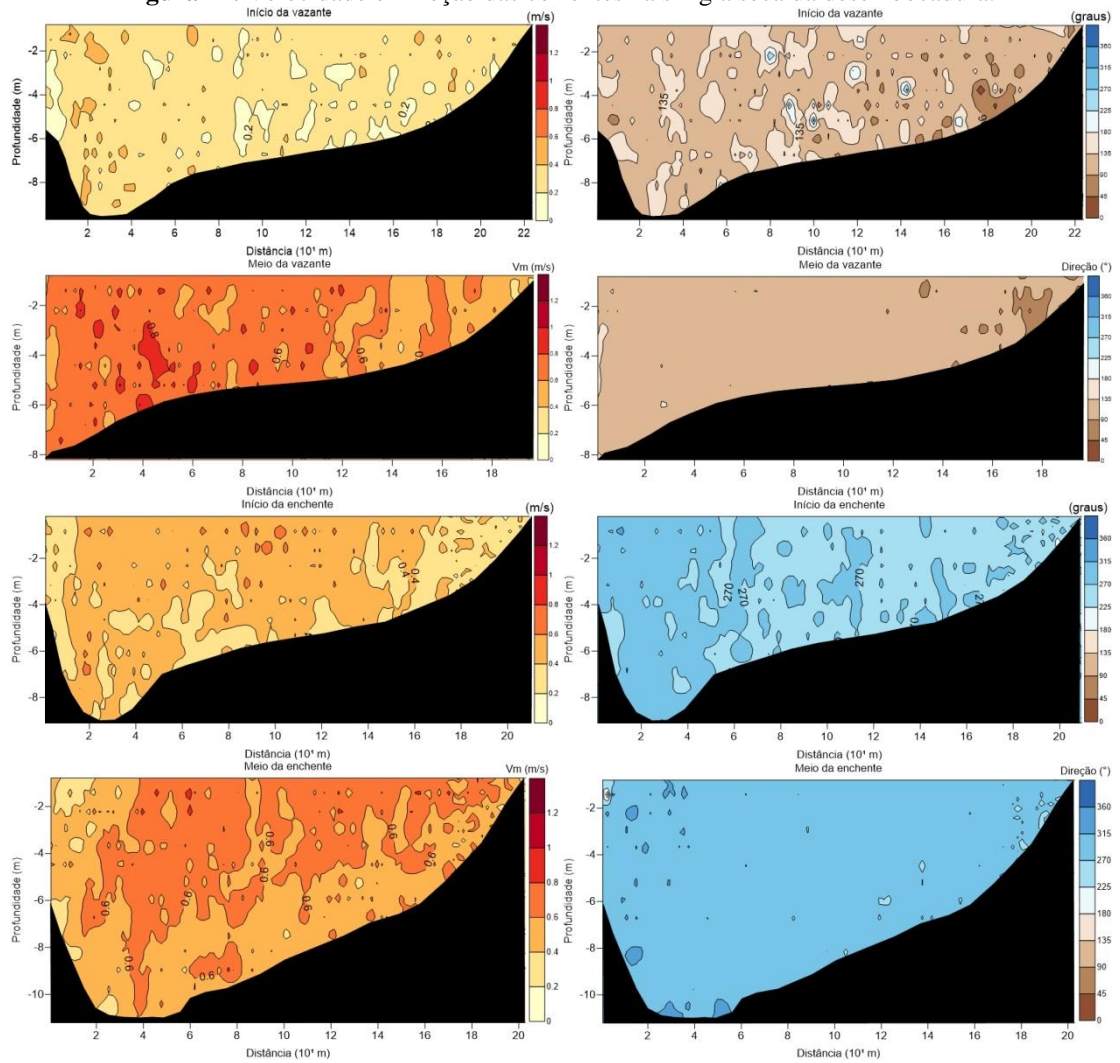


Figura 23. Velocidade e Direção das correntes na quadratura chuvosa da desembocadura.

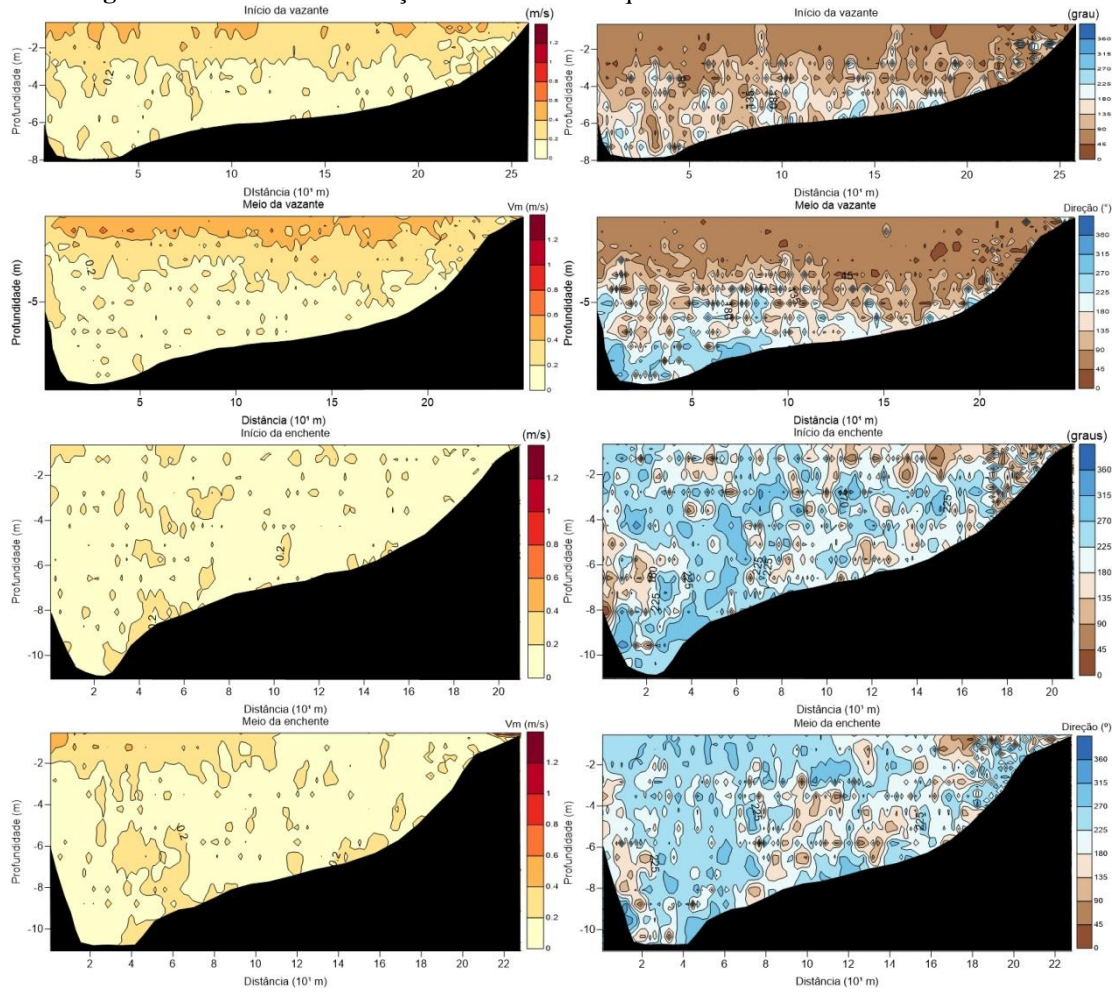
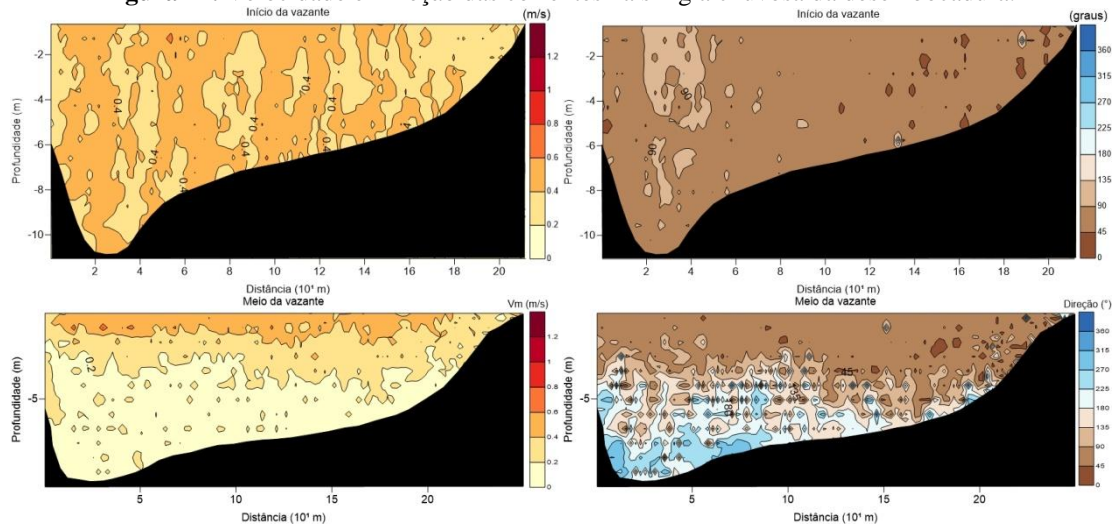
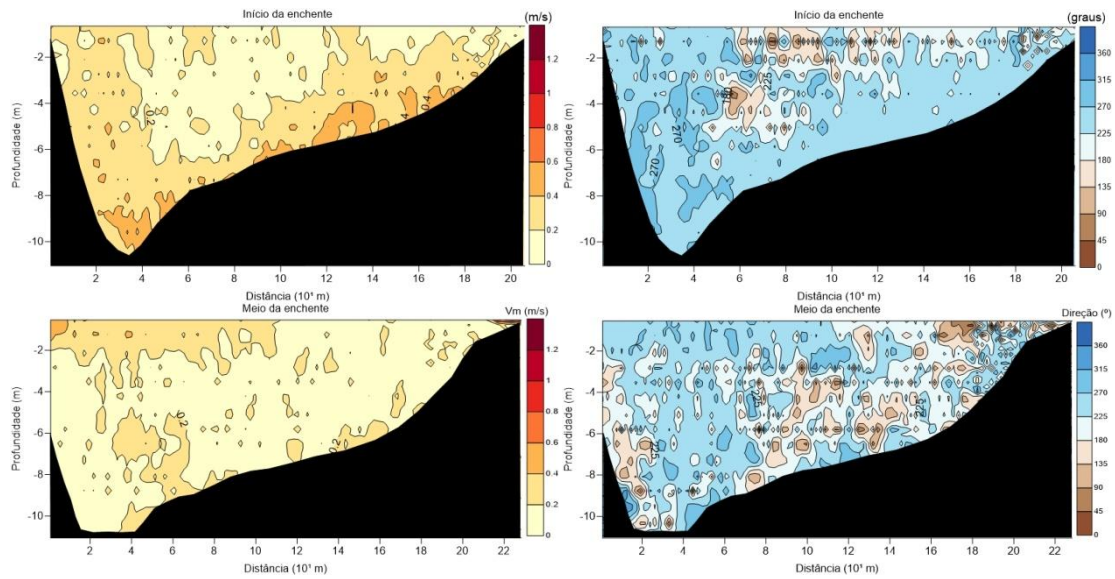


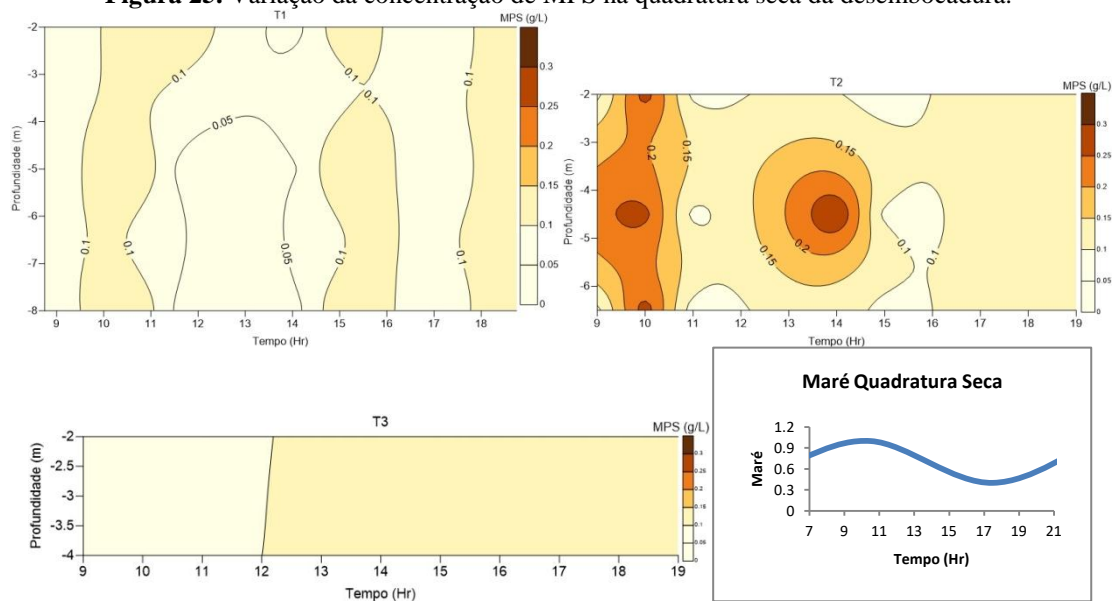
Figura 24. Velocidade e Direção das correntes na sizígia chuvosa da desembocadura.





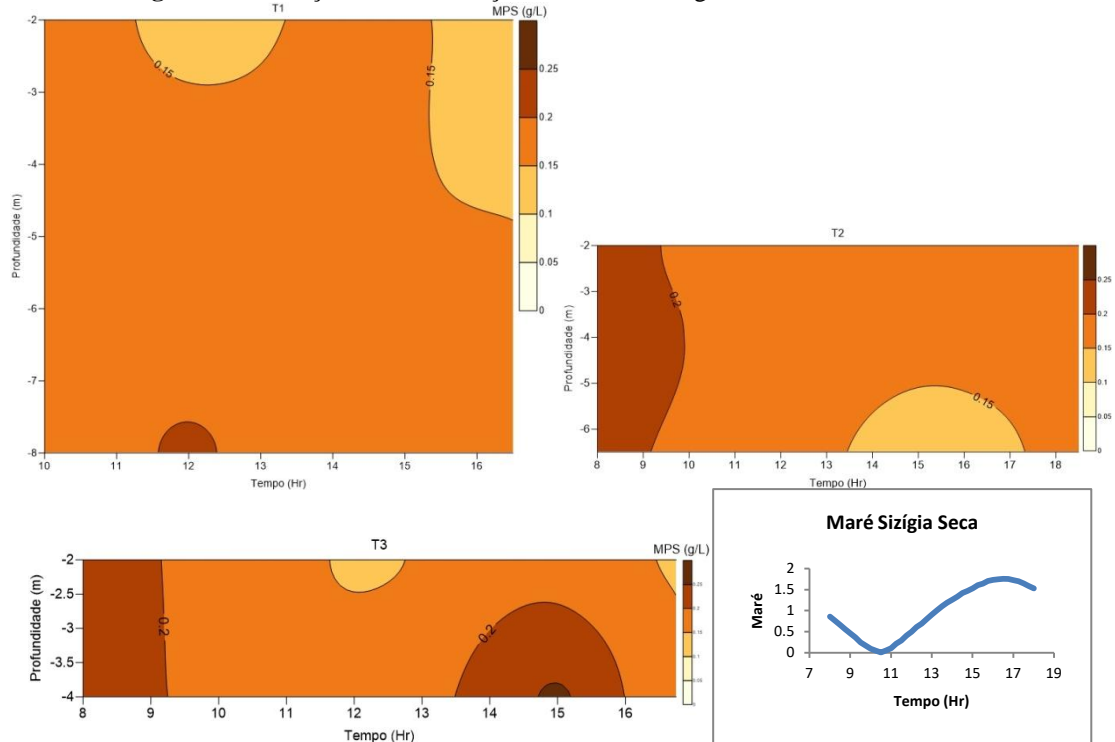
O material particulado em suspensão de cada campanha está representado nas figuras 25 a 28. Os maiores valores são encontrados no período seco. O máximo registrado foi de 0,305 g/L na seção intermediária, durante a vazante da quadratura seca, e o mínimo foi de 0,005 g/L na margem sul durante o final da enchente da quadratura seca (figura 25).

Figura 25. Variação da concentração de MPS na quadratura seca da desembocadura.



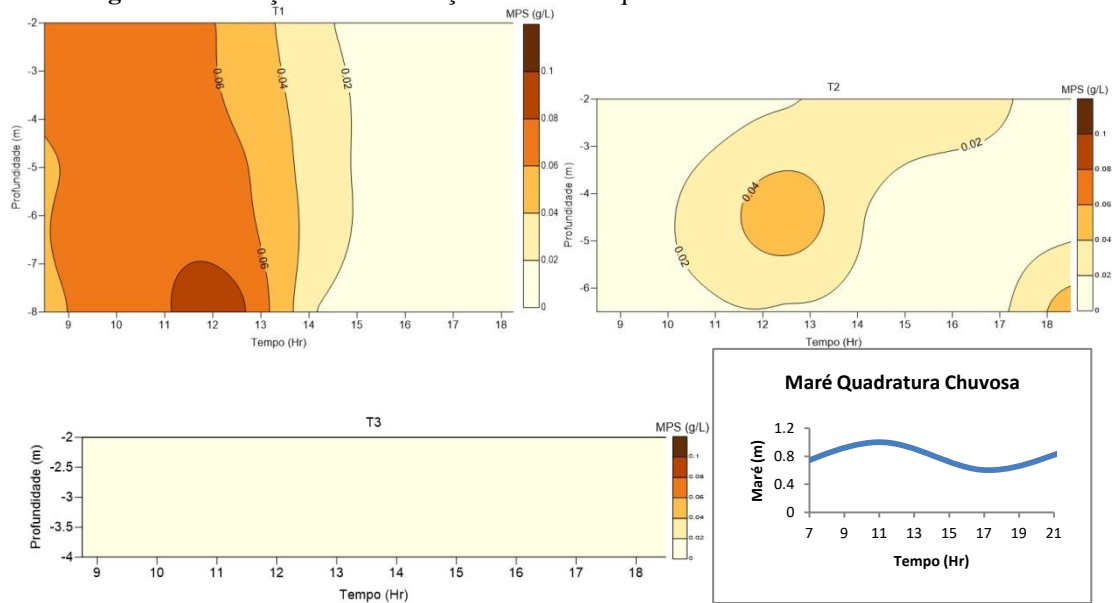
T1 (margem sul), T2 (seção intermediária) e T3 (margem norte).

Figura 26. Variação da concentração de MPS na sizígia seca da desembocadura.



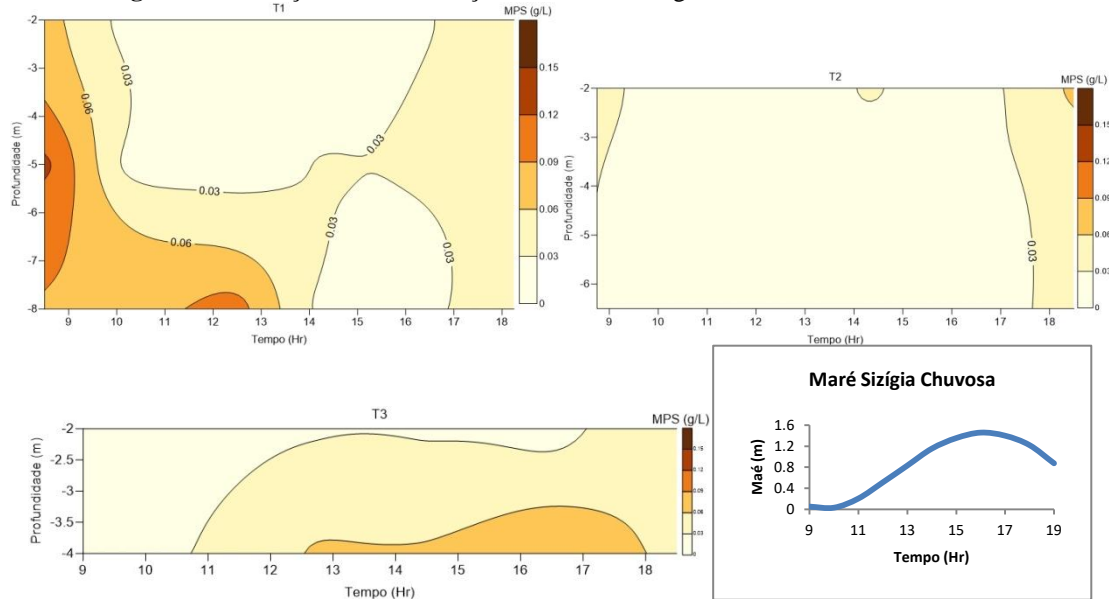
T1 (margem sul), T2 (seção intermediária) e T3 (margem norte).

Figura 27. Variação da concentração de MPS na quadratura chuvosa da desembocadura.



T1 (margem sul), T2 (seção intermediária) e T3 (margem norte).

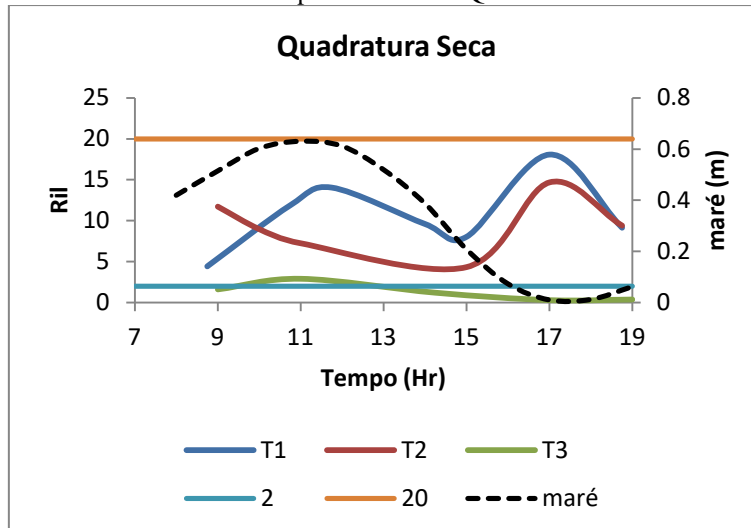
Figura 28. Variação da concentração de MPS na sizígia chuvosa da desembocadura.



T1 (margem sul), T2 (seção intermediária) e T3 (margem norte).

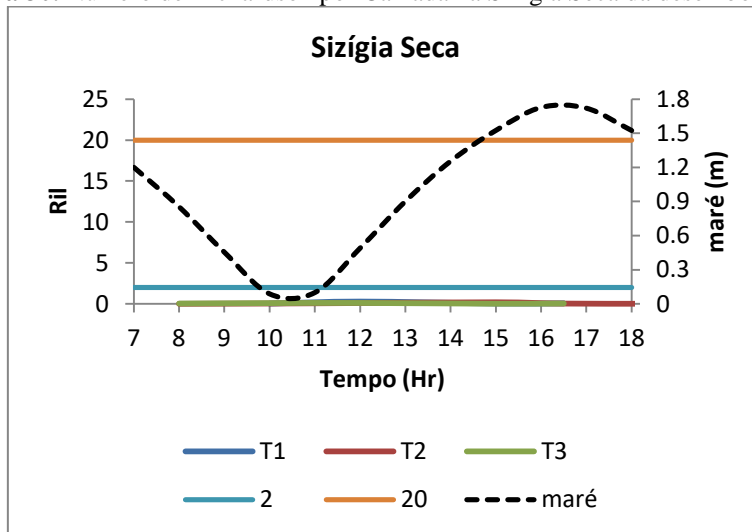
O Número de Richardson por Camada calculado mostrou que a desembocadura comportou-se como um estuário totalmente misturado nas sizíguas, e parcialmente misturado durante as quadraturas (figuras 29 a 32). Tanto T1 quanto T2 apresentaram um pico de $Ri_L > 20$ durante a preamar da quadratura chuvosa. Não houve significativas variações transversais na seção da desembocadura. Dessa forma, pode-se afirmar que a desembocadura do estuário é dominada por processos de mistura do tipo difusão turbulenta.

Figura 29. Número de Richardson por Camada na Quadratura Seca da desembocadura.



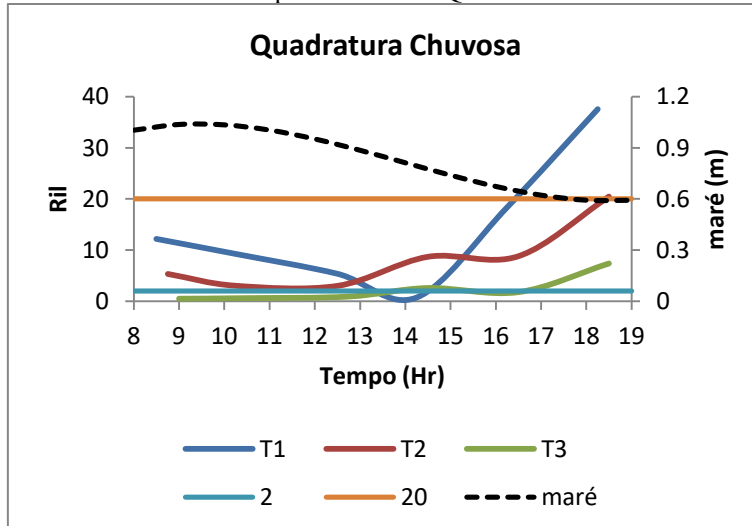
T1 (margem sul), T2 (seção intermediária), T3 (margem norte), 2 e 20 são os limites de Ri_L .

Figura 30. Número de Richardson por Camada na Sizígia Seca da desembocadura.



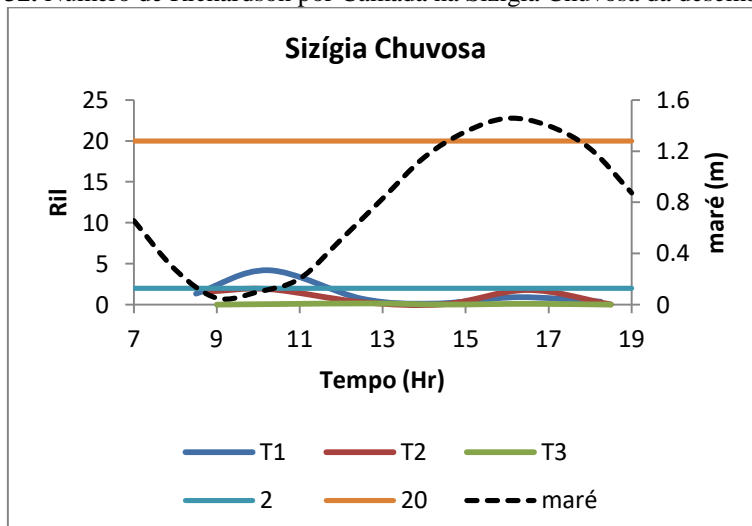
T1 (margem sul), T2 (seção intermediária), T3 (margem norte), 2 e 20 são os limites de Ri_L .

Figura 31. Número de Richardson por Camada na Quadratura Chuvosa da desembocadura.



T1 (margem sul), T2 (seção intermediária), T3 (margem norte), 2 e 20 são os limites de Ri_L .

Figura 32. Número de Richardson por Camada na Sizígia Chuvosa da desembocadura.

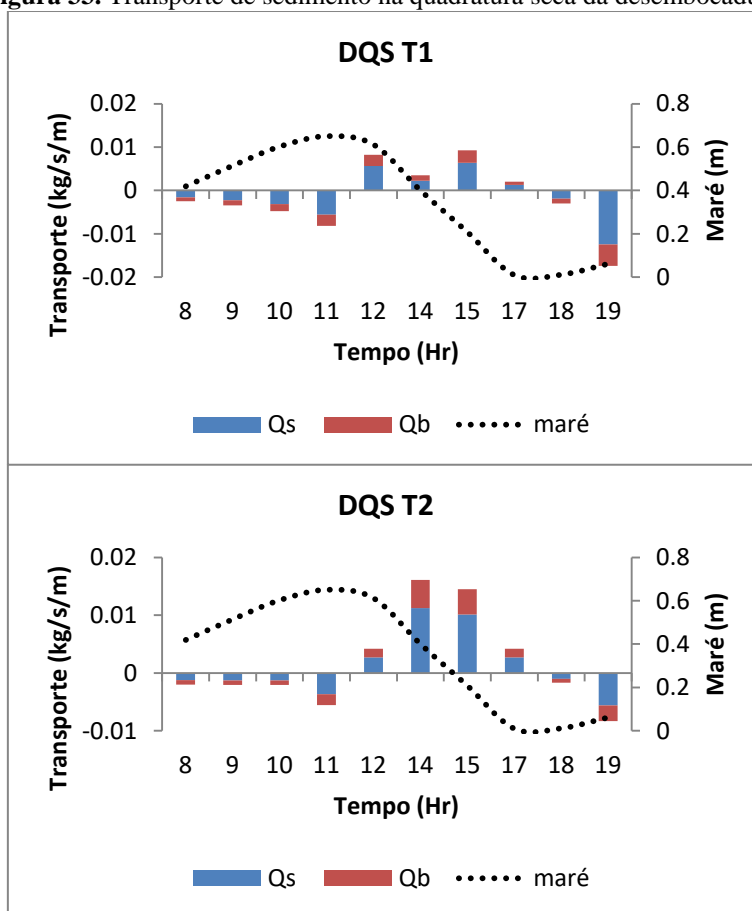


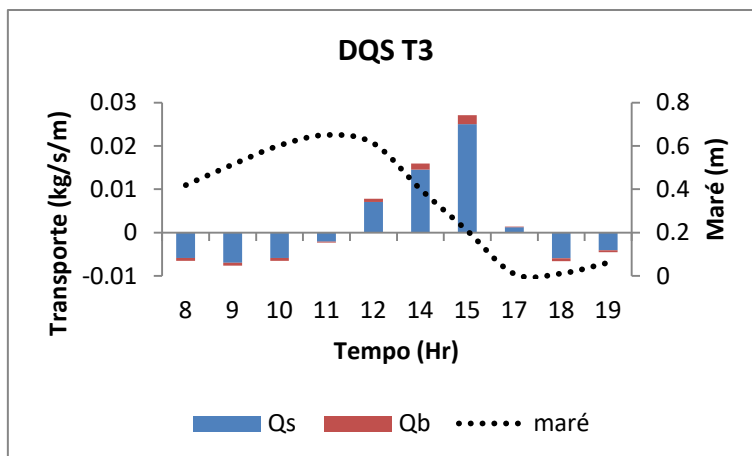
T1 (margem sul), T2 (seção intermediária), T3 (margem norte), 2 e 20 são os limites de Ri_L .

O transporte de sedimento é apresentado nas figuras 33 a 36. As sizígias apresentam maiores valores de transporte tanto para carga de fundo como para material em suspensão. Observou-se que nas quadraturas, a razão entre transporte de carga de fundo e carga em suspensão (Q_b/Q_s) era maior do que nas sizígias. O ponto T1 é o que apresenta as maiores relações entre os transportes, chegando a 40% durante as quadraturas. Enquanto o ponto T3 é o que apresenta as menores razões, não passando de 10% em nenhuma das campanhas. Os maiores valores de transporte de carga de fundo e carga em suspensão foram registrados na sizígia seca (figura 34), e tiveram valores de 0,14 e 0,68 Kg/s/m, respectivamente. Quase todas as campanhas apresentaram um vetor resultante positivo, indicando que essa porção do estuário atua como exportador de sedimento. A exceção foi a sizígia chuvosa, que teve um vetor resultante negativo, indicando que nesse período houve importação de sedimento.

Observando a secção transversal do estuário, o ponto T1, onde se encontra o canal principal do estuário, comportou-se como exportar de sedimento durante todas as campanhas, com exceção do período de quadratura seca. O ponto T2, que fica na porção central comportou-se também como exportador de sedimento em todas as campanhas, com exceção da quadratura chuvosa. E o ponto T3, que fica na porção mais rasa da margem norte, comportou-se como exportador de sedimento durante as quadraturas, e importador de sedimentos durante a sizígia. Vale ressaltar que na sizígia chuvosa, o principal responsável pela importação de sedimento foi a margem norte, com uma alta taxa de transporte de carga em suspensão registrada ao longo do dia (-0,24 kg/s/m).

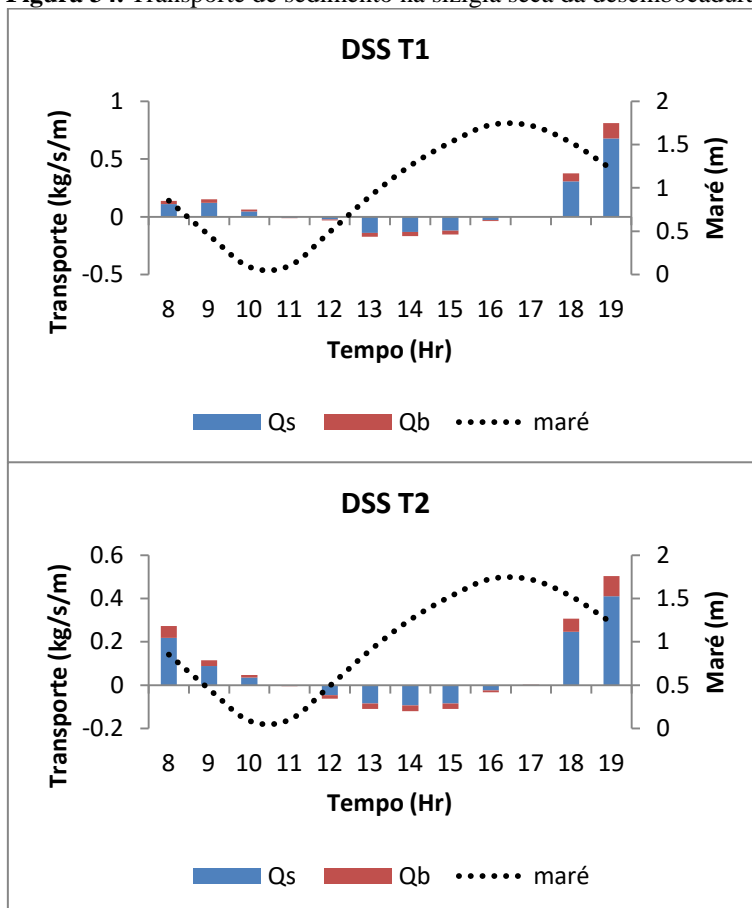
Figura 33. Transporte de sedimento na quadratura seca da desembocadura.

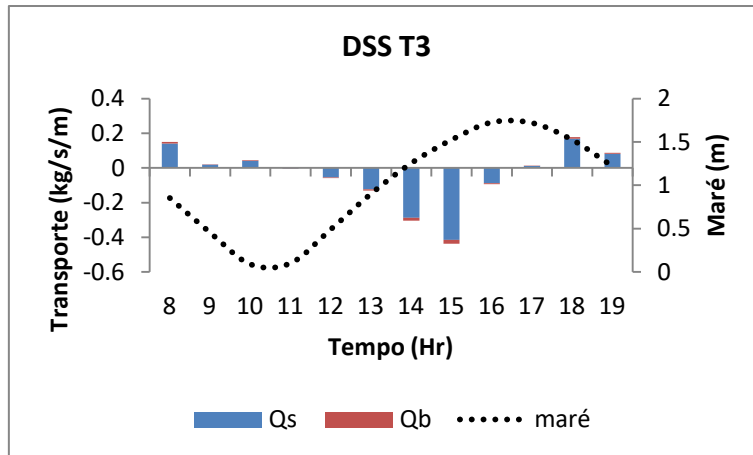




Em azul está o transporte de carga em suspensão (Q_s) e em vermelho está o transporte de carga de fundo (Q_b). T1 (margem sul), T2 (seção intermediária) e T3 (margem norte).

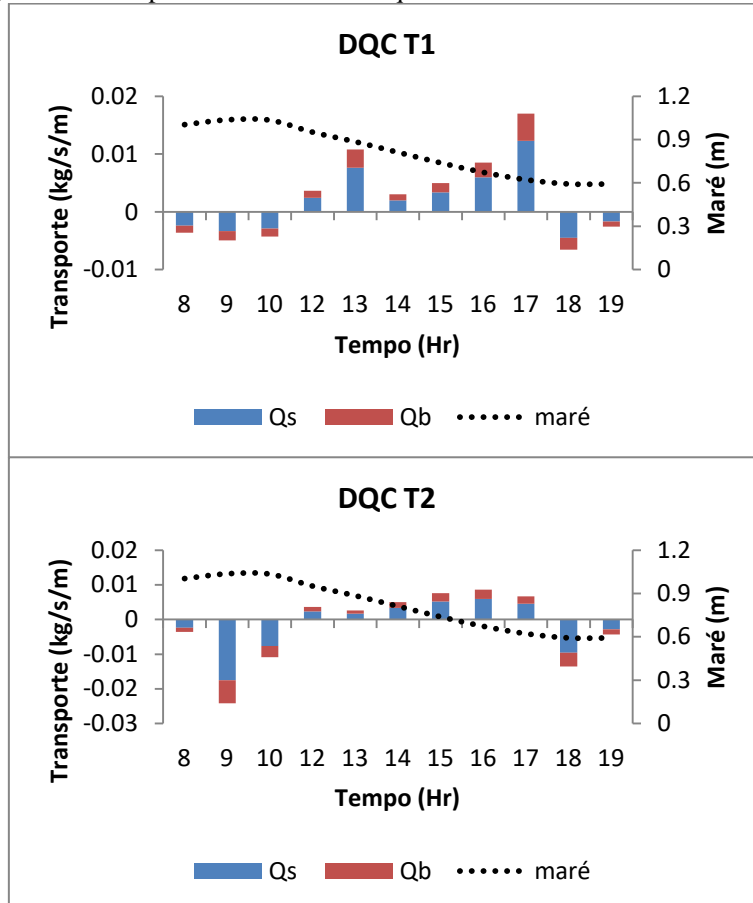
Figura 34. Transporte de sedimento na sizígia seca da desembocadura.

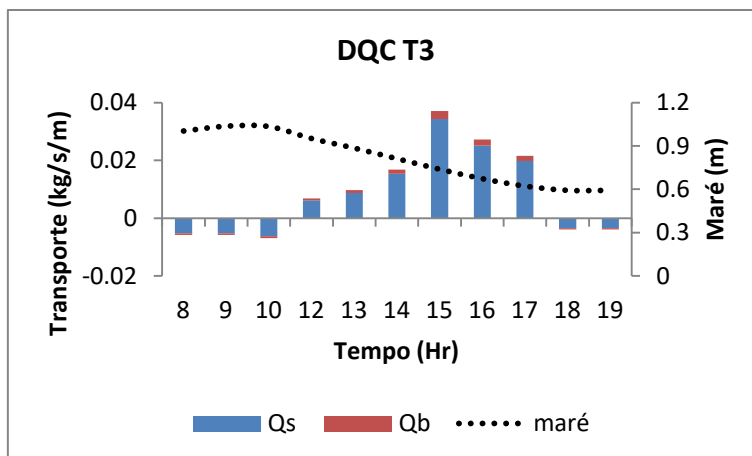




Em azul está o transporte de carga em suspensão (Qs) e em vermelho está o transporte de carga de fundo (Qb). T1 (margem sul), T2 (seção intermediária) e T3 (margem norte).

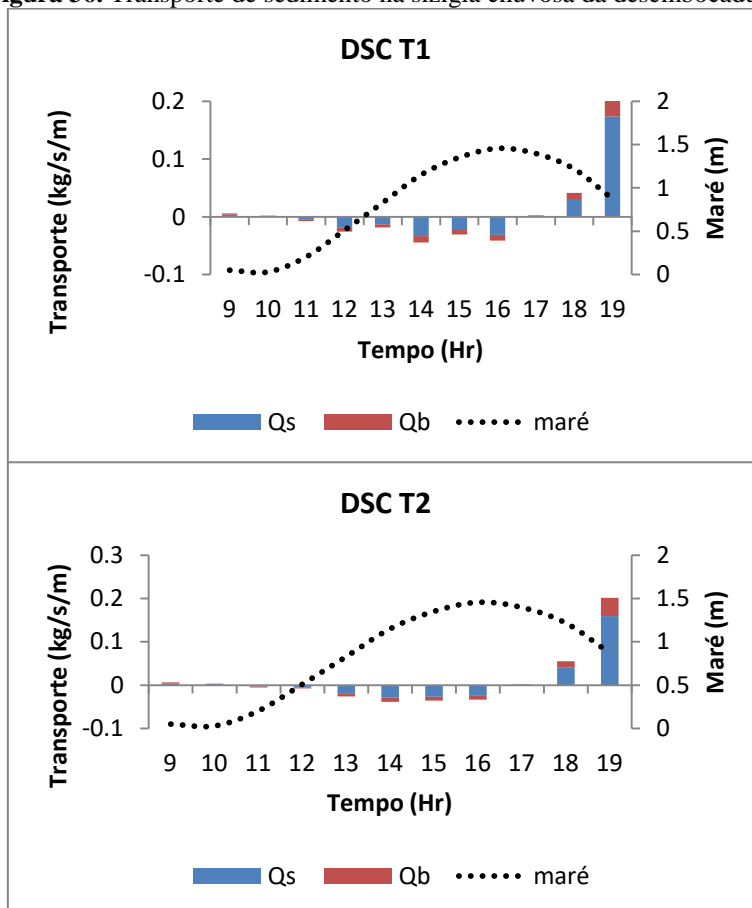
Figura 35. Transporte de sedimento na quadratura chuvosa da desembocadura.

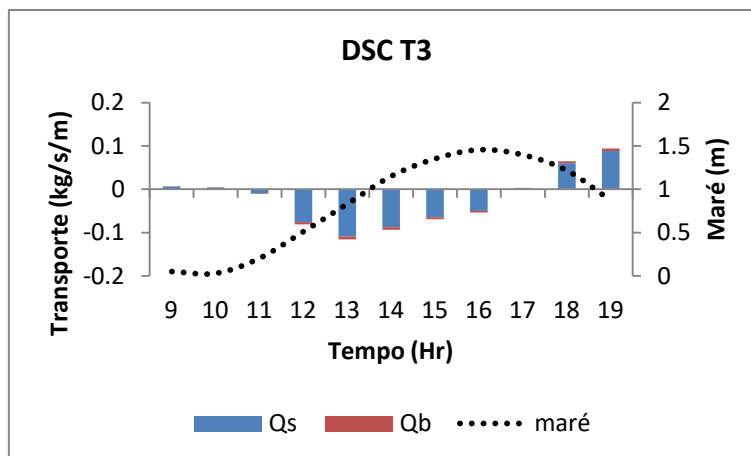




Em azul está o transporte de carga em suspensão (Qs) e em vermelho está o transporte de carga de fundo (Qb). T1 (margem sul), T2 (seção intermediária) e T3 (margem norte).

Figura 36. Transporte de sedimento na sizígia chuvosa da desembocadura.





Em azul está o transporte de carga em suspensão (Qs) e em vermelho está o transporte de carga de fundo (Qb). T1 (margem sul), T2 (seção intermediária) e T3 (margem norte).

5. Discussão

O Sistema Estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim (SEPAPM) apresentou variações temporais e espaciais de seus parâmetros oceanográficos em toda a sua extensão investigada.

Ambos os braços do estuário apresentaram maiores valores de temperatura do que na seção inferior da desembocadura. Por sua vez, o braço norte (Piraquê-Açu) teve temperaturas superiores ao do braço sul (Piraquê-Mirim), com exceção da sizígia seca. Estratificações de temperatura não foram vistas nas campanhas, sem presença de termoclina marcante em nenhum dos pontos amostrais. Garonce e Quaresma (2014) afirmam que a água marinha (mais fria) adentrando o estuário, pode sofrer a influência da presença dos manguezais, cujas planícies entre marés faz com que em momentos de preamar, a água do estuário fique por algum tempo armazenada nessas áreas, possibilitando seu aquecimento. Sendo assim, as maiores temperaturas encontradas nos braços e desembocadura em períodos da tarde e noite estão relacionadas com as águas advindas das partes mais a montante do estuário, tanto as que ficam estocadas nas áreas de manguezais durante a preamar quanto as dos rios, e as mais frias trazidas do oceano.

Em relação à salinidade, durante as quadraturas, os dois braços do estuário registraram maiores valores do que na desembocadura, enquanto nas sizígias ocorre a situação inversa. O Piraquê-Açu foi o único que apresentou uma picnoclina bem desenvolvida a 2 metros de profundidade, indicando uma cunha salina que se desenvolve apenas nos períodos de quadratura, fato este visto também por Barroso (2004). Tanto o Piraquê-Mirim quanto a desembocadura não apresentam estratificação aparente de salinidade. Melado (2011) e Leite (2012) afirmam que a estratificação e a mistura vertical no estuário são condicionadas pela descarga fluvial e as correntes de maré. Silva (2014) complementa esta afirmação ao explicar que a estratificação estuarina do SEPAPM é controlada principalmente pela maré, sendo que nos períodos de quadratura, o efeito é minimizado. Isto é observado principalmente no braço norte, onde a menor influência da maré associada ao fluxo do rio, tanto no período seco como no chuvoso, gera uma cunha salina bem destacada nos primeiros metros de profundidade. Já na desembocadura, os períodos de quadratura apresentam uma fraca estratificação nas regiões mais profundas da seção transversal.

Em relação às velocidades, o Piraquê-Mirim apresentou maiores valores do que o Piraquê-Açu em todas as campanhas. Isto ocorre devido à seção do canal do braço sul ser mais estreita e ligeiramente mais profundo que o braço norte. Contudo, embora

os dois braços difiram em suas magnitudes de velocidade, ocorre uma assimetria de vazante em ambos os rios, com maiores velocidades principalmente em marés de sizígia. A desembocadura, por sua vez, apresentou velocidades maiores do que nos braços, atingindo valores de até 2 m/s, principalmente na margem sul, onde se encontra o canal principal do rio. A morfologia do estuário apresenta uma curvatura após a confluência dos dois braços, assim como um canal mais profundo na margem sul, e uma batimetria três vezes mais rasa na margem norte (Silva, 2013). Silva (2014) afirma que esses são os fatores dominantes na circulação estuarina, sendo a razão das velocidades na margem sul serem maiores que na margem norte. O período seco apresentou velocidades superiores ao período chuvoso. Em diferentes condições hidrológicas e de maré, o fluxo residual no SEPAPM é dominado pela circulação gravitacional, embora possa variar horizontalmente e verticalmente ao longo do ano (Silva, 2014).

De acordo com Mantovanelli et al. (2004), as correntes de maré são as principais atuantes nos processos de mistura e estratificação, ficando secundariamente a descarga de água doce. Além disso, em momentos de maré de sizígia, há um aumento nas velocidades das correntes devido ao aumento da amplitude da maré, colaborando para o aumento dos processos de mistura. Por outro lado, quando há uma diminuição na velocidade destas correntes, os processos de mistura dão lugar aos advectivos, gerando uma maior estabilidade vertical, possibilitando assim o aparecimento de estratificações, o que corrobora com o que foi descrito na área do SEPAPM, coincidindo com resultados encontrados por outros autores (D'Aquino et al., 2011; Garonce e Quaresma, 2014; Pereira et al., 2010).

O *Número de Richardson por Camada* mostrou que o Piraquê-Açu tem comportamento de cunha salina nas quadraturas e totalmente misturado nas sizíguas. Mesmo não tendo sido feito Ri_L para a quadratura chuvosa, é possível esperar comportamento semelhante ao da quadratura seca, devido ao grande gradiente de salinidade observado (figura 7). De acordo com Scully, Friedrichs e Brubaker (2005) a maré vazante apresenta uma maior estratificação de salinidade que a enchente. Isto ocorre devido às altas variações de salinidade observadas nas campanhas do braço norte, associadas a velocidades das correntes no momento.

Já o Piraquê-Mirim apresentou uma coluna d'água totalmente misturada ao longo do ano. O braço sul registrou baixas variações de salinidade e altas velocidades, influenciando por isso em seus resultados. Na desembocadura, observou-se que a margem sul e seção intermediária apresentam uma coluna d'água parcialmente misturada, enquanto a margem norte apresentou-se totalmente misturada ao longo das campanhas. A morfologia do fundo torna-se, então, um fator influente na estratificação da coluna d'água no perfil transversal da desembocadura (Miranda et al., 2002).

Segundo Garonce e Quaresma (2014), quando a vazão fluvial de um estuário é baixa e o Ri_L se eleva, a maré é a variável que mais influencia a distribuição de salinidade. Esta mesma correlação também é observada em trabalhos de Mantovanelli et al. (2004) e Zem (2008). Vale observar que tanto nos dois braços quanto na desembocadura do SEPAPM ocorreram picos nos valores de Ri_L , os quais podem gerar falsas interpretações da estratificação da coluna d'água. Estes valores são resultado, na verdade, de baixíssimas velocidades nos momentos das estofas de maré, que ao serem feitos os cálculos de Ri_L , dão como resultado uma estratificação da coluna d'água. Fato este descartado ao se observar as figuras de variação de salinidade e temperatura das campanhas amostrais.

Portanto, o processo dominante de mistura no SEPAPM é a difusão turbulenta, com exceção do rio piraquê-açu durante as quadraturas, que apresenta uma cunha salina, e é dominado neste período por processo de mistura do tipo entranhamento

(*entrainment*). Estes resultados estão de acordo com os trabalhos de Neves (2010), Melado (2011) e Silva (2014), que em seus estudos também identificaram a predominância de difusão turbulenta nos processos de mistura do sistema estuarino.

O material particulado em suspensão comportou-se de modo variado ao longo das estações do ano. O período seco apresentou maiores concentrações de MPS do que no período chuvoso, em todos os pontos amostrais. No período seco, o rio Piraquê-Açu apresentou os maiores valores de MPS, enquanto no período chuvoso, a desembocadura foi quem apresentou concentrações de MPS superiores aos outros pontos amostrais. Garonce e Quaresma (2014) também encontraram valores médios de MPS maiores no período. Resultado semelhante foi encontrado por Medeiros e Kjerfve (2005) para o estuário de Itamaracá. De acordo com os autores, o fato das concentrações serem significativamente menores na estação chuvosa sugere que a carga de sedimento fluvial é pequena, e também eficientemente filtrada pelos manguezais adjacentes. Por outro lado, a maior concentração na estação seca indica aumento das atividades biológicas e mobilização dos sedimentos. Maiores concentrações de MPS e MO, de um modo geral, ocorreram nos períodos de maré baixa, ou seja, no final da vazante e início da enchente (Garonce e Quaresma, 2014). Kitheka et al. (2003) encontraram o mesmo padrão, sugerindo que as maiores concentrações na enchente estão relacionadas à entrada de água com maior turbidez e durante a vazante, atribuíram à ressuspensão do sedimento do fundo.

O transporte sedimentar mostrou que, embora os braços norte e sul apresentem maiores concentrações de MPS na coluna d'água, a maior competência de transporte está na desembocadura, principalmente na margem norte, sendo a principal responsável por ditar o balanço de sedimento nas campanhas, com exceção da sizígia seca, influenciada pela margem sul (tabela 1).

O braço norte apresenta-se como importador de sedimento durante as quadraturas, e exportador de material durante as sizígias. A exportação está associada às maiores velocidades durante as sizígias e também às planícies de maré presentes no sistema estuarino. De acordo com Zem (2008), as planícies de maré podem se tornar regiões potencialmente fornecedoras de sedimento para o estuário, especialmente quando há inundação de uma maior área entre marés (nas preamares de maré de sizígia), associado à incidência de ventos e ondas, mecanismos que favorecem a erosão e ressuspensão de sedimentos. O braço sul, por sua vez, demonstra ser um exportador de sedimento em todas as campanhas, com exceção da sizígia chuvosa. O Piraquê-Mirim é um braço estreito do estuário, com profundidade em torno de 7-8 metros, e fundo areno lamoso. Por conta disso, a velocidade das correntes torna-se maior do que no Piraquê-Açu o ano inteiro. Na sizígia chuvosa, a intensa velocidade das correntes de maré durante a enchente, principalmente na margem norte, supera o aporte do rio, forçando a entrada de sedimento no Piraquê-Mirim.

Na seção inferior, a desembocadura apresentou-se como exportadora de sedimento em todas as campanhas amostrais, com exceção da sizígia chuvosa, onde o estuário importou sedimento. Todas as campanhas amostrais, o vetor resultante dos transportes de carga de fundo e sedimento em suspensão foi positivo, com exceção novamente da sizígia chuvosa. Nesta campanha, o transporte de carga de fundo foi positivo (0,027 kg/s/m), indicando uma exportação de sedimento, enquanto o transporte de carga em suspensão teve resultado negativo (-0,047 kg/s/m), o que indica uma importação de sedimento pela coluna d'água (figuras 37 e 38).

Tabela 1. Taxas de transporte de carga em suspensão, carga de fundo e carga total para cada campanha.

	PAQS	PASS	PAQC	PASC
ΣQ_b	-0.001	0.031	-	0.017
ΣQ_s	-0.002	0.149	-	0.067
Qt	-0.003	0.180	-	0.084
	PMQS	PMSS	PMQC	PMSC
ΣQ_b	0.002	0.075	0.001	-0.017
ΣQ_s	0.003	0.406	0.002	-0.042
Qt	0.005	0.481	0.003	-0.059
	DQS T1	DSS T1	DQC T1	DSC T1
ΣQ_b	-0.005	0.157	0.007	0.013
ΣQ_s	-0.011	0.810	0.019	0.087
Qt	-0.016	0.967	0.026	0.100
	DQS T2	DSS T2	DQC T2	DSC T2
ΣQ_b	0.005	0.144	-0.006	0.021
ΣQ_s	0.013	0.664	-0.017	0.102
Qt	0.018	0.808	-0.023	0.123
	DQS T3	DSS T3	DQC T3	DSC T3
ΣQ_b	0.001	-0.026	0.007	-0.007
ΣQ_s	0.017	-0.510	0.086	-0.236
Qt	0.018	-0.536	0.093	-0.243

Os valores em azul e positivo indicam fluxo saindo do estuário, e os valores em vermelho e negativo indicam fluxos entrando no estuário.

Dessa maneira, ao fazer o balanço sedimentar dos braços e da desembocadura, observa-se os seguintes cenários:

5.1. Transporte de carga de fundo (Qb)

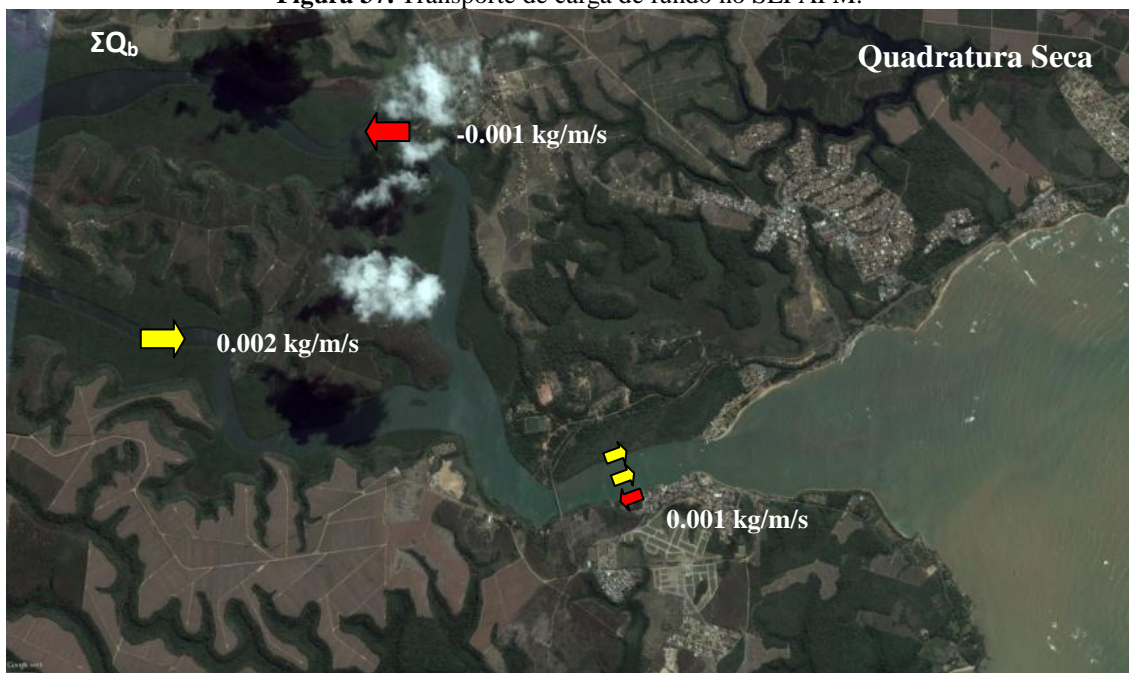
Em relação ao transporte de carga de fundo, observa-se uma predominância de exportação de sedimento, com exceção do Piraquê-Açu na quadratura seca e do Piraquê-Mirim na sizígia chuvosa (figura 37).

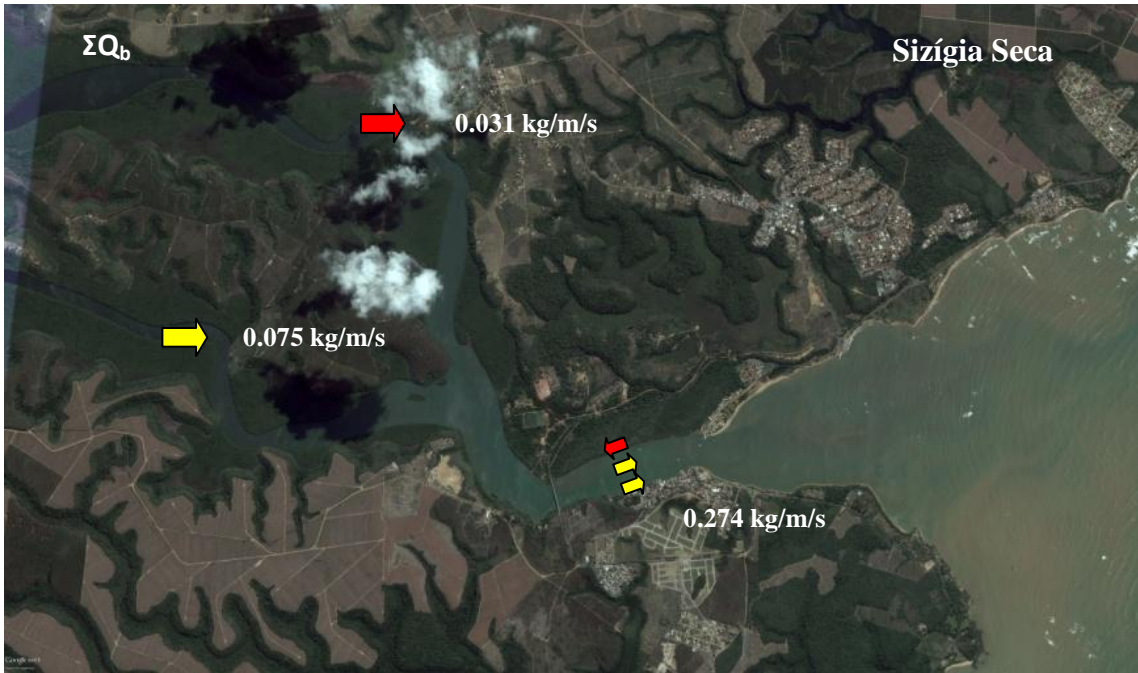
Durante a quadratura, a soma dos transportes de fundo dos braços do estuário (-0,001 e 0,002 kg/s/m) resultou no transporte da desembocadura (0,001 kg/s/m). No período seco, observou-se que a margem sul importou sedimento (-0,005 kg/s/m), enquanto a margens intermediária e norte exportaram material (0,005 e 0,001 kg/s/m). Analisando a morfologia do estuário, é provável que o material exportado pelo rio piraquê-mirim encontra-se com aquele importado pela margem sul da desembocadura, forçando o material a seguir em direção norte. Em determinado ponto, as diferenças de profundidade no entorno geram um transporte, por gravidade, desse material entrando no Piraquê-Açu e saindo pela margem norte do estuário. Silva (2014) observou comportamento semelhante ao analisar o fluxo residual da desembocadura, onde ocorre um giro anti-horário, com material entrando no estuário pela margem sul e saindo pela margem norte, no período seco. Durante o período chuvoso, o transporte do Piraquê-Mirim foi positivo (0,001 kg/s/m), enquanto na desembocadura tanto a margem norte quanto a margem sul exportaram sedimento (0,007 kg/s/m, em ambos os casos) e importou pela seção intermediária (-0,006 kg/s/m). Devido à falta de informações do braço norte na quadratura chuvosa, é difícil interpretar com precisão o que ocorre no

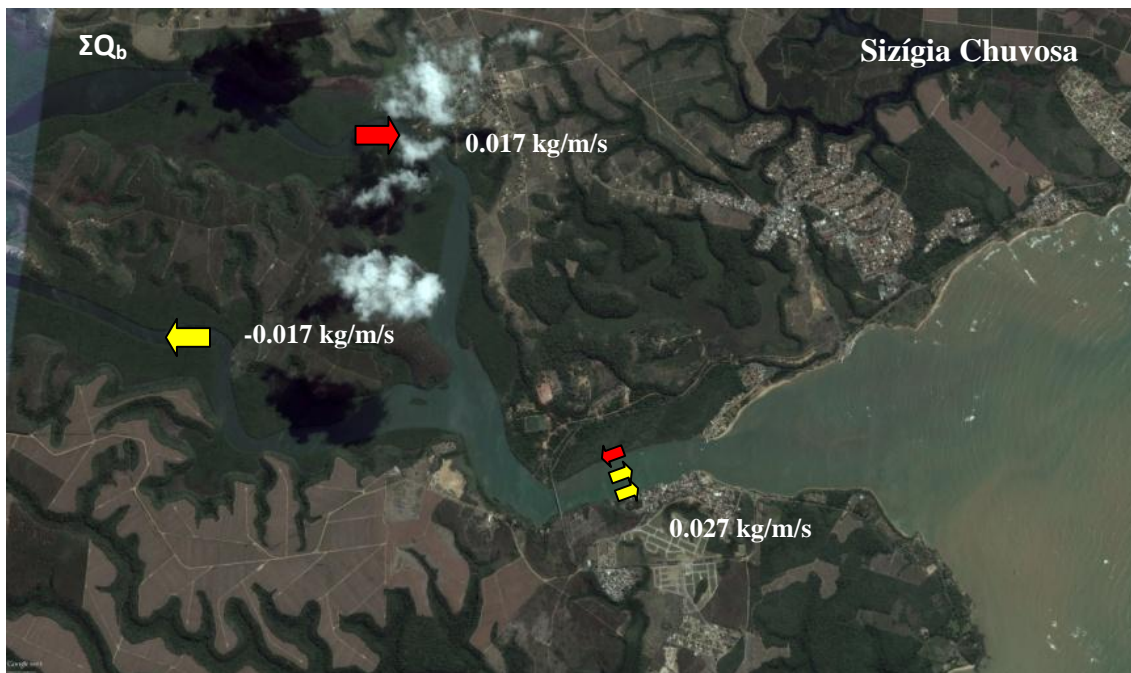
balanço. Entretanto, segundo Wong (2004), ambientes estuarinos dominados pela circulação gravitacional e com estratificação horizontal, tendem a ter fluxo de saída de água estuarina pelas margens mais rasas e entrada de fluxo pelo meio do canal, em toda a coluna d'água.

As sizíguas apresentaram maiores volumes de transporte do que na quadratura. A sizígia seca registrou a maior carga de transporte de fundo saindo do estuário (0,274 kg/s/m). Ambos os braços do estuário tiveram valores positivos de transporte, entretanto, a soma dos vetores não é igual ao transporte registrado na desembocadura. Esse material excedente possivelmente é o resultado da ressuspensão de sedimento na confluência do estuário, principalmente durante a vazante, com menores profundidades e maiores velocidades. Em relação ao perfil transversal da desembocadura, a margem sul e intermediária exportaram sedimento (0,157 e 0,144 kg/s/m), enquanto a margem norte importou material (-0,026 kg/s/m). Este material importado, ao se encontrar com o maior fluxo exportado pelo braço norte, sofre um desvio no sentido sul, o qual é direcionado para fora do estuário pelo fluxo do braço sul. A sizígia chuvosa apresentou comportamento contrário nos dois braços do estuário, enquanto o Piraquê-Açu exportou sedimento, o Piraquê-Mirim importou material sedimentar, ambos em iguais concentrações (0,017 kg/s/m). Na desembocadura, as margens sul e intermediária apresentaram transportes positivos de sedimento (0,013 e 0,021 kg/s/m), enquanto na margem norte ocorreu transporte negativo (-0,007 kg/s/m). O material transportado pelo braço norte, encontra-se com aquele importado pela margem norte, que sofre desvio para o sul, ressuspensando sedimento e, devido a diferenças de profundidade, divide-se em duas direções: uma entrando no braço sul do estuário e outra saindo pela margem sul da desembocadura. Silva (2014) explica que durante o período chuvoso, ocorre um sentido horário de transporte na desembocadura, com altas velocidades de fundo na margem norte em direção ao estuário, e um afinilamento do transporte no canal em direção ao mar.

Figura 37. Transporte de carga de fundo no SEPAPM.







5.2. Transporte de carga em suspensão (Q_s)

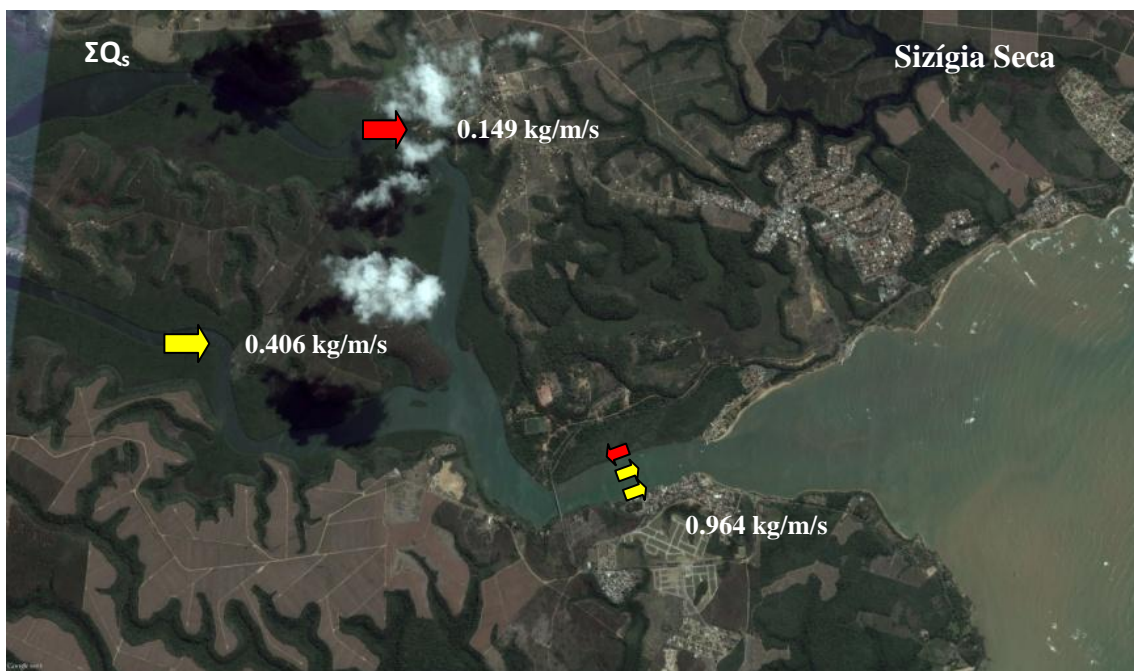
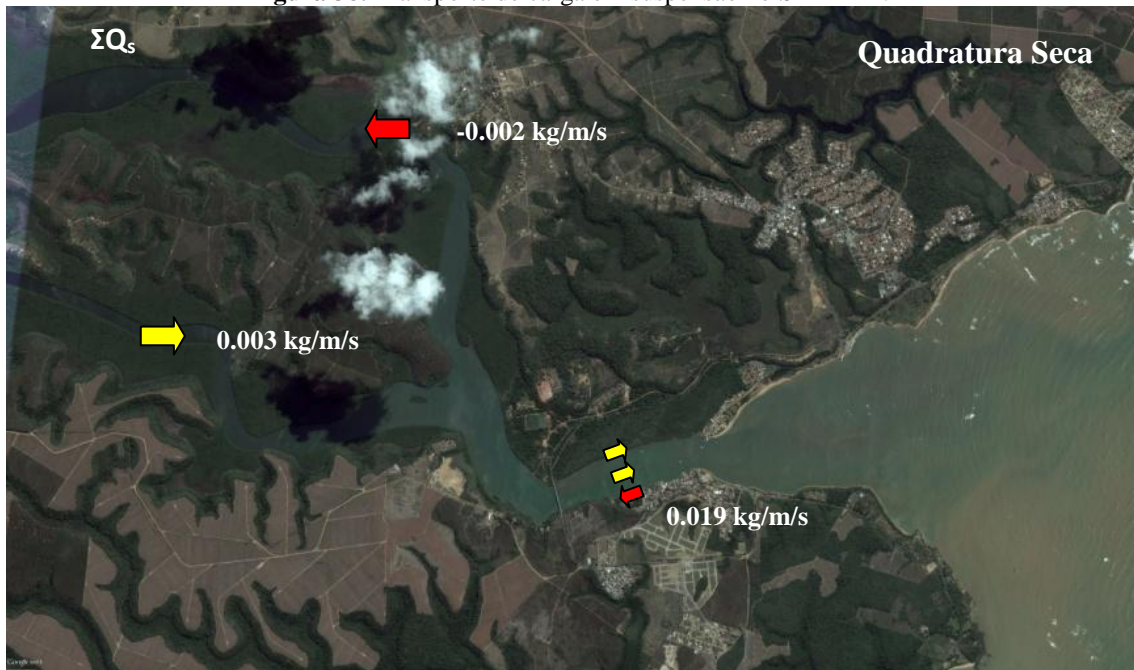
O transporte de carga em suspensão foi maior que o transporte de carga de fundo em todas as campanhas amostrais, assim como também apresentou maiores valores de transporte no período de sizígia (figura 38). O estuário apresentou comportamento de exportador de MPS, com exceção da sizígia chuvosa.

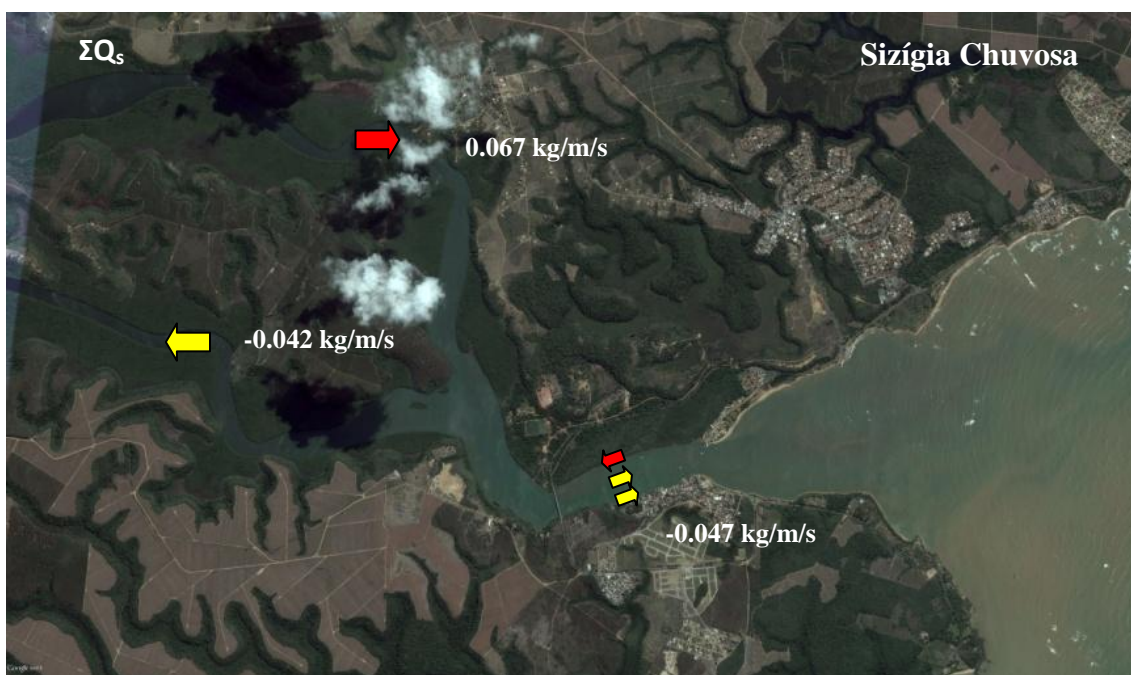
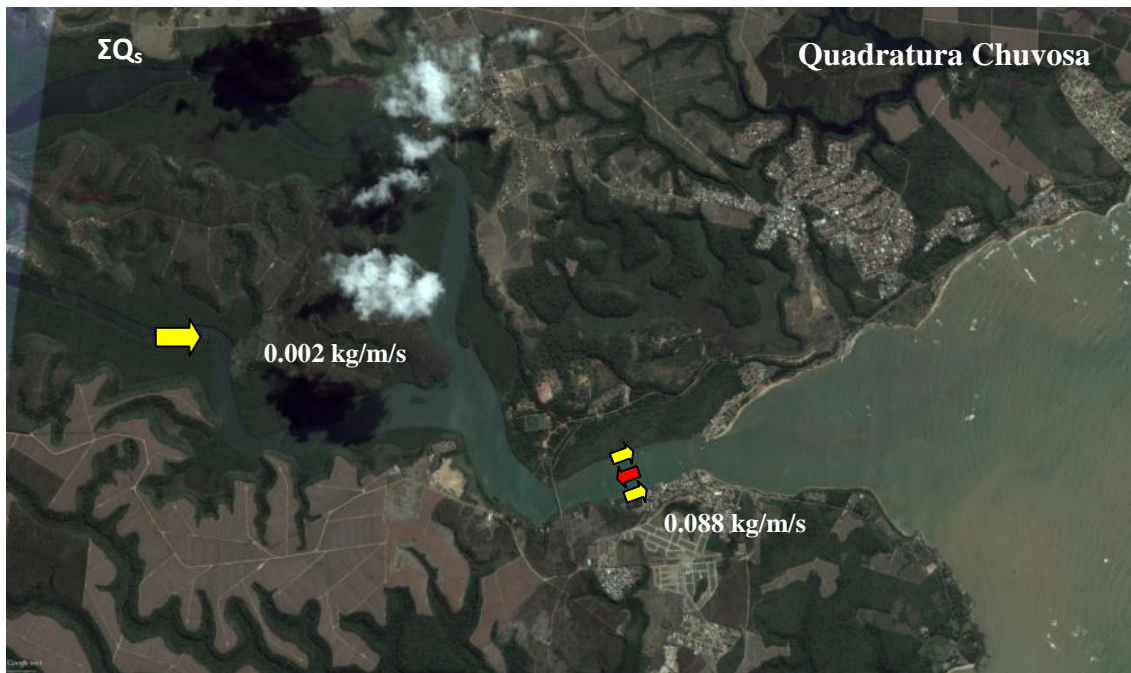
Na quadratura seca, a soma dos vetores de transporte dos braços é menor que na desembocadura, indicando um possível transporte de material ressuspensionado. Assim como o transporte de carga de fundo, a desembocadura apresentou uma exportação de MPS pela seção intermediária e margem norte (0,013 e 0,017 kg/s/m), enquanto a margem sul importou sedimento (-0,011 kg/s/m). Este material vai de encontro aquele transportado pelo Piraquê-Mirim, fazendo um desvio em direção norte, onde se divide em duas vertentes: uma que adentra o Piraquê-Açu e outra que segue para fora do estuário pela margem norte. Já a quadratura chuvosa registrou exportação de material tanto no braço sul, quanto na desembocadura. Mesmo sem o registro do braço norte, entende-se que ocorre uma ressuspensão de sedimento, devido a resultante de transporte da desembocadura ser bastante superior a registrada no rio Piraquê-Mirim. A seção inferior apresentou transporte positivo nas margens norte e sul (0,086 e 0,019 kg/s/m), enquanto a seção intermediária o transporte foi negativo (-0,017 kg/s/m). A margem norte apresentou altos valores de transporte, que estão associados a baixas profundidades e um fundo areno-lamoso, principalmente durante a vazante (figura 38). Valle-levinson et al., (2009) encontraram dois padrões de transporte em estuários, que se diferenciam entre momentos de sizígia e quadratura, onde no primeiro caso, o fluxo residual no canal é em direção ao mar e nas bordas à montante do canal. Já na quadratura, o inverso ocorre, sendo o fluxo no canal em direção à montante e nas bordas em direção à desembocadura. Isto se observa claramente na quadratura chuvosa e nas sizíguas registradas no trabalho.

A sizígia seca apresentou os maiores volumes de exportação de material para a plataforma (0,964 kg/m/s). Os braços do estuário ressuspendem material na confluência para a desembocadura. Esta apresentou exportação de sedimento pelas margens sul e intermediária (0,810 e 0,664 kg/s/m), enquanto a margem norte importou sedimento da

plataforma (-0,510 kg/s/m). O fluxo da margem norte sofre desvio ao encontrar o fluxo do braço norte, o qual é mais intenso. Esse fluxo segue em direção sul, o qual desvia para leste, devido ao encontro com o fluxo do Piraquê-Mirim. A sizígia chuvosa, por sua vez, apresentou comportamento diferenciado. Foi a única campanha em que houve uma resultante de importação de sedimento na desembocadura (-0,047 kg/s/m). O braço norte exportou sedimento, enquanto o braço sul importou material. Na desembocadura, as margens sul e intermediária exportaram sedimento (0,087 e 0,102 kg/s/m), e a margem norte importou sedimento (-0,236 kg/s/m). Nesta situação, o material importado pela margem norte sofre desvio para o sul ao encontrar o fluxo do Piraquê-Açu. Esse material dividiu-se em 3 destinos: uma parte desviou para o Piraquê-Mirim, outra seguiu para a margem sul e uma última parte sedimentou em algum ponto da confluência.

Figura 38. Transporte de carga em suspensão no SEPAPM.





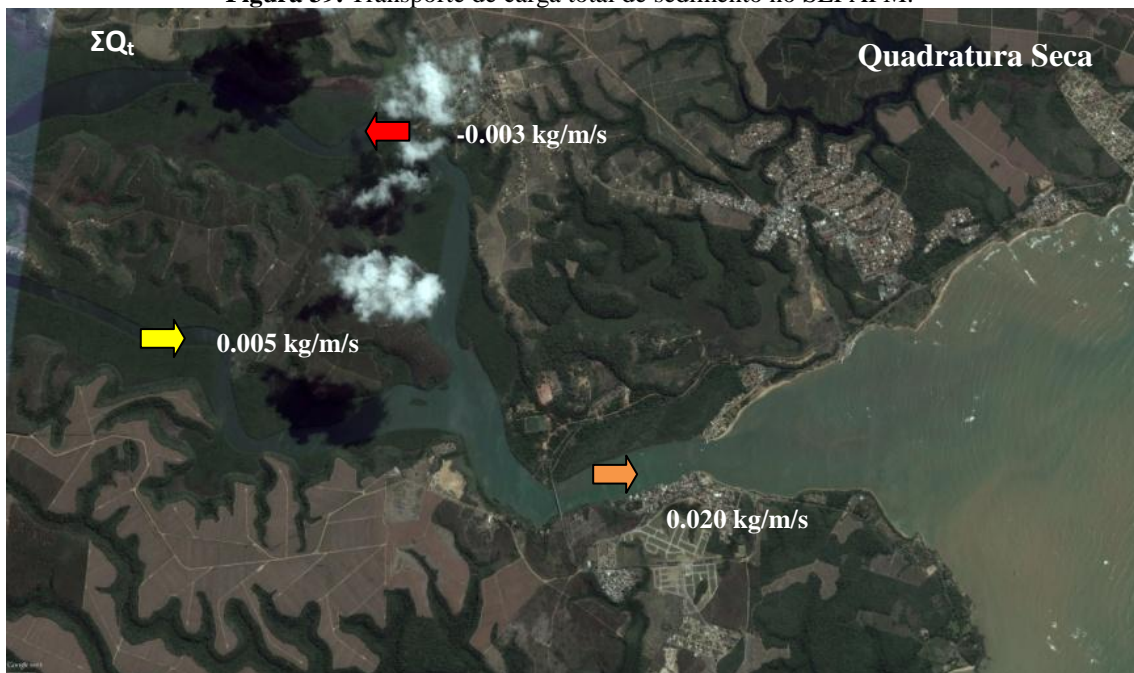
5.3. Transporte de carga total (Q_t)

O transporte de carga total de sedimento apresentou comportamento semelhante ao observado no transporte de material em suspensão (figura 39). Os períodos de sizígia apresentaram volumes de transporte maiores do que na quadratura. A sizígia seca apresentou o maior volume de transporte na desembocadura (1,238 kg/m/s). O Piraquê-Açu apresentou comportamento de importador de sedimento na quadratura, e exportador de sedimento nas sizíguas. Já o Piraquê-Mirim exportou sedimento em todas as campanhas, menos na sizígia chuvosa. A desembocadura apresentou comportamento de exportador de sedimento em quase todas as campanhas, apenas importou sedimento na sizígia chuvosa. Essa diferença pode ter ocorrido devido à passagem de frentes frias

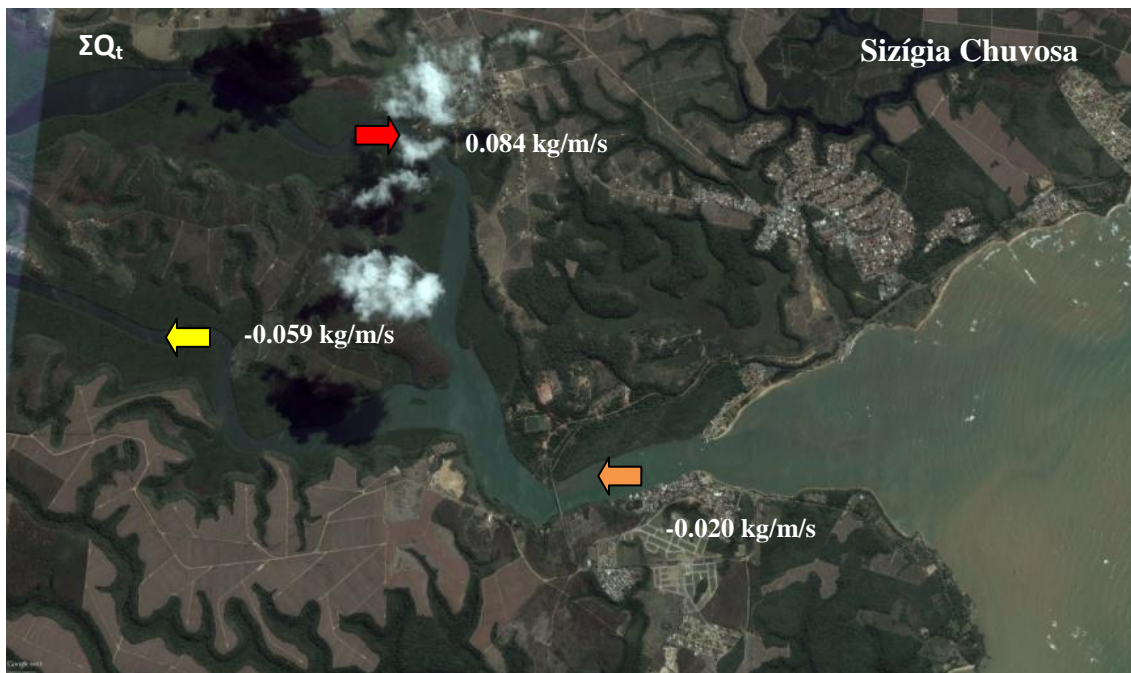
no mês de julho, que aumentam a velocidade dos ventos de sudeste e, conseqüentemente, das correntes de maré, associadas às maiores amplitudes do nível d'água. Nota-se que a margem norte é a principal responsável pelos transportes na desembocadura, devido a suas menores profundidades, maiores velocidades e sedimento areno lamoso, em comparação a margem sul, de grandes profundidades, velocidades menores e sedimento areno lamoso cascalhoso. Apenas durante a campanha de sizígia seca, a margem norte não foi responsável pelo maior volume de transporte da desembocadura. Outro fator que favorece a importação de material é a presença dos manguezais à montante do estuário. Estudos de fluxos de material em suspensão realizados em outras áreas mostram que os manguezais bem vegetados normalmente aprisionam sedimentos durante a enchente, não havendo uma exportação significativa durante a vazante (Kitheka et al., 2003). Estudo de Pereira et al. (2010), analisando a hidrodinâmica do estuário de Caravelas (BA), encontrou resultados de balanço semelhantes ao deste trabalho. Para o autor, tanto a hidrografia quanto o balanço sedimentar são principalmente modulados pela altura da maré, enquanto o aporte de água doce é irrelevante.

Uma média do transporte de carga total das quatro campanhas da desembocadura indica um valor de 0,334 kg/m/s. Estima-se, então, que anualmente esse transporte seja de 10.53 toneladas de sedimento para a plataforma continental adjacente.

Figura 39. Transporte de carga total de sedimento no SEPAPM.







6. Conclusão

O estudo da dinâmica sedimentar em estuários é de grande importância ambiental e socioeconômica. Muitas espécies bentônicas e sésseis dependem do tipo de substrato de fundo. A presença de materiais em suspensão na coluna d'água pode bloquear a penetração de luz, importante para a fotossíntese. Comunidades pesqueiras tiram sua fonte de renda da pesca e captura de animais no ambiente estuarino. Além disso, estuários também são utilizados para moradias, indústrias, portos e recreação. Para continuar procurando um equilíbrio entre homem e natureza, com respostas e soluções para eventuais problemas e uma melhor gestão da zona costeira, a dinâmica sedimentar deve continuar sendo fonte de estudos nestes ambientes.

Os trabalhos realizados no (SEPAPM) são recentes e pontuais, deixando ainda lacunas sobre uma interpretação mais contundente e integrada da dinâmica sedimentar do estuário. Nenhum trabalho ainda havia sido feito sobre transporte total de sedimento no local. Este trabalho é de grande relevância devido à escassez de dados sobre transporte de carga total de sedimento no SEPAPM. Portanto, ele também visa contribuir para um melhor entendimento do comportamento do sistema, o que permitirá uma maior capacidade de planejamento e gerenciamento das atividades implantadas neste ambiente.

O SEPAPM apresenta um complexo padrão hidrodinâmico e sedimentar entre seus braços e desembocadura. A hidrodinâmica e o balanço sedimentar são influenciados tanto pela variação de maré quanto pela descarga fluvial dos seus rios. A vazão do rio torna-se um fator sazonal de influência (período seco e chuvoso), enquanto a maré representa um fato diário (enchente e vazante, quadratura e sizígia).

O estuário classifica-se como parcialmente misturado e fracamente estratificado (Barroso, 2004; Neves, 2010; Melado, 2011; Silva, 2014). Dessa forma, a difusão turbulenta é a principal forma de mistura das suas águas. A exceção é o Piraquê-Açu, que durante as quadraturas apresenta estratificação da coluna d'água, formando cunha salina, e com mistura de água por entranhamento (*entrainment*).

De certa forma, estabelecer relações claras entre o fluxo e o balanço geral de sedimentos é uma tarefa extremamente difícil devido aos erros existentes nas medidas

de fluxos (Dyer, 1997). O Balanço sedimentar mostrou que o transporte de carga em suspensão é superior ao transporte de carga de fundo. Além disso, embora o braço norte apresente mais MPS do que o braço sul, este é o que tem as maiores taxas de transporte sedimentar dentre os dois. Fato este explicado pelo canal do Piraquê-Mirim ser mais estreito, ligeiramente mais profundo e apresentar maiores velocidades. O transporte de carga de fundo teve uma maior participação durante as quadraturas, representando 50% do transporte de carga em suspensão. Os dois braços do estuário tiveram comportamento de exportador de sedimento, com exceção do piraquê-açu na quadratura seca, e o Piraquê-Mirim na sizígia chuvosa.

A desembocadura comportou-se como exportadora de sedimento em todas as campanhas, menos na sizígia chuvosa. A margem norte apresentou as maiores taxas de transporte, sendo responsável direto pelo vetor resultante do transporte. O transporte de carga de fundo foi mais representativo nas quadraturas, com exceção da margem norte, onde as taxas de transporte de fundo foram baixas.

O balanço de sedimento apresentou padrões de transporte na confluência dos braços com a desembocadura. Durante as quadraturas parece ocorrer um giro horário de transporte, com material sendo importado pela margem sul, encontrando-se com o material exportado pelo braço sul. Este material então sobe para norte, onde devido a efeitos de correntes e gravidade, segue tanto para dentro do rio Piraquê-Açu, como sai pela margem norte em direção ao mar. Já na sizígia, o efeito inverso ocorre, um possível giro anti-horário se forma com material entrando pela margem norte, sendo desviado para sul pelo fluxo do Piraquê-Açu. Esse material, de acordo com sua intensidade e fluxo do Piraquê-Mirim é novamente desviado para a margem sul em direção ao mar, e também pode adentrar o braço sul, importando sedimento para dentro dele.

Cálculos de transporte de carga total de sedimento foram medidos e indicaram que 10,53 toneladas de sedimento são exportadas anualmente pelo estuário para a plataforma continental adjacente.

Este estudo teve como objetivo principal estimar taxas de transporte total de sedimento do estuário para a plataforma. Recomenda-se que continuem sendo feitos novos estudos sobre a dinâmica sedimentar do ambiente para uma melhor interpretação dos mecanismos de transporte, principalmente na região da confluência dos rios com a desembocadura.

Bibliografia

Albino, J.; Jiménez, J.A.; Oliveira, T.C.A. Planform and mobility in the Meaípe-Maimbá embayed beach on the South East coast of Brazil. *Geomorphology*, n° 253, p. 110-122, 2016.

Alves, G.; Flores-Montes, M.; Gaspar, F.; Gomes, J.; Feitosa, F. Eutrophication and water quality in a tropical Brazilian estuary. *Journal of Coastal Research. Special Issue*, n° 65, p. 7-12, 2013.

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

Bertoldi, L. Avaliação do estado trófico de um estuário tropical. Dissertação (mestrado). Pós-graduação em oceanografia ambiental. UFES, 2014.

Boni, G.C. Padrão de transporte de sedimentos da desembocadura do sistema estuarino dos rios piraquê-açu e piraquê-mirim, Aracruz (ES). Monografia. Curso de oceanografia. UFES, 2010.

Correa, S.M.B.B. Probabilidade e Estatística. Belo Horizonte. PUC Minas. 2ª edição, p. 116, 2003.

Dalrymple, R.W.; Zaitlin, B.A.; Boyd, R. Estuarine Facies Models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*. N° 62(6), p. 1130-1146, 1992.

D'Aquino, C.A.; Neto, J.S.A.; Barreto, G.A.M.; Schettini, C.A.F. Caracterização oceanográfica e do transporte de sedimentos em suspensão no estuário do rio mampituba, SC. *Revista Brasileira de Geografia Física*. N° 29(2), p. 217-230, 2011.

Dyer, K.R. Localized mixing of low salinity patches in a partially mixed estuary (Southampton Water, England). *Estuarine Comparasions*, Academic Press. P. 21-36, 1982.

Dyer, K.R. Sediment transport processes in estuaries. Cap. 14. *Geomorphology and sedimentology of estuaries: Developments in sedimentology 53*. Amsterdam. Elsevier science, 1995.

Dyer, K.R. *Estuaries: a physical introduction*. 2ª edição, p. 195, 1997.

Franco, T. Morfologia e dinâmica das formas de fundo associadas à entrada de dois estuários distintos – piraquê-açu/piraquê-mirim (ES) e Caravelas (BA). Monografia. Curso de oceanografia. UFES, 2010.

Garonce, F.A.A.; Quaresma, V.S. Hydrodynamic aspects at Vitória Bay mouth, ES. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. V. 86(2), p. 555-570, 2014.

Gartner, J.W. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*. N. 211, p. 169-174, 2004.

Kitheka, J.U.; Ongwenyi, G.S.; Mavuti, K.M. Fluxes and Exchange of suspended sediment in tidal inlets draining a degraded mangrove forest in Kenya. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n° 56, p. 655-667, 2003.

Leite, T.A. Variação espacial e temporal da salinidade no sistema estuarino do rio piraquê-açu (Aracruz, ES). Dissertação (mestrado). Pós-graduação em oceanografia ambiental. UFES, 2012.

Lobo, F.J.; Plaza, F.; González, R.; Dias, J.M.A.; Kapsimalis, V.; Mendes, I.; Día Del Río, V. Estimations of bedload sediment transport in the Guadiana Estuary (SW Iberian Peninsula) during low river discharge periods. *Journal of Coastal Research*. V. 41, p. 12-26, 2004.

Mantovanelli, A.; Marone, E.; Silva, E.T.; Lautert, L.F.; Klingenfuss, M.S.; Prata Jr., V.P.; Noernberg, M.A.; Knoppers, B.A.; Angulo, R.J. Combined tidal velocity and duration asymmetries as a determinant of water transport and residual flow in Paranaguá Bay estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. V. 59, p. 523-537, 2004.

Mayerle, R.; Narayanan, R.; Etri, T. Wahab, A.K.A. A case study of sediment transport in the Paranagua Estuary Complex in Brazil. *Ocean Engineering*. V. 106, p. 161-174, 2015.

Medeiros, C.; Kjerfve, B. Longitudinal salt and sediment fluxes in a tropical estuary: Itamaracá, Brazil. *Journal of coastal research*, v. 21, n°4, p. 751-758, 2005.

Melado, A.S.S.G. Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão na desembocadura do sistema estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim, Aracruz – ES. Dissertação (mestrado). Programa de pós-graduação em oceanografia ambiental. UFES, 2011.

Mendonça, F.; Oliveira, I.M.D. Climatologia: noções básicas e clima do Brasil. Oficina de Textos. São Paulo, 2007.

Miranda, L.B.; Castro, B.M.; Kjerfve, B. Princípios de oceanografia física de estuários. São Paulo, EDUSP, 2002.

Monteiro, S. M. Hidrogeoquímica dos elementos maiores e traço no sistema estuarino piraquê-açu e piraquê-mirim. Tese (doutorado). Pós-graduação em oceanografia ambiental. UFES, 2015.

Moura, M.G.; Quaresma, V.S.; Bastos, A.C.; Veronez Jr., P. Field observations of SPM using ADV, ADP, and OBS in a shallow estuarine system with low SPM concentration – Vitória Bay, SE Brazil. *Ocean Dynamics*. V. 61, p. 273-283, 2010.

Neto, E.V.G. Observação do transporte de sedimentos em suspensão ao longo do canal norte do rio Amazonas durante condições de baixa descarga (outubro 2008). Dissertação (mestrado). Pós-graduação em oceanografia. UERJ, 2010.

Neves, L.C.L. Dinâmica sedimentar de uma porção do banco arenoso na desembocadura do sistema estuarino dos rios piraquê-açu e piraquê-mirim, Aracruz – ES. Monografia. Graduação em oceanografia. UFES, 2013.

Neves, R.C. Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão nos dois braços do sistema estuarino Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim, Aracruz – ES. Monografia. Curso de oceanografia. UFES, 2010.

Nichols, M.M.; Biggs, R.B. Coastal Sedimentary Environment. *Estuaries*, p. 77-113, 1985.

Nittrouer, C.A.; Wright, L.D. Transport of particles across continental shelves. *Reviews of Geophysics*. New York, v. 32, n. 1, p. 85-113, 1994.

Oliveira, K.S.S.; Quaresma, V.S. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. *Journal of South American Earth Sciences*. V. 78, p. 101-115, 2017.

Poorhosein, M.; Afzalimehr, H.; Sui, J.; Singh, V.J.; Azareh, S. Empirical bed load transport equations. *Internacional Journal of Hydraulic Engineering*. N. 3, v. 3, p. 93-101, 2014.

Silva, A.E.; Quaresma, V.S.; Bastos, A.C. Sedimentological sectorization of an estuarine system in a regressive coast, southeast Brazil. *Journal of sedimentary research*. V. 83, p. 994-1003, 2013.

Silva, F.N.P. Dinâmica de um canal estuarino fracamente estratificado. Dissertação (mestrado). Programa de pós-graduação em oceanografia ambiental. UFES, 2014.

Suguio, K.; Martin, L.; Bittencourt, A.C.S.P.; Dominguez, J.M.L.; Flexor, J.M. Flutuações do nível relativo do mar durante o quaternário superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 15, p. 273-286, 1985.

Soulsby, R. *Dynamics of marine sands*. Thomas Telford, UK, 1997.

Strickland, J.L.H.; Parsons, T.R. *A practical handbook of sea-water analysis*. 2 ed. Canadá, n. 167, p. 311, 1972.

Van Rijn, L.C. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua publication. Amsterdam, The Netherlands, 1993.

aVan Rijn, L.C. Unified view of sediment transport by currents and waves, I: initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, n. 6, p. 649-667, 2007.

bVan Rijn, L.C. Unified view of sediment transport by currents and waves, II: Suspended transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, n. 6, p. 668-689, 2007.

Van Rijn, L.C. Simple general formulae for sand transport in rivers, estuaries and coastal water. <www.leovanrijn-sediment.com> acessado em 20 de novembro de 2017.

Zem, R.C. Hidrodinâmica e fluxo de material particulado em suspensão na região estuarina da baía de Paranaguá – PR. Dissertação (mestrado). Programa de pós-graduação em geologia e geofísica marinha. Universidade Federal Fluminense, 2008.