



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**LEANDRO DE SOUZA SANTANA**

**UTILIZAÇÃO DO RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO PARA  
ESTIMATIVA DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO**

**BELÉM**

**2018**

**LEANDRO DE SOUZA SANTANA**

**UTILIZAÇÃO DO RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO PARA ESTIMATIVA DO  
MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica (CPGF) da Universidade Federal do Pará – UFPA para obtenção do grau de mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos em Geofísica  
Marinha

Orientador: Dr. Marcelo Rollnic

**BELÉM**

**2018**

**LEANDRO DE SOUZA SANTANA**

**UTILIZAÇÃO DO RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO PARA ESTIMATIVA DO  
MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica (CPGF) da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de mestre em Métodos em Geofísica Marinha.

Data da aprovação: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

Conceito: \_\_\_\_\_

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Marcelo Rollnic – Orientador

(UFPA)

---

Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário

(UFPA)

---

Dra. Ludmila Assunção Pinheiro

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço,

Ao Professor Marcelo Rollnic, pela orientação e apoio na minha formação. Pela liberdade com a qual me deixou caminhar pela estrada do saber.

Ao Professor Renan, sempre deixando uma palavra amiga.

À todos os membros do LAPMAR, especialmente aos brothers Yuri Prestes, Iran Silva, Mauricio Costa, Thais Borba/Rafael Aquino, Carol, Adriel e Sury Monteiro por estarem sempre prontos a ajudar.

Ao Programa de Pós-graduação em Geofísica da UFPA em conjunto com CNPQ, pela oportunidade de crescimento profissional e bolsa de mestrado concedida.

## RESUMO

Este trabalho avaliou a eficiência de perfiladores acústicos de corrente por efeito Doppler na estimativa de material particulado em suspensão, através de um estudo de caso, tendo como local de pesquisa o estuário do rio Pará. O método acústico foi comparado ao método óptico e várias abordagens de cálculo do material particulado em suspensão a partir de retroespalhamento acústico foram aplicadas. Nesse contexto, foram realizadas observações diretas de material particulado em suspensão simultaneamente à coleta de dados acústicos e ópticos, durante um ciclo de maré. Os resultados demonstraram que medidas de material particulado em suspensão com boa acurácia podem ser obtidas utilizando perfiladores acústicos de corrente por efeito Doppler, e seu alcance espaço-temporal torna-o bastante promissor como técnica alternativa na obtenção deste parâmetro. O perfilador acústico com frequência de 1200 khz foi mais preciso que o perfilador com frequência de 600 khz. O método de Gartner foi o único a estimar com precisão aceitável o material particulado em suspensão para este estuário, enquanto que o método de Deines foi o que apresentou pior desempenho. O método óptico possui a vantagem de não ser tão dependente da granulometria quanto o método acústico, além de mostrar respostas mais lineares ao aumento da concentração. Quantitativamente, não houve diferenças significativas nas estimativas entre o método óptico e acústico, mas há respostas diferentes entre os perfis verticais.

Palavras-chaves: Método acústico. Método óptico. Material particulado em suspensão.

## **ABSTRACT**

This work evaluated the efficiency of acoustic doppler current profilers in the estimation of suspended particulate matter through a case study, having as a research site the Pará river estuary. The acoustic method was compared to the optical method and several approaches of calculation of suspended particulate matter from acoustic backscatter were applied. In this context, direct observations of suspended particulate matter were made simultaneously to the collection of acoustic and optical data during a tidal cycle. The results showed that measurements of suspended particulate matter with good accuracy can be obtained using acoustic doppler current profilers, and its space-time reach makes it quite promising as an alternative technique in obtaining this parameter. The acoustic profiler with a frequency of 1200 kHz was more accurate than the profiler with a frequency of 600 kHz. The Gartner method was the only one to accurately estimate the particulate matter suspended in this estuary, while the Deines method presented the worst performance. The optical method has the advantage and is not as dependent on particle size as the acoustic method, besides showing more linear responses to the increase in concentration. Quantitatively, there were no significant differences in the estimates between the optical and acoustic method, but there are different responses between the vertical profiles.

**Keywords:** Acoustic method. Optical method. Suspended particulate matter.

## LISTA DE FIGURAS

1 Encontro das águas do rio Amazonas e Tapajós. Fonte: Pousadinhas. ....	3
2 Amostrador isocinético D-74 (A-B). D-96 (C-D). Fonte: Gray e Gartner,2009. ....	5
3 Sistema de filtragem e garrafa hidrográfica de Van Dorn. Fonte: Rafael Aquino. ....	5
4 Princípio de medição de turbidímetro em radiação espalhada (A). Sensor óptico, (OBS-ATU75W2-USB) (B). Fonte: Policontrol e JFE Advantech. ....	6
5 Perfilador acústico (ADCP) da RDI Instruments montado em catamarã.....	8
6 Ilustração sobre o funcionamento do ADCP. ....	9
7 Rio Pará - Mapa de localização da área de estudo e pontos de coleta.....	13
8 Perfil espaço-temporal de retroespalhamento acústico (RA). Linha amarela na base corresponde ao fundo falso/retroespalhamento máximo. ....	21
9 Regressão linear entre o MPS in situ, RO e RA (ADCP 600 e 1200 khz) em diferentes trechos do rio Pará. Valores de RA e RO registrados pelo ADCP e OBS nas mesmas profundidades onde o MPS in situ foi obtido. Significativa no nível 0,05. ....	23
10 Estimativa de MPS a partir dos diferentes métodos de conversão do sinal acústico para ADCP de 600 e 1200 khz .....	25
11 Perfis verticais de MPS pelos diferentes métodos de conversão do sinal acústico. Linha sólida corresponde ao padrão observado pelo método óptico .....	29
12 Perfis espaço-temporais de MPS a partir do RA e RO de Sotave, Vigia e Turé. Os pontos dentro da imagem correspondem as concentrações de MPS in situ. Dados interpolados pelo método inverse distance to a power.....	29
13 Séries temporais de concentração de MPS in situ e as séries estimada pelo retroespalhamento óptico e retroespalhamento acústico (método de Gartner) no estuário do rio Pará. O marcador em formato de círculo corresponde a amostras de fundo e o quadrado amostras de superfície .....	31

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO MPS.....	3
3.2 TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM DE MPS .....	4
<b>3.2.1 Técnicas tradicionais</b> .....	<b>4</b>
3.2.1.1 Amostradores isocinéticos.....	4
3.2.1.2 Técnicas gravimétrica.....	5
<b>3.2.2 Técnica óptica</b> .....	<b>6</b>
<b>3.2.3 Técnica acústica</b> .....	<b>7</b>
3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ADCP .....	8
3.4 EQUAÇÃO DO SONAR .....	9
3.5 MÉTODOS DE CONVERSÃO DE RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO (RA) EM MPS .....	11
<b>3.5.1 Método de Deines</b> .....	<b>11</b>
<b>3.5.2 Método de Gartner</b> .....	<b>12</b>
<b>3.5.3 Método de correlação direta</b> .....	<b>12</b>
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>13</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDO .....	13
4.2 AMOSTRAGEM.....	14
4.3 MPS A PARTIR DO MÉTODO GRAVIMÉTRICO.....	14
4.4 MPS A PARTIR DO MÉTODO ÓPTICO .....	15
4.5 MPS A PARTIR DO MÉTODO ACÚSTICO .....	15
<b>4.5.1 Conversão do RA em MPS</b> .....	<b>17</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>19</b>
5.1 ANÁLISE DO CONJUNTO DE DADOS .....	19
5.2 PERFIS ESPAÇO-TEMPORAIS DE RA CORRIGIDOS.....	20
5.3 REGRESSÃO ENTRE MPS <i>IN SITU</i> COM RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO E ÓPTICO .....	22

5.4 ESTIMATIVA DE MPS PELOS DIFERENTES MÉTODOS ACÚSTICOS .....	24
5.5 COMPARAÇÃO ENTRE ESTIMATIVAS DE MPS PELOS MÉTODOS ACÚSTICO E ÓPTICO.....	28
<b>5.5.1 Pefis espaço – temporais de MPS estimados com RA e RO .....</b>	<b>28</b>
<b>5.5.2 Séries temporais de MPS estimados com RA e RO .....</b>	<b>30</b>
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>34</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>35</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Durante a segunda guerra mundial o campo da acústica submarina desenvolveu-se consideravelmente. Neste período o método acústico foi fortemente aplicado na criação de sonares capazes de detectar alvos submarinos. Ao fim da guerra, o grande conhecimento adquirido sobre o campo da acústica submarina foi direcionado para criação de instrumentos comerciais, dentre eles os perfiladores de corrente por efeito Doppler (*Acoustic Doppler Current Profile-ADCP*). Entretanto, notou-se que os ecos recebido destes equipamentos não só possibilitavam estimar a intensidade e direção das correntes, mas carregavam informações dos espalhadores (fitoplâncton, zooplâncton, sedimento em suspensão), que poderiam ser utilizadas para outras aplicações oceanográficas (Holdaway et al., 1999).

Estudos iniciais sobre o uso de técnicas acústicas para determinar concentrações de sedimentos em suspensão foram realizados por Urick (1948); Proni et al., (1975); Young et al., (1982) e Hay (1983). Com o intuito de estimarem a concentração de material particulado em suspensão (MPS) com o auxílio de perfiladores acústicos comerciais, alguns trabalhos foram realizados por Gartner (2004), Filizola e Guyot (2004), Anastasiou et al., (2015).

O material particulado em suspensão (MPS) é um parâmetro de grande interesse para o gerenciamento costeiro, pois elucida o balanço sedimentar (erosão, deposição, transporte). Além, de ser fonte de nutrientes, bem como de materiais potencialmente tóxicos, como pesticidas e metais que são facilmente adsorvidos pelas partículas sedimentares.

O método acústico tem se mostrado promissor na obtenção de MPS, pois seu uso garante coleta não intrusiva com excelente resolução espaço-temporal, ou seja, pode ensonificar uma grande área comparado com métodos tradicionais e obter dados com alta resolução temporal necessários para descrever processos em microescala de alta frequência, o que o torna ainda mais notável. Entretanto, possui limitações relacionadas a variações granulométricas, que com algumas ressalvas pode ser contornado. Deste modo, este trabalho busca aplicar o método acústico utilizando ADCP em 3 pontos de um estuário, com intuito de quantificar o material particulado em suspensão e contribuir com o aprimoramento desta técnica. Além de compará-lo com resultados do método óptico.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Aplicar o método acústico utilizando ADCPs para quantificar material particulado em suspensão.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Determinar as concentrações de MPS através do método gravimétrico – MPS *in situ*.

Determinar as concentrações de MPS através do método óptico.

Avaliar diferentes metodologias para calcular as concentrações de MPS através do método acústico.

Avaliar a eficiência do método acústico em relação às medições *in situ* e ao método óptico.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO MPS

Os materiais carreados pelas águas pluviais, gravidade e vento para os ambientes aquáticos exercem forte influência sobre estes, determinando em muitos casos seus aspectos físico-químicos (densidade, transparência, pH, teor de oxigênio, etc), bem como aspectos biológicos (produtividade e distribuição), (Herbert et al., (1961); Gammon (1970); McCabe e O'Brien (1983); Esteves (1998)). Estes elementos podem estar na forma dissolvida, colóide ou particulada e serem de origem orgânica (organismos, detritos) ou inorgânica (minerais), (Figura 1).



Figura 1: Encontro das águas do rio Amazonas e Tapajós. Fonte: Pousadinhas.

A diferença entre material particulado e dissolvido é operacional, logo depende da aplicação. Com base nessa definição, o material particulado consiste de partículas sólidas com diâmetro maior que  $0,45 \mu\text{m}$  (Wurl, 2009). Estes materiais são transportados como carga de fundo ou em suspensão na coluna d'água.

São diversas as relações do material particulado em suspensão com o ambiente aquático, em função de sua variedade na composição química, tamanho e morfologia. Estas partículas atuam como limitadores da penetração de luz, fontes de nutrientes e elementos tóxicos. Por possuírem propriedade adsorssiva comumente estão associados a metais e substâncias potencialmente poluidoras (Mascarenhas et al., 2004). Por isso, é um dos aspectos considerado para indicar nível de poluição e estado trófico do sistema aquático (Esteves, 1998; Guimarães e Sígolo, 2008).

Newcombe e Macdonald (1991) publicaram uma compilação dos trabalhos que apresentam os efeitos do MPS na biota aquática, mostrando sua influência sobre todos os níveis tróficos. O trabalho realizado por Wilber e Clark (2001) mostrou o aumento na mortalidade dos peixes, crustáceos e bivalves em razão ao aumento na concentração de MPS associados a dragagem de rios. Humphrey et al., 2008 apresentou o impacto do MPS na fertilização de corais.

A concentração de MPS é uma característica dinâmica a qual muda com a fase da maré, padrão de corrente, descarga fluvial, sazonalidade pluviométrica e processos de deposição (Dyer., 1988). Olsen et al., 1982, Amore e Randazzo., 1997, Filizola e Guyot., 2011 apontaram que o conhecimento sobre a dinâmica do material particulado em suspensão é de grande interesse para o gerenciamento costeiro, pois esclarece o balanço sedimentar, a distribuição de poluentes e nutrientes associados aos sedimentos em suspensão.

## 3.2 TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM DE MPS

### 3.2.1 Técnicas tradicionais

#### 3.2.1.1 Amostradores isocinéticos

Amostradores em formato de torpedo com compartimento coletor interno, que são preenchidos por particulados em função do produto da velocidade local com a área de abertura do bico (Figura 2). São capazes de coletar a mistura sedimento-água sem alterar a velocidade do escoamento (amostragem isocinética), (Gray e Gartner, 2009).

Essa metodologia é descrita por Edwards e Glysson (1999), que estabelecem diretrizes na escolha do equipamento como: objetivo da amostragem, características físicas e hidrodinâmicas do local, tais como os padrões de corrente e granulometria do sedimento que está sendo transportado.

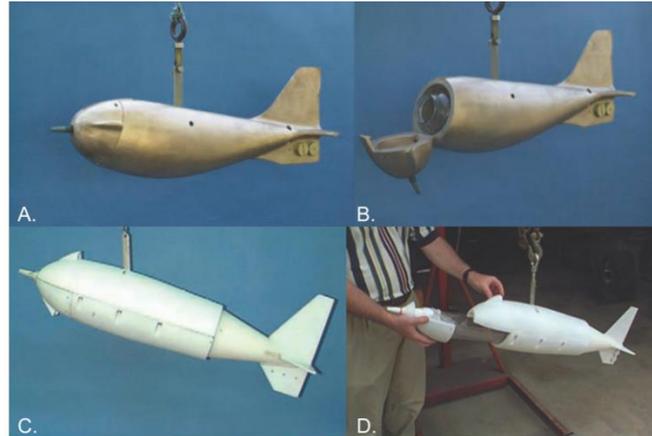


Figura 2: Amostrador isocinético D-74 (A-B). D-96 (C-D). Fonte: Gray e Gartner,2009.

Apesar dos amostradores isocinéticos adquirirem dados de MPS confiáveis, o tempo e o esforço necessários para se obter as amostras torna essa tecnologia morosa.

### 3.2.1.2 Técnicas gravimétrica

Esta técnica é simples e se baseia em uma técnica gravimétrica acelerada por filtração a vácuo. O procedimento consiste em filtrar volume conhecido da amostra para que sua porção sólida fique retida no filtro, este é pesado e descontado o peso do filtro, dessa forma obtém-se a massa das partículas pelo volume (Baumgarten et al., 2010). Comumente as amostras são coletadas com garrafa hidrográfica (Figura 3). A filtração pode ser realizada em série para agilizar o processamento das amostras. Os filtros podem ser de fibra de vidro, celulose e outros materiais e sua escolha depende das análises que serão feitas na amostra, (Wurl, 2009).



Figura 3: Sistema de filtragem e garrafa hidrográfica de Van Dorn. Fonte: Rafael Aquino.

As técnicas tradicionais são limitadas a coletas pontuais com baixa resolução espacial e temporal. Como consequência, têm sido desenvolvidos métodos alternativos que possibilitam um monitoramento preciso sem as inconvenientes restrições das técnicas tradicionais, além de

minimizarem a participação humana nos processos. Algumas dessas alternativas são: o método óptico e o método acústico.

### 3.2.2 Técnica óptica

Os sensores ópticos medem o espalhamento, atenuação ou transmitância de feixes de luz em um fluido provocado pelas partículas em suspensão (Figura 4). Basicamente estes sensores são compostos de uma fonte luminosa e fotodetector. Os feixes de luz utilizados nesses sensores podem ser de luz visível ou infravermelhos, sendo este último mais preciso por não sofre tanta influência das cores (Hatcher et al., 2000).

Essa propriedade óptica dos feixes de luz serem dispersos e/ou absorvidos pelas partículas no meio líquido é conhecida como turbidez, percebida visualmente como a diminuição na transparência da água, seu princípio de medição é conhecido como nefelometria (Lewis, 2002). Existem 3 unidades de turbidez relatadas na literatura, em artigos mais antigos frequentemente é encontrada a unidade de turbidez de Jackson (JTU), mais recentemente é utilizada a turbidez nefelométrica (NTU) e FTU (turbidez por Formazina) que na literatura são apresentadas como equivalentes, (Henley et al., 2000).

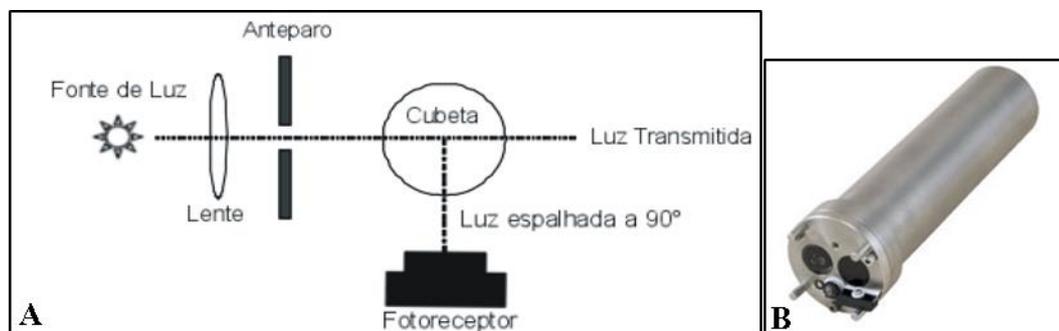


Figura 4: Princípio de medição de turbidímetro em radiação espalhada (A). Sensor óptico, (OBS-ATU75W2-USB) (B). Fonte: Policontrol e JFE Advantech.

Diversos estudos demonstram a aplicabilidade dos sensores ópticos na obtenção de perfis de MPS (Black and Rosenberg., 1994; Marttila and Kløve., 2010; Vousdoukas et al., 2011). Possui a vantagem de ser uma técnica madura, bem difundida e relativamente bem documentada (Gray and Gartner, 2009; Sari et al., 2015).

Os principais fatores que influenciam a resposta dos sensores óptico estão relacionados a concentração, tamanho, forma e rugosidade das partículas em suspensão (Downing, 2006; Bunt et al., 1999). São confiáveis e precisos sem a presença de bioincrustação (Ridd e

Larcombe, 1994). Simples de operar e relativamente baratos, tornando-os bastante difundidos em medições indiretas de MPS em corpos d'água (Sari et al., 2015).

Como desvantagem, os sensores ópticos estão mais sujeitos a bioincrustação e fazem medidas apenas próximas ao sensor. Outros problemas associados a este método em geral estão relacionados com a composição e granulometria do MPS. Essa variabilidade nas características do MPS resulta em propriedades óticas diferenciadas e consequente complexidade da resposta do sinal ótico (Baker e Lavelle, 1984; De Campbell e Spinrad, 1987; Bunt et al., 1999).

A aplicação desses sensores como técnica alternativa para determinação do MPS ainda apresenta poucos registros no cenário brasileiro. A maioria dos estudos que empregaram estas tecnologias foram realizadas em bacias hidrográficas localizadas na região sul do Brasil (Sari et al., 2015).

### 3.2.3 Técnica acústica

Estudos iniciais realizados por Urick, (1948); Proni et al., (1975); Young et al., (1982) e Hay, (1983) sobre a relação do pulso acústico com a concentração de sedimentos em suspensão, demonstraram a aplicabilidade do método acústico como possível ferramenta de obtenção de perfis de MPS. A primeira tentativa de calibração dessa técnica para sedimentos de tamanho médio, que compreende principalmente areias, foi realizada por Hanes et al., (1988), utilizando um perfilador acústico de banda larga com frequência de 3 Mhz. Outras experiências laboratoriais foram conduzidas por Thorne et al., (1991), enquanto Lohrman e Huhta, (1994) validaram o método para partículas em suspensão formadas por sedimento fino.

Além dos esforços para utilizar o método acústico para estimar sedimento em suspensão, esta técnica já foi aplicada na detecção de correntes turbidíticas em canyons submarinos e na estimativa de abundância de zooplâncton, (Hay et al., 1982; Beamish, 1971; Greenlaw, 1979; Flagg e Smith, 1989).

Sua vantagem está associada à coleta não intrusiva com excelente resolução espaço-temporal. Logo, os perfiladores acústicos (Figura 5), podem ensonificar uma grande área comparado com métodos tradicionais e o fazê-lo com alta resolução temporal, necessários para descrever processos em microescala de alta frequência.



Figura 5: Perfilador acústico (ADCP) da RDI Instruments montado em catamarã.

Problemas no estudo do material particulado em suspensão utilizando sensores acústicos estão associados ao limite de sensibilidade do sinal em relação ao tamanho da partícula, determinada pela relação entre o diâmetro da partícula e o comprimento da onda (Clarker et al., 1984; Reichel e Nachtnebel, 1994). Ou seja, para cada tamanho de grão existe uma frequência que identifica melhor as partículas em suspensão.

A formulação matemática para estimar MPS a partir de retroespalhamento acústico é mostrada em Thorne et al., (1997) e Thorne e Hadcaltle, (1997). Entretanto uma abordagem mais simples foi tomada para se estimar MPS através de RA neste trabalho, utilizando o método de Deines, Gatner e correlação direta. Tendo em vista, que estes métodos já estão consagrados na literatura e são de fácil aplicação (Gerrero et al., 2011; Ha et al., 2015; Marttila e Kløve., 2010; Hoitink e Hoekstra, 2004).

De maneira sintética, o método acústico resume-se em conhecer o valor do pulso transmitido, estimar o valor da perda de sinal ao longo da coluna d'água e relacionar os dados corrigidos com os dados reais de MPS para extrapolar para o restante da coluna d'água.

### 3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ADCP

Os perfiladores acústicos de corrente por efeito Doppler (ADCP) foram construídos para medir os componentes tridimensionais da corrente com alta resolução espacial e temporal. O ADCP transmite pulsos acústicos curtos ao longo de feixes estreitos a uma frequência fixa, que pode ser de 75 a 2,400 khz, dependendo do transdutor. Capta a mudança de frequência ou fase dos ecos retransmitidos (backscatter) pelo MPS, convertendo-os em componentes de velocidade orientados com os pontos cardeais por uma bússola interna (Figura 6). Assume-se

que a velocidade horizontal média dos dispersores (sedimento em suspensão) é a mesma da água (RDI, 1996). O perfil de velocidade é discretizado em várias células de mesmo tamanho, que pode ser alterado pelo operador, obedecendo os limites técnicos do equipamento.

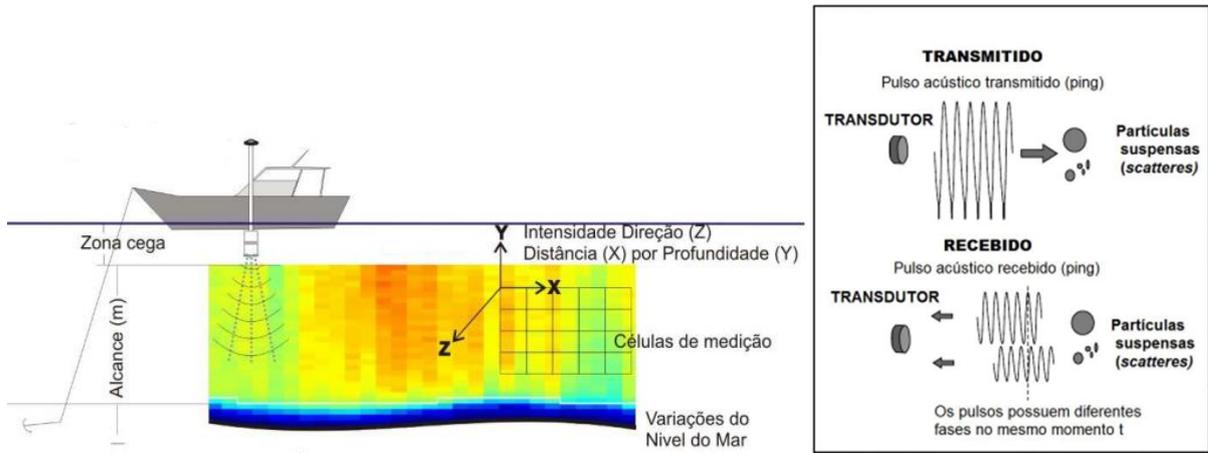


Figura 6: Ilustração sobre o funcionamento do ADCP.

Esta dispersão causada pelo material suspenso na coluna d'água, será registrada na amplitude do eco e no padrão de voltagem do equipamento, os quais são utilizados para cálculo do retroespalhamento acústico (RA). Para efeitos de cálculo, assume-se que a propagação do som é esférica.

### 3.4 EQUAÇÃO DO SONAR

As equações do sonar foram formuladas durante a segunda guerra mundial com o propósito de calcular o alcance máximo dos sonares. Posteriormente, tiveram uso crescente relacionadas a melhorias e novas aplicações destes (Urick, 1983).

Estas equações unem os efeitos do meio, do alvo e do equipamento (Tabela 1). Elas são essencialmente simples, servindo para duas importantes funções práticas: previsão do desempenho dos instrumentos acústicos existentes e desenvolvimento de novos com características pré-estabelecidas (Urick, 1983).

Tabela 1: Componentes da equação do sonar.

MEIO	EQUIPAMENTO	ALVO
Perda por transmissão (TL)	Nível da fonte (SL)	Força do eco (TS)
Retroespalhamento (RL)	Nível do ruído interno (NL)	Nível da fonte (SL)
Nível de ruído ambiental (NL)	Índice de directividade (DI)	
	Limite de detecção (DT)	

As equações são fundadas em uma igualdade básica entre as partes desejadas e não desejadas do sinal recebido. Essa formulação pode estar relacionada com o retroespalhamento (backscatter) de um alvo subaquático, como é o caso deste trabalho, ou com a detecção do mesmo, etc (Urlick, 1983).

O nível de retroespalhamento, segundo Urlick, (1983) é definido como:

$$RL = SL - 2TL + TS. \quad (3.1)$$

A equação (3.1) é a forma simplificada da equação do sonar. Onde SL é o nível da fonte (força do pulso que sai do transdutor), enquanto TS é a força retroespalhada do alvo (sedimento em suspensão), que é em função da forma da partícula, tamanho, rigidez e comprimento de onda acústica (Clarke et al., 1984). Nesta equação todos os termos estão em dB.

A perda por propagação 2TL é definida como:

$$2TL=20 \log(R)+2\alpha(R). \quad (3.2)$$

O termo  $20\log(R)$  representa perda pelo espalhamento geométrico e  $2\alpha(R)$  é o termo relacionado absorção da energia acústica.

As correções necessárias para utilização do eco do ADCP na estimativa de MPS estão intimamente ligadas ao conhecimento das perdas ocasionadas pela propagação e atenuação do pulso acústico.

Quando o pulso acústico emitido por uma fonte pontual em um corpo d'água é uniforme, ele se espalha em todas as direções produzindo ondas esféricas de pressão constante. A intensidade acústica do pulso decresce com o aumento da distância da fonte devido à perda por espalhamento (aumento da superfície esférica a medida que a onda se propaga). Além de haver espalhamento devido a reflexão por partículas em suspensão e bolhas de ar. Bem como, atenuação ocasionada pela absorção (conversão da energia acústica em calor e energia química) (Urlick, 1948; Stoll e Bryan, 1970).

O espalhamento é independente da frequência, a absorção não é (Hampton, 1967). Os dois principais mecanismos ligados a atenuação do som na água são: absorção viscosa (movimento das partículas causado pelo som produzem calor devido arrasto viscoso), significativo para frequências acima de 100 khz e efeitos de relaxamento químico causado pelo ácido bórico, para baixa frequência de até 10 khz, e sulfato de magnésio para frequências acima de 100 khz (Urlick, 1948; Ainslie e McColm, 1998). A absorção devido à pressão hidrostática é geralmente desconsiderada para profundidade de até 20 metros, como é o caso deste trabalho (Anastasiou et al., 2015).

### 3.5 MÉTODOS DE CONVERSÃO DE RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO (RA) EM MPS

#### 3.5.1 Método de Deines

Este método determina as perdas do sinal acústico com base na equação do sonar, utilizando informações técnicas do equipamento. Ele foi desenvolvido para estimar perfis de retroespalhamento acústico relativo (RB) ou absoluto, apresentando o processamento necessário para que os dados do sinal do eco sejam confiáveis para serem utilizados na estimativa de MPS (Deines, 1999).

Alguns fenômenos relevantes para o entendimento da intensidade RA não podem ser medidos independentemente, entretanto Deines, (1999) desenvolveu algumas combinações de termos que são substituídos por quantidades que podem ser mensuradas, pela fábrica, ou pelo usuário. Este método não estima a concentração diretamente, mas utiliza como base uma amostra de concentração de MPS conhecida no tempo e no espaço para prever os valores de todo o perfil (Deines, 1999).

A equação que estima o MPS a partir de uma amostra conhecida é:

$$S_v = C + 20 \log(R) - Ldbm - Pdbw + 2\alpha R + Kc(E - Er). \quad (3.3)$$

$$S_v = 10\log(C_i). \quad (3.4)$$

$S_v$  une características do equipamento, do meio, da intensidade do eco e da concentração no nível de referência. “ $C_i$ ” é a concentração no nível de referência.

Unindo a equação 3.3 e 3.4, em sua forma exponencial, temos

$$C = 10^{(10 \log(c_i) + (E - Er))}. \quad (3.5)$$

Onde, “ $R$ ” a distância ao longo do feixe acústico. “ $\alpha$ ” é a absorção acústica. “ $Ldbm$ ” o comprimento do pulso transmitido, em metros. “ $Pdbw$ ” a energia do pulso em watts. “ $Kc$ ” é o

fator de conversão de conts em dB. “E” a amplitude do RA registrado no ADCP, em conts. “E<sub>r</sub>” a amplitude do RA registrado no ADCP no nível de referência, em conts.

A equação proposta por Deines baseia-se na proporcionalidade do incremento da intensidade do eco (E-E<sub>r</sub>) com o logaritmo da razão entre as concentrações  $10\log\left(\frac{C}{C_i}\right) = \Delta(E - E_r)$ . As correções da intensidade do eco para transformá-lo em RB, serão abordados mais adiante.

### 3.5.2 Método de Gartner

Este método estima a concentração de MPS a partir do RA com base na equação do sonar (Gartner, 2004). Sua forma exponencial é

$$C = 10^{(a*BR+b)}. \quad (3.6)$$

Onde, “a” e “b” são os parâmetros da reta obtidos pela regressão entre o backscatter relativo (BR) e dados de MPS *in situ*. “BR” é a amplitude do RA do ADCP corrigido, na unidade de dB.

O método de Gartner fundamenta-se em uma relação linear entre o logaritmo de MPS e a intensidade do RA  $10 \log(C) = a * BR + b$ .

### 3.5.3 Método de correlação direta

Este método é uma proposta do autor para verificar a relação direta da intensidade do RA obtido pelo ADCP com o MPS. É o único método no qual não foram feitas as correções referentes a espalhamento e atenuação do pulso acústico. Neste método, os valores de RA foram apenas transformados para a escala de dB.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

As coletas foram realizadas no estuário do rio Pará, que apresenta extensão longitudinal aproximada de 300 km e possui 50 km de largura em sua foz. Este se inicia na Baía das Bocas e segue até o Oceano Atlântico bordejando o sul e o leste da ilha do Marajó. Seus principais tributários são o rio Tocantins, Guamá e Capim, além de receber aporte hídrico do rio Amazonas pelo estreito de Breves através do rio Jacaré Grande (Costa, 2014; Rosário et al., 2016), (Figura 7).

Este estuário é uma região muito dinâmica, dominado por regime de mesomarezes semidiurnas, em que a vazão do rio associado à energia das marés atinge picos de 300,000 m<sup>3</sup>/s durante a maré vazante e 200,000 m<sup>3</sup>/s durante a maré enchente (PRESTES et al., 2014). Possui período de baixa e alta descarga líquida bem marcada pela sazonalidade amazônica (Rosário, 2016). Neste estuário, o grande aporte fluvial e a atuação das correntes de maré são os principais controladores da deposição e dispersão de sedimentos (Gregório, 2009; Costa, 2014; Rosário, 2016).

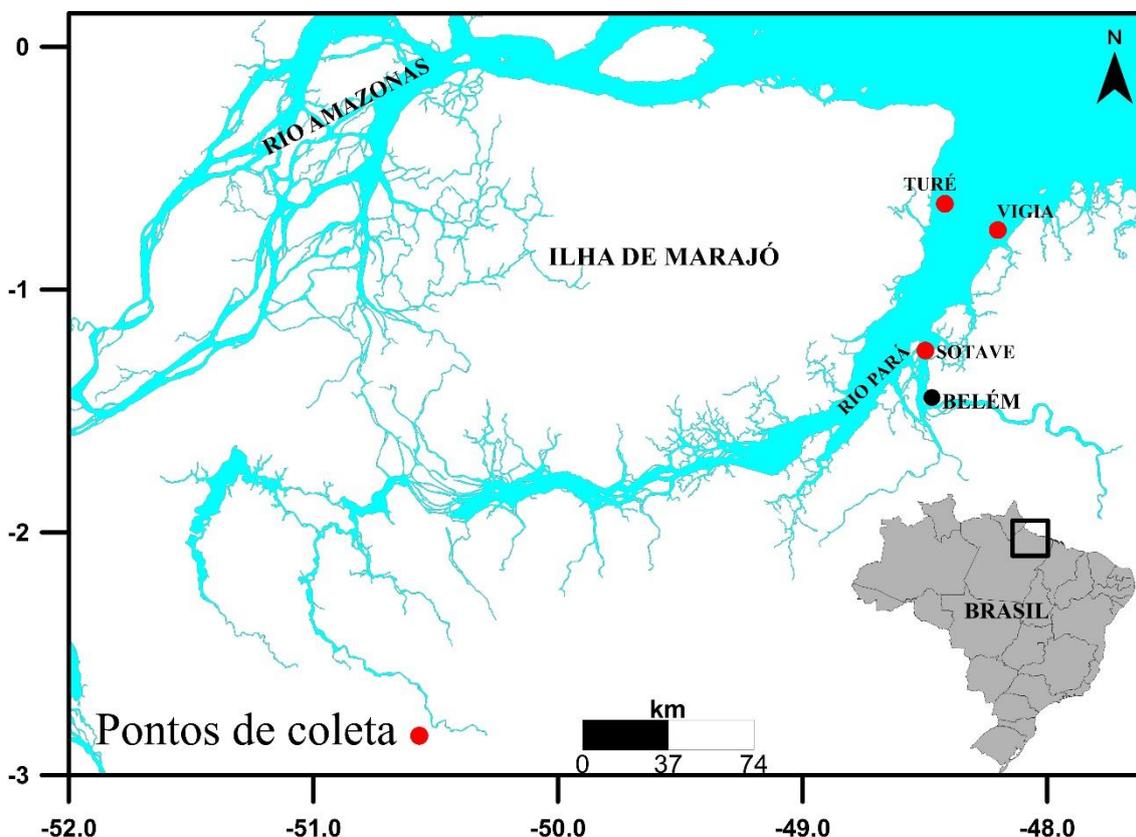


Figura 7: Rio Pará - Mapa de localização da área de estudo e pontos de coleta.

## 4.2 AMOSTRAGEM

Devido a sua expressiva extensão latitudinal e longitudinal e sua dinâmica de mistura diferenciada entre as margens (Rosário, 2016; Prestes et al., 2017), foram selecionados 3 pontos de coleta no rio Pará. Sotave representa o ponto mais interno na margem direita, Vigia e Turé compreendem a margem direita e esquerda respectivamente, próximo a foz (figura 1).

Com o auxílio de perfilador acústico de corrente por efeito Doppler (ADCP) obteve-se dados de intensidade acústica. Nos pontos de Vigia e de Turé usou-se ADCP- Rio Grande 1200 khz e em Sotave utilizou-se ADCP- Sentinel 600 khz. Os perfis de retroespalhamento óptico (RO) foram realizados com turbidímetro de retroespalhamento óptico (OBS). Além disso, foram realizadas coletas de água em diferentes profundidades com garrafa de Van Dorn. Os dados de salinidade, temperatura e pressão utilizados nas equações foram obtidos com auxílio de um CTD (sigla em inglês de conductivity, temperature, and depth).

A amostragem consistiu em coletas simultâneas de dados acústicos, água e RO. O registro de dados acústico ocorreram em intervalos de 1 segundo, com a mesma taxa de registro para o OBS durante a realização do perfil. Entretanto, foi utilizada média de 1 minuto no processamento dos dados do ADCP.

As campanhas ocorreram em maré de sizígia no período de alta descarga fluvial (Sotave) e baixa descarga (Vigia e Turé), em um ciclo de maré semidiurno (~13 h). Foram feitos perfis verticais horários com CTD, OBS e coleta de água na subsuperfície e fundo. Foi acoplado à garrafa hidrográfica um sensor de pressão e, no instante do lançamento do mensageiro que aciona a garrafa, a hora era anotada para ser correlacionada com a profundidade adquirida pelo sensor. A fim de obter profundidade exata da amostra de água coletada.

## 4.3 MPS A PARTIR DO MÉTODO GRAVIMÉTRICO

As amostras de água foram processadas segundo a metodologia proposta por Baumgarten, (2010). O primeiro passo foi preparar os filtros para serem utilizados na filtragem das amostras de água. Os filtros de fibra de vidro com poros de 0,45  $\mu\text{m}$  foram condicionados dentro de envelopes de papel alumínio e colocados na estufa a 50 °C por 2 horas. Ao término do período, foram transferidos para o dessecador para esfriar e impedir a fixação de umidade. Em seguida, os filtros foram pesados (P1) e utilizados para a filtragem das amostras de água. Após seu uso, estes foram colocados novamente em envelopes de papel alumínio e inseridos por 12 horas na estufa a 50 °C, mais 1 hora no dessecador para retirada da umidade para no

final serem pesados em balança analítica de alta precisão (P2). A diferença entre as massas dos filtros, antes sem material filtrado (P1) e após a filtração e retirada da umidade (P2) dividido pelo volume filtrado, proporciona os valores do material particulado em suspensão total.

Em laboratório foi utilizado 250 ml das amostras, filtradas com o auxílio de uma bomba a vácuo acoplada ao sistema de filtração. O cálculo do MPS total é demonstrado na equação abaixo:

$$MPS = \frac{(P2-P1)*10^6}{250}. \quad (4.16)$$

Onde, P1 é o peso do filtro em gramas. P2 representa o peso do filtro com material particulado retido, em gramas. 250 corresponde ao volume filtrado, em ml.  $10^6$  é o fator de conversão de kg em mg.

#### 4.4 MPS A PARTIR DO MÉTODO ÓPTICO

Devido à uma forte correlação entre o RO com o MPS, para se obter este parâmetro utilizando a técnica óptica é necessária calibração com dados de MPS *in situ* específica do local. Para isso, uma análise de regressão linear simples entre uma série de valores de MPS *in situ* com dados de RO fornecem parâmetros empíricos que possibilitam a estimativa do MPS através dos instrumentos ópticos.

#### 4.5 MPS A PARTIR DO MÉTODO ACÚSTICO

Ao contrário das medições de velocidade que utilizam mudança de fase/frequência do pulso acústico. Os dados utilizados na estimativa de MPS estão relacionados a intensidade do retroespalhamento. Este, é o sinal acústico que retorna após interagir com o substrato e sedimentos em suspensão. A utilização dos dados de retroespalhamento adquiridos pelo ADCP requerem correções referentes ao espalhamento, atenuação e absorção da energia acústica ao longo de sua propagação, agora chamado de backscatter relativo (BR), na unidade de dB. A relação entre o MPS e o backscatter relativo pode ser expresso como (exemplo retirado de Gartner, 2004):

$$MPS = 10^{(A*BR+B)}. \quad (4.7)$$

“A” e “B” na equação 4.7, são parâmetros empíricos derivados da correlação entre dados conhecidos de MPS e “BR”. Segundo Trevenot et al., (1992), BR pode ser escrito como

$$RB = RL + 2TL. \quad (4.8)$$

Onde, “RL” é o nível de retroespalhamento e “2TL” é a perda pela propagação. Como visto anteriormente, com base na equação do sonar o nível de retroespalhamento (RL), segundo Urick (1983) é  $RL = SL - 2TL + TS$ . Ao medir com um ADCP, o nível de retroespalhamento vem a ser

$$RL = k_c(E - E_r). \quad (4.9)$$

Onde, “E” é intensidade do RA do ADCP em counts (unidade interna do equipamento). “E<sub>r</sub>” é valor de base do RA, em counts (valor quando o ADCP não tem sinal ou está operando fora da água). “K<sub>c</sub>” é a constante usada para converter counts em decibéis (fornecida pelo fabricante), geralmente possui valor entre 0,35 a 0,55 (Deines, 1999).

A perda por propagação (2TL) é definida como:

$$2TL = 20 \log(R) \times \Psi + 2\alpha(R). \quad (4.10)$$

O termo “20log(R)” representa a perda pelo espalhamento geométrico e “2α(R)” é o termo relacionado a absorção da energia acústica pela água (α<sub>w</sub>) e pelo sedimentos em suspensão (α<sub>s</sub>), ou seja  $\alpha = \alpha_w + \alpha_s$ , em dB/m. “R” é o alcance do volume ensonificado, em metros. A multiplicação por dois corresponde ao percurso de ida e volta do sinal acústico.

O volume ensonificado (R) é definido por Deines (1999) como:

$$R = \left[ \frac{B + \frac{(L+D)}{2} + ((N-1) \times D) + \left(\frac{D}{4}\right)}{\cos\theta} \right] \times \frac{c'}{c_1}. \quad (4.11)$$

Onde, “B” é a zona onde não há aquisição de dados por ficar muito próxima aos transdutores (Blank), em metros. “L” é o comprimento do pulso transmitido, em metros. “D” é o tamanho das células, em metros. “N” é o número de células discretizadas. “Θ” é o ângulo de inclinação dos transdutores. “c’” é a velocidade média do som emitido (m/s). “c<sub>1</sub>” é a velocidade do som utilizada pelo equipamento (m/s), a utilizada no trabalho foi de 1480 m/s (ver Tabela 2).

A perda em função da propagação da onda é diferente no campo próximo e distante do transdutor, Downing et al., (1995) inseriu um fator de correção no campo próximo (Ψ). Essa correção pode ser calculada com base no chamado de alcance crítico (R<sub>critico</sub>), dado pela equação 4.12.

$$R_{critico} = \frac{\pi T_r^2}{\lambda}. \quad (4.12)$$

Onde, “T<sub>r</sub>” é o raio do transdutor, em cm. “λ” o comprimento da onda, em cm.

A correção relacionada a perda no campo próximo ao transdutor é calculada usando a equação 4.13.

$$\Psi = \frac{1+1,35z+(2,5z)^{3,2}}{1,35z+(2,5z)^{3,2}}. \quad (4.13)$$

Para estimativa da energia acústica absorvida pela água, foi usada a equação proposta por Ainslie e McColm (1998), equação 14.4.

$$\alpha = 0,106 \frac{f1*f^2}{f^2+f1^2} e^{\frac{pH-8}{0,56}} + 0,52 \left(1 + \frac{T}{43}\right) * \left(\frac{S}{35}\right) \frac{f2*f^2}{f^2+f2^2} e^{-\frac{z}{6}} + 0,00049 f^2 e^{-\left(\frac{T}{27} + \frac{z}{17}\right)}.$$

$$f1 = 0,78 \left(\frac{S}{35}\right)^{0,5} e^{T/26}.$$

$$f2 = 42 e^{T/17}. \quad (4.14)$$

Onde, “S” é a salinidade. “f1” e “f2” a frequência de relaxamento do ácido bórico e sulfato de magnésio, respectivamente. “T” a temperatura em Celsius. “f” a frequência acústica em khz. “Z” a profundidade em km. Como a equação foi desenvolvido para regiões oceânicas, “Z” é dado em km. Entretanto, basta dividir o valor por 1000 para se obter a absorção acústica em dB/m (Tabela 2).

Tabela 2: Variáveis utilizadas nos cálculos de BR.

	Variáveis ambientais			Variáveis operacionais			
	Salinidade	Temperatura	pH	Ângulo do Beam	Raio do transdutor	Blank	Tamanho das células
ADCP 1200 Khz (Sotave)	0	27	6	20°	4,45	0,25	0,50
ADCP 600 Khz (Vigia)	8	27	6,5	20°	3,45	0,25	0,25
ADCP 600 Khz (Turé)	8	27	6,5	20°	3,46	0,26	0,25

A formulação matemática para cálculo da atenuação acústica pelo sedimento em suspensão  $\alpha_s$  é descrita por Urick, (1948). Esta não foi calculada, devido a carência de informações sobre a densidade e raio médio das partículas. Entretanto, sob as condições presentes no ambiente estudado (nível de concentração de MPS), a atenuação pelo sedimento pôde ser negligenciada (Thorne e Hardcastle, 1997; Hoitink e Hoekstra, 2004)

Substituindo os termos descritos acima na equação 4.7, a relação do MPS com o pulso acústico pode ser escrita como:

$$MPS = 10^{(B+A*(k_c(E-E_r)+20 \log(R) \times \Psi + 2\alpha(R)))}. \quad (4.15)$$

#### 4.5.1 Conversão do RA em MPS

Os dados brutos de amplitude do RA (E) foram convertidos de counts para dB, através do coeficiente ( $k_c=0,421$ ) fornecido pelo próprio equipamento e subtraindo o ruído ( $E_r=40$  counts) deste. Valores de  $k_c$  e  $E_r$  foram utilizados em ambos ADCPs. Devido à ausência de testes laboratoriais o valor de  $E_r$  foi o valor mínimo da intensidade do eco encontrado em campo, ajuste proposto por Gartner., 2004. O valor de absorção acústica obtidos em água doce para

frequência de 600 khz e temperatura de 27 °C, foi de  $\alpha_w=0,07$  dB/m e para a frequência de 1200 khz com salinidade média de 8 foi de  $\alpha_w=0,27$  dB/m. Os valores de atenuação pelos sedimentos foram desprezados. O intervalo no campo próximo que necessita de correções ( $R_{\text{critico}}$ ) foi calculado, resultando em uma distância de 2,5 metros para ADCP de 600 khz e 3,1 metros para ADCP de 1200 khz.

Foi calculado (R) e ( $\alpha$ ) para todas as células de profundidade. A fim de se obter a perda de energia acústica, promovida pela propagação e atenuação do pulso.

Através da soma de (RL), a perda causada por espalhamento e absorção pela água (TL) foi possível calcular o backscatter relativo (BR), que representa a amplitude final corrigida da onda acústica, levando em consideração as perdas de energia acústica em função de sua propagação na água. Finalmente, determinou-se os coeficientes da reta (a e b), obtidos a partir da regressão entre o MPS *in situ* e BR utilizados no método de Gartner, aplicando-os nas séries temporais de retroespalhamento acústico obtidos com ADCP.

Os dados de RA utilizados são a média dos quatro transdutores. Pois, atenua os possíveis picos de RA sem impacto negativo nas estimativas de MPS (Franswilliam, 2005; Dornelles, 2009)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ANÁLISE DO CONJUNTO DE DADOS

A tabela 3 apresenta a estatística descritiva dos parâmetros obtidos nos trechos estudados no estuário do rio Pará, em um ciclo de maré. As maiores concentrações médias, bem como os valores máximos e mínimos foram observados em Sotave, enquanto em Vigia foram registradas as menores médias e os menores intervalos, com exceção para retroespalhamento acústico (RA). Os dados revelam grande variabilidade nas concentrações de MPS em todos os pontos amostrados.

Tabela 3: Estatística descritiva dos parâmetros obtidos em Sotave, Vigia e Turé, no estuário do rio Pará, em um ciclo de maré. Em negrito a média com seus respectivos desvios padrão, seguidos pelos valores mínimos e máximos, em parênteses, para cada trecho.

	<b>MPS <i>in situ</i> (mg/L)</b>	<b>Retroespalhamento óptico (FTU)</b>	<b>Retroespalhamento acústico (dB)</b>
<b>Sotave</b>	<b>84,6 ±33,2</b> (54-186,5)	<b>77,1 ±17,4</b> (43,6-150,7)	<b>57,8 ±6,7</b> (43,6-122,6)
<b>Vigia</b>	<b>15,9 ±7,0</b> (6,0-33,2)	<b>17,9 ±7,7</b> (3,6-93,6)	<b>52,6 ±11,1</b> (33-109,9)
<b>Turé</b>	<b>19,5 ±19,6</b> (4,8-87,6)	<b>19,9 ±17,6</b> (3,6-124)	<b>50,8 ±7,1</b> (34,3-102,8)

Como esperado, o retroespalhamento óptico (RO) tem seu comportamento controlado pela carga sedimentar em suspensão (Downing, 2006), logo este seguiu o padrão apresentado pelo MPS *in situ*, com os maiores intervalos e as maiores médias em Sotave e com médias próximas entre Vigia e Turé. Da mesma forma, o RA comportou-se semelhante ao MPS *in situ*. Porém, para este parâmetro, Vigia apresentou a maior variabilidade. Sotave demonstra ser um ambiente com grande carga sedimentar em suspensão, comparado com Vigia e Turé. Estes, porém, são similares quanto à concentração de sedimento em suspensão.

Como os parâmetros obtidos tratam-se de valores ao longo da coluna d'água em um estuário bastante energético, espera-se alta variabilidade espacial e temporal. As coletas de Sotave ocorreram em período de alta descarga fluvial enquanto em Vigia e Turé ocorreram em período de baixa descarga fluvial. Por isso a concentração de MPS é maior em Sotave e menor em Vigia e Turé, uma vez que o aporte de água doce insere grande quantidade de material particulado em suspensão nos estuários (Miranda, 2002). Além disso, Vigia e Turé encontram-se próximo a foz, onde a mistura com água oceânica com menor concentração de material em suspensão e maior salinidade contribuem para a diminuição de MPS, principalmente nos

períodos de menor descarga fluvial. Os valores próximos de RA e RO entre Vigia e Turé refletem provavelmente características ambientais parecidas, pois localizam-se no mesmo setor do estuário, estando apenas em margens diferentes.

## 5.2 PERFIS ESPAÇO-TEMPORAIS DE RA CORRIGIDOS

O eco do ADCP reflete a interação com o sedimento em suspensão e o fundo. Ao longo da coluna d'água existe pequena variação na intensidade acústica do pulso, mas tem seu valor amplificado próximo ao substrato (Figura 8). Com exceção dos valores abaixo de 1,5 metros de profundidade, que apresentam ganhos altos (Hanes et al., 1988), os perfis de RA nos diferentes ambientes amostrados mantiveram o mesmo padrão, com aumento em direção ao fundo e valor máximo localizado próximo ao fundo (fundo falso) e depois diminuindo (Figura 8). Os perfis de RA sem correção de dispersão e atenuação apresentam uma tendência de diminuir à medida que se afastam do transdutor (Hanes et al., 1988).

A maior variabilidade no RA ocorreu no primeiro metro da coluna d'água e próximo ao fundo. Na superfície a variabilidade é devido à turbulência gerada pelo vento e bolhas de ar que modificam o ambiente de propagação da onda sonora (Vagle e Farmer, 1992), e no fundo se

deve à grande quantidade de sedimento existente, causando múltiplos espalhamentos (Baranya e Józsa, 2013).

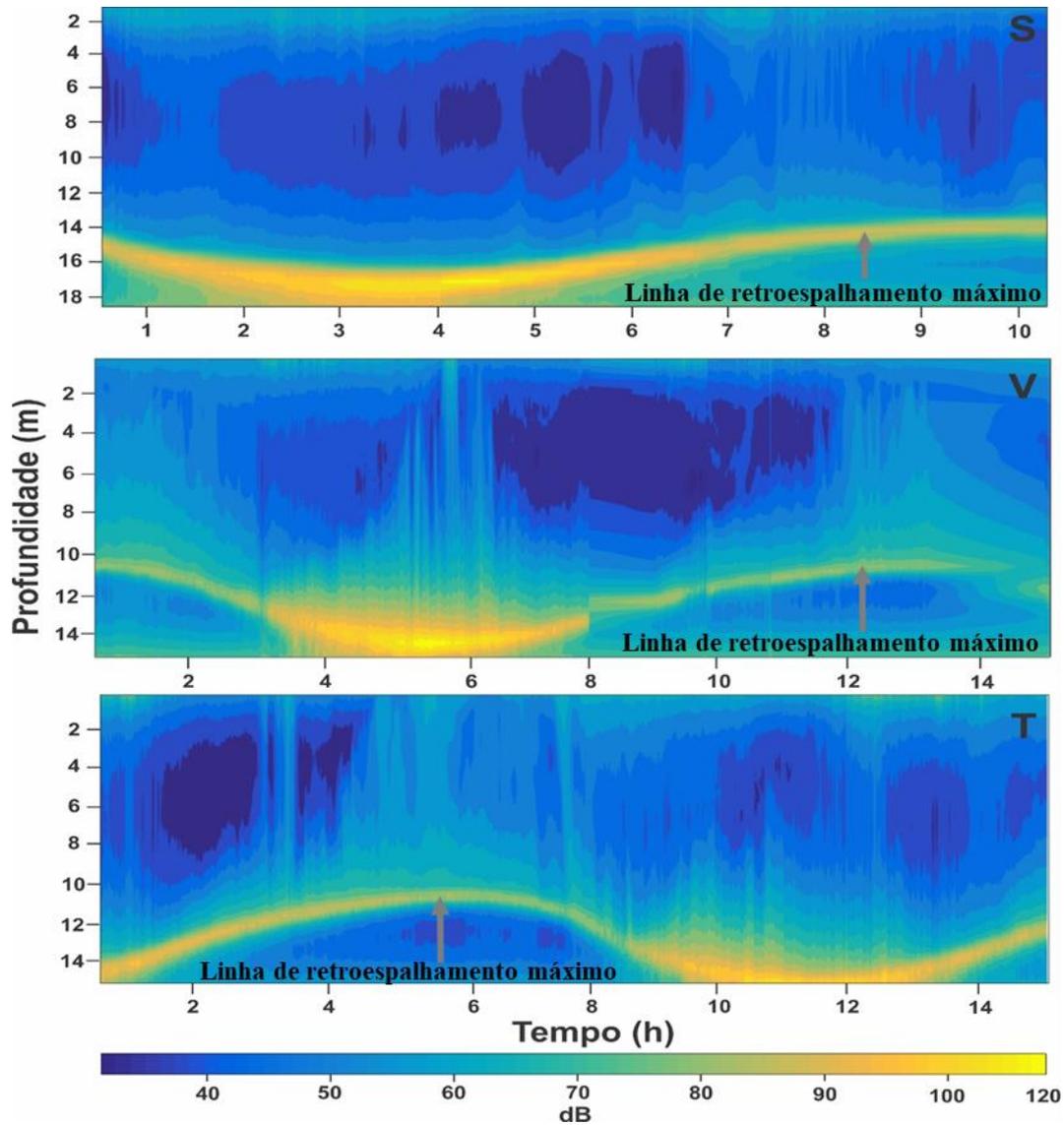


Figura 8: Perfil espaço-temporal de retroespalhamento acústico (RA). Linha amarela na base corresponde ao fundo falso/retroespalhamento máximo.

Para uso prático, a linha de retroespalhamento máximo está relacionada à profundidade limite na qual o sinal pode ser utilizado confiavelmente. A zona após esta linha possui a

atenuação causada pelo sedimento significativa e comportamento mais complexo. Para corrigi-la é preciso a própria concentração de MPS, tornando o trabalho redundante.

Os perfis de RA revelam claramente o fenômeno de ressuspensão e, como a forma da linha de retroespalhamento máximo reflete a mudança de nível, há possibilidade de identificar o estágio da maré correspondente a essa ressuspensão.

### 5.3 REGRESSÃO ENTRE MPS *IN SITU* COM RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO E ÓPTICO

Os intervalos dos valores de RA e RO utilizados na regressão são mostrados na tabela 4. Os valores de RA acima de 83 dB para Sotave, 73 dB para Vigia e 71 para Turé não são valores de picos óbvios, mas provavelmente valores relacionados ao substrato (valores referidos com base na linha de retroespalhamento máximo, mostrados na Figura 8). Os valores máximos de RO são limitados pela profundidade máxima atingida pelo sensor OBS.

Tabela 4: Intervalos correlacionados de RA (dB) e RO (FTU), nas diferentes regiões amostradas do estuário do rio Pará, entre parênteses. Em negrito os valores limites utilizados.

REGIÃO	RA	RO
<b>Sotave</b>	<b>83</b> ;(49 - 78)	<b>150</b> ;(45,6 - 143,2)
<b>Vigia</b>	<b>73</b> ;(37 - 62)	<b>93</b> ;(4 - 82)
<b>Turé</b>	<b>71</b> ;(39 - 62)	<b>124</b> ;(3,8 - 97,3)

O cruzamento das informações de RA e RO com o MPS *in situ* resultaram em equações lineares. Este modelo obteve bom ajuste, com exceção do RA em Turé, que se ajustou melhor ao modelo exponencial, permanecendo o modelo linear para o RO (Figura 9). No geral, as correlações resultaram em coeficientes de determinação razoáveis a bons ( $R^2$  igual ou maior que 0,7), indicando que as variáveis predictoras (RA e RO) explicam mais de 70% da variável de interesse em mudanças lineares. Os coeficientes de determinação entre RA e RO dos mesmos pontos amostrais foram praticamente os mesmos, indicando relações semelhantes entre o RO e o RA com o MPS *in situ*.

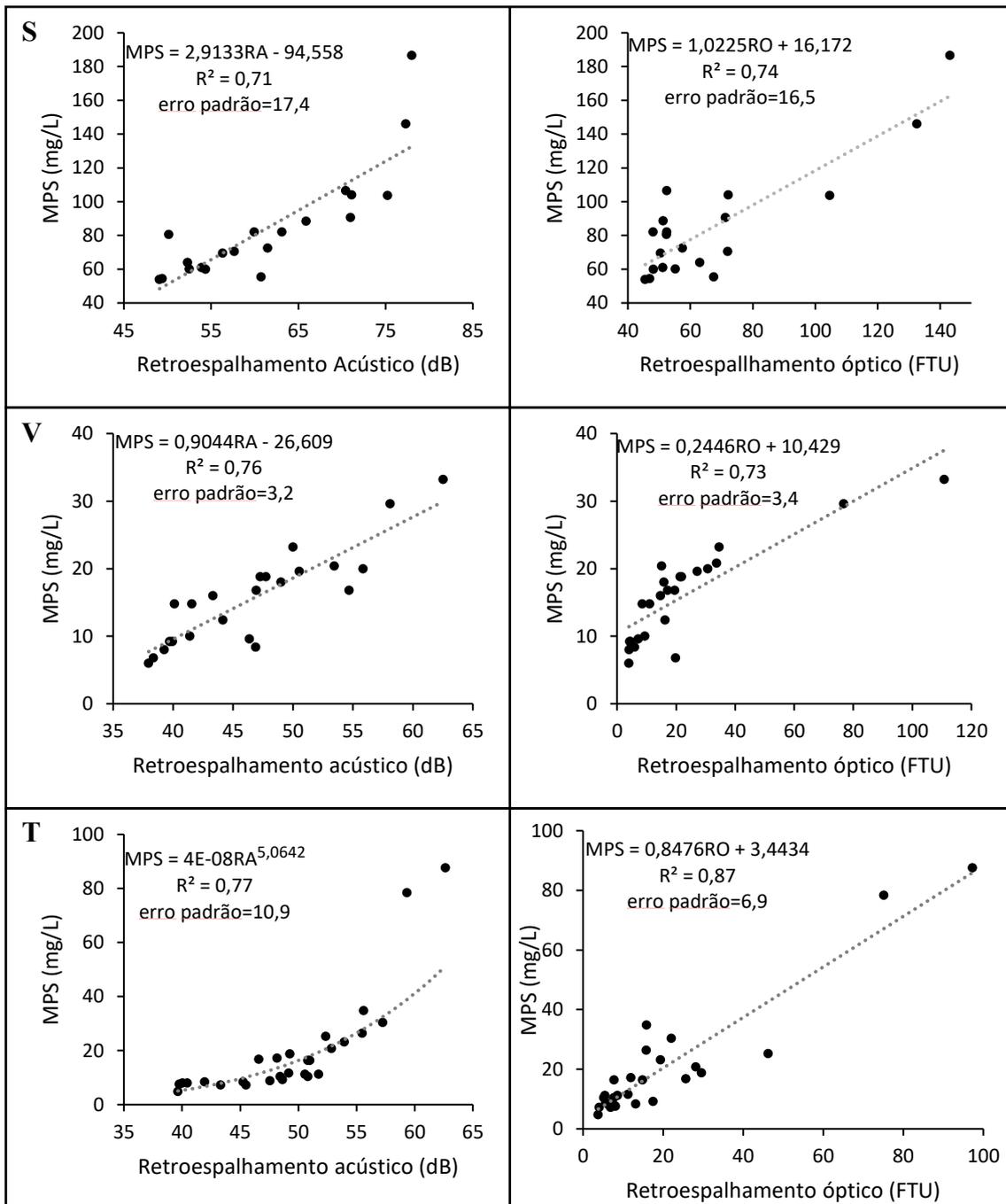


Figura 9: Regressão linear entre o MPS in situ, RO e RA (ADCP 600 e 1200 khz) em diferentes trechos do rio Pará. Valores de RA e RO registrados pelo ADCP e OBS nas mesmas profundidades onde o MPS in situ foi obtido. Significativa no nível 0,05.

Turé apresentou o maior coeficiente de determinação e Sotave o menor. Variáveis com maior variabilidade e menor número de amostras tendem a ter menor coeficiente de determinação (Field, 2009), como é o caso de Sotave em relação a Turé. Além dos valores discrepantes de Sotave apresentarem grande distância de Cook (2,02). Os registros com grandes

valores de distância de Cook ( $> 1$ ), podem diminuir a exatidão do modelo (Cook, 1977; Lorenz, 1987).

As estimativas mais precisas de MPS utilizando RA foram obtidas em Vigia, seguida por Turé, tendo Sotave a menor precisão. O melhor desempenho em Vigia e o mais fraco em Sotave provavelmente se deve à menor variabilidade do MPS *in situ* encontrada em Vigia (Tabela 3), visto que mudanças de concentração de MPS tem respostas acústicas e ópticas múltiplas, o que leva ao aumento de erros de predição, de modo que uma distribuição de MPS homogênea diminuem a chance de erros, contribuindo com estimativas mais precisas (Dornelles, 2009).

Em relação às diferentes frequências empregadas no método acústico, constata-se melhor precisão nas estimativas que utilizaram ADCP com frequência de 1200 khz. Isto pode estar relacionado ao diâmetro do grão em suspensão neste estuário estar mais próxima da faixa de sensibilidade da frequência de 1200 khz do que para faixa de 600 khz (Guerrero et al., 2011).

Nota-se que o RO estimou com maior precisão do que o RA, embora a diferença entre os erros padrão não seja grande (0,9 mg/L em Sotave; 0,2 mg/L em Vigia e 4,1 mg/L em Turé). A proximidade entre os métodos aplicados garante maior confiabilidade para os dados apresentados.

#### 5.4 ESTIMATIVA DE MPS PELOS DIFERENTES MÉTODOS ACÚSTICOS

Na figura 10 são apresentados os resultados das estimativas de MPS obtidas pelos diferentes métodos de conversão do pulso acústico. O método de correlação direta (CD) utiliza os dados de intensidade do retroespalhamento oriundas do ADCP sem correções do pulso acústico, apenas o transformando para a escala de dB. Os métodos de Gartner e CD estão agrupados em conjunto com a série *in situ*. O método de Deines, por apresentar valores muito díspares em relação aos outros métodos, foi plotado ao lado.

O método de Gartner foi o que estimou com maior precisão os valores de MPS *in situ*, seguido pelo método de CD. A inserção de parâmetros calculados a partir da regressão com amostras de MPS *in situ* colabora para sua exatidão. E como o método de Gartner lineariza as estimativas, tanto a aplicação como a comparação tornam-se fáceis. Vigia obteve as melhores estimativas em todos os métodos, enquanto Sotave apresentou as piores. O método de Deines não estimou satisfatoriamente o MPS em nenhum ambiente amostrado.

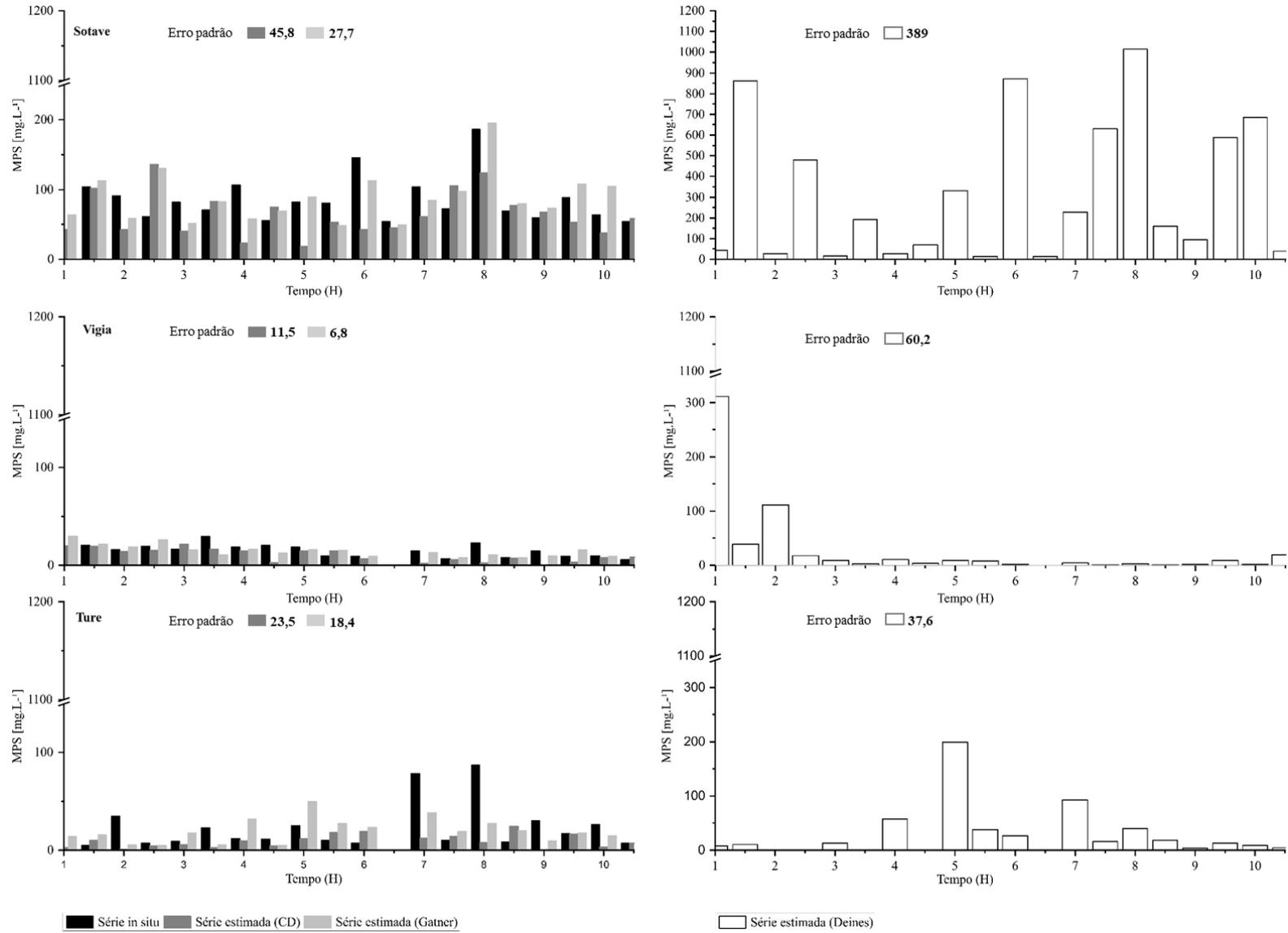


Figura 10: Estimativa de MPS a partir dos diferentes métodos de conversão do sinal acústico para ADCP de 600 e 1200 khz.

Os perfis verticais de MPS pelos diferentes métodos de conversão do sinal acústico em MPS são mostrados na figura 11. Os valores próximos a superfície sofrem grande influência das bolhas de ar originadas pela turbulência (Hanes et al., 1988). Por isso, tomou-se a precaução de utilizar somente valores de RA para estimar os perfis de MPS a partir de 1,5 m de profundidade.

Constata-se a imprecisão das estimativas para valores de fundo e superfície pelo método de Deines. O método de CD demonstra um padrão comum do pulso acústico, sua diminuição em função do distanciamento da fonte sonora, causado pelas perdas por espalhamento e absorção acústica. O método de Gartner apresenta um padrão de aumento em direção ao fundo em Vigia e Turé enquanto em Sotave os valores máximos estão associados à superfície e ao fundo.

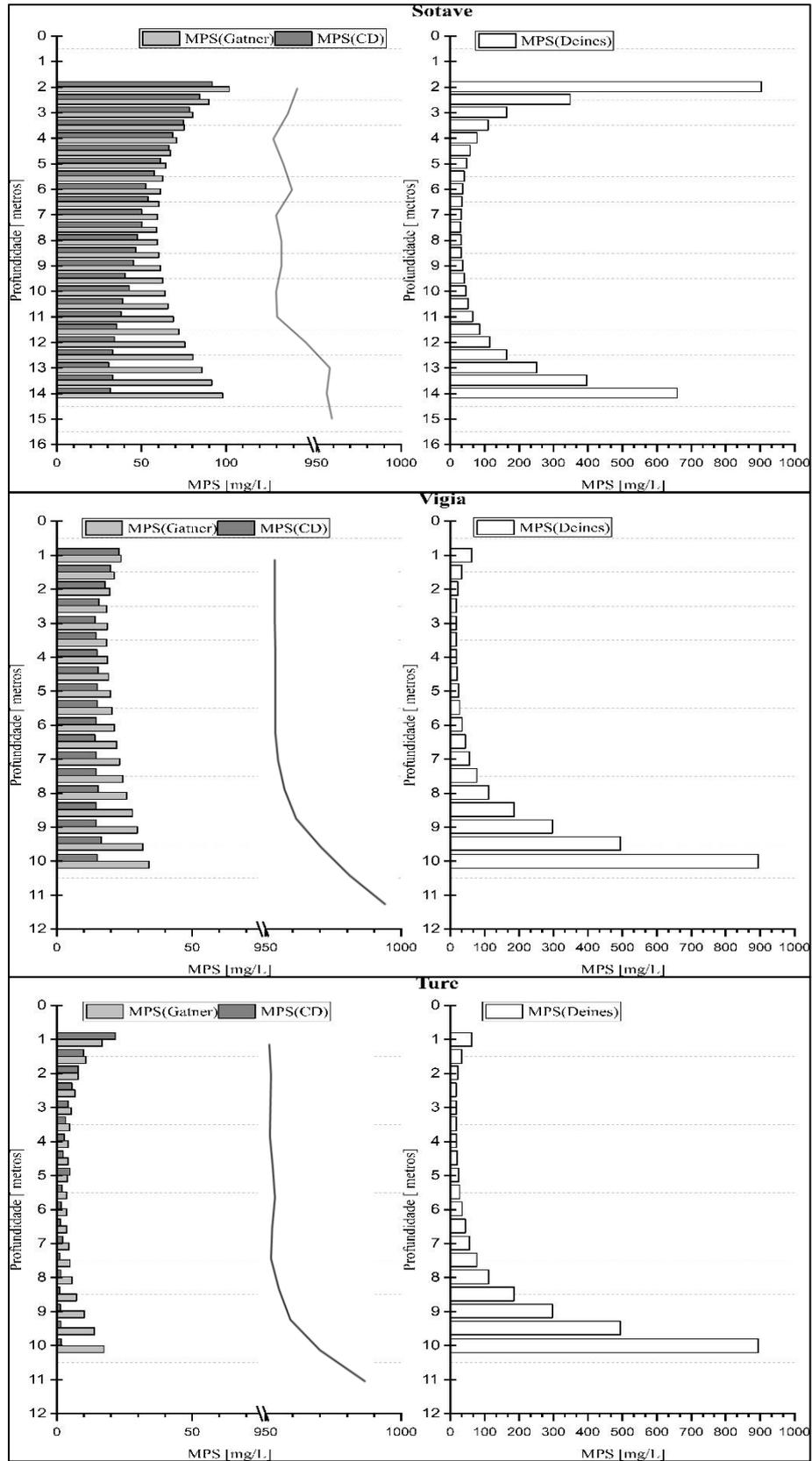


Figura 11: Perfis verticais de MPS pelos diferentes métodos de conversão do sinal acústico. Linha sólida corresponde ao padrão observado pelo método óptico.

De modo geral, os métodos que utilizaram relação de regressão (Gartner e CD) obtiveram os melhores resultados e, a mesma precisão temporal se mostrou verticalmente (Figura 10 e 11).

O método de Deines se mostrou altamente sensível aos incrementos na intensidade dos RA (Figura 10), o que acontece com maior proeminência na superfície e no fundo (Figura 11). Logo pequenos aumentos na intensidade do RA produziram variações exageradas nas estimativas, como observado por Dornelles, (2005) no rio Jacuí, Rio Grande do Sul. Como neste trabalho foi utilizado retroespalhamento acústico relativo e não o absoluto, tem-se uma perda considerável no nível de predição deste método. Em razão da carência de algumas informações, não foi possível calcular o RA absoluto, pois designar fatores absolutos para a intensidade do eco requer um nível de referência confiável, que vai desde o conhecimento das características do sinal de retorno, das características do próprio espalhador, até às informações prestadas pelo próprio fabricante.

O método de CD destaca a necessidade de serem feitas correções no pulso acústico quanto à propagação e atenuação do som. Do contrário, o RA não estará somente em função da concentração de MPS, mas em função da distância do transdutor. Os perfis pelo método de Gartner corroboraram com o perfil óptico, demonstrando ser o melhor na previsão do MPS ao longo da coluna d'água.

## 5.5 COMPARAÇÃO ENTRE ESTIMATIVAS DE MPS PELOS MÉTODOS ACÚSTICO E ÓPTICO

### 5.5.1 Perfis espaço – temporais de MPS estimados com RA e RO

A figura 12 apresenta os perfis de MPS estimados a partir de RA e RO, para os diferentes ambientes amostrados. Foi utilizado o método de Gartner na estimativa de MPS a partir de RA para a criação dos perfis, devido à sua melhor precisão. Os perfis foram construídos a partir de perfis horários de RA e RO que apresentavam valores de MPS in situ. Foram retirados os pontos localizados dentro da linha de retroespalhamento máximo e abaixo desta, devido à imprecisão imposta pela alta concentração de sedimentos, uma vez que o retroespalhamento é tão forte, devido aos sucessivos espalhamentos ocorridos, que o eco já não traz de forma precisa, informações sobre a concentração.

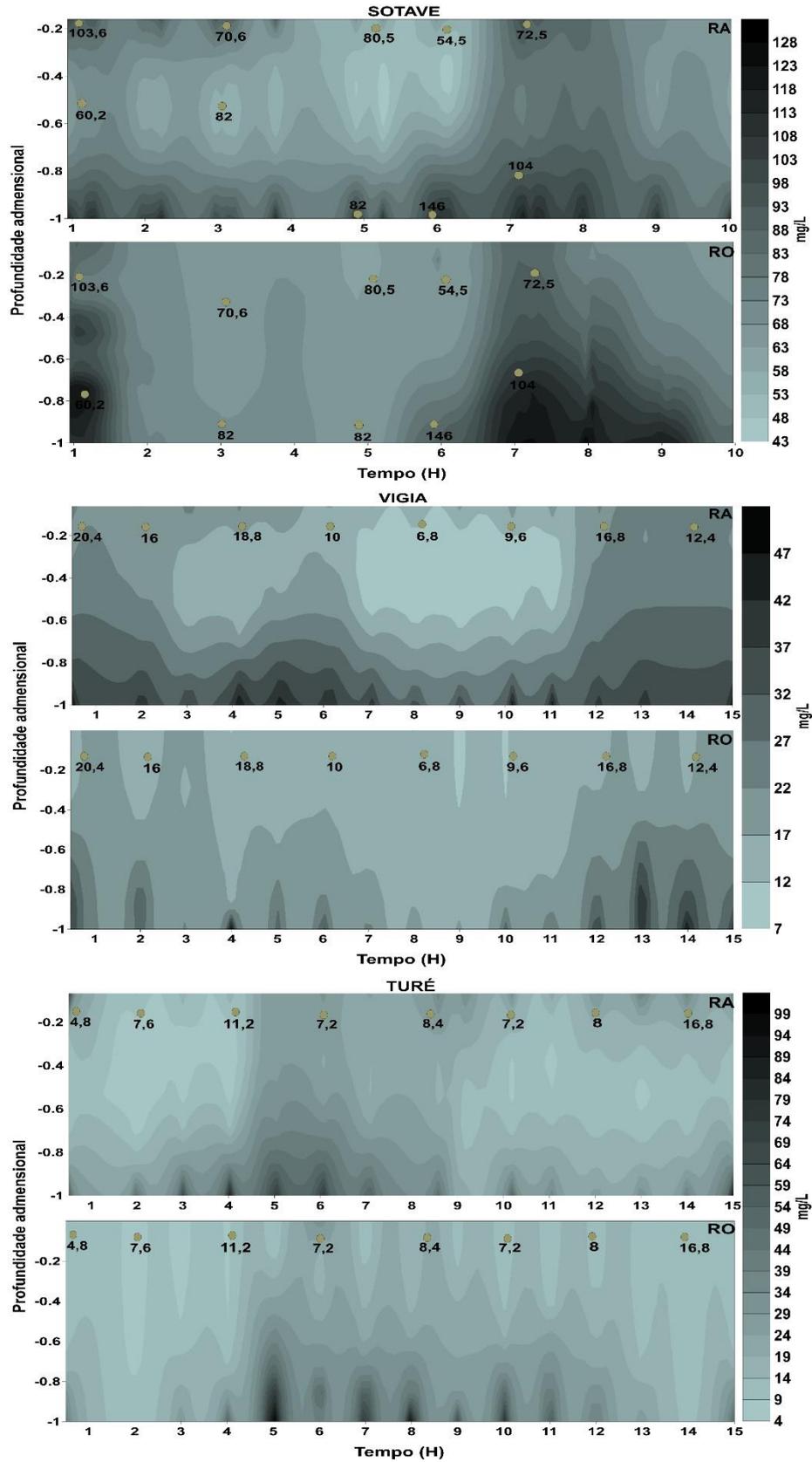


Figura 12: Perfis espaço-temporais de MPS a partir do RA e RO de Sotave, Vigia e Turé. Os pontos dentro da imagem correspondem as concentrações de MPS *in situ*. Dados interpolados pelo método inverse distance to a power.

Quantitativamente, há forte semelhança entre os métodos óptico e acústico em todos os pontos amostrais, apresentando equivalência principalmente nos momentos de alta concentração. O aparecimento de picos ocasionados pela ressuspensão são observados simultaneamente nos dois métodos. O método de interpolação causou suavizamento dos dados obtidos, sem entretanto, comprometer a progressão/regressão original.

Os perfis acústicos (RA) apresentaram maior grau de estratificação na coluna d'água em comparação com os perfis ópticos (RO). Esperava-se que nos momentos de picos de RA (Figura 3), houvesse grande extrapolação dos valores de MPS estimados pelo método acústico. Entretanto, estes picos geraram maior grau de estratificação na coluna d'água, sem grandes variações de MPS. Isso se deve provavelmente pelo uso de médias de 60 segundos para RA, que suavizaram possíveis discrepâncias. Os perfis de Vigia exibiram maior diferença entre os métodos utilizados, enquanto os outros mantiveram-se com maior conformidade.

As diferenças nos padrões de MPS ao longo da coluna d'água entre os perfis ópticos e acústicos, provavelmente indicam percepções diferentes dos sensores ao MPS. Isso pode ser explicado pela diferença de sensibilidade dos sensores à granulometria. O sensor óptico tem sua maior sensibilidade para grão com tamanhos de 1,5  $\mu\text{m}$ , por isso responderem melhor à granulometria fina (Bunt et al., 1999). Nos sensores acústicos, a maior sensibilidade está nos grãos grossos de tamanho superiores a 100  $\mu\text{m}$ , (Gartner, 2001; Guerrero et al., 2011). Como a hidrodinâmica neste estuário é alta, há a possibilidade de mudanças granulométricas ao longo da coluna d'água, que podem ocasionar incrementos na resposta no sinal acústico, como observado nas estimativas próximas ao fundo (Guerrero et al., 2011). A utilização de sensores acústicos de monofrequência geram incertezas derivadas de mudanças granulométricas (Reichel e Nachtnebel, 1994). Por isso, o método acústico requer, para medidas mais precisas, distribuição granulométrica razoavelmente estável (Gartner, 2004).

### **5.5.2 Séries temporais de MPS estimados com RA e RO**

A avaliação da técnica acústica na estimativa de MPS utilizando ADCPs foi realizada por meio da comparação entre as estimativas do retroespalhamento óptico e MPS *in situ*. As séries temporais de MPS estimados a partir de RA e RO são mostrados nas Figura 13. Os valores de MPS apresentados são valores de superfície e fundo.

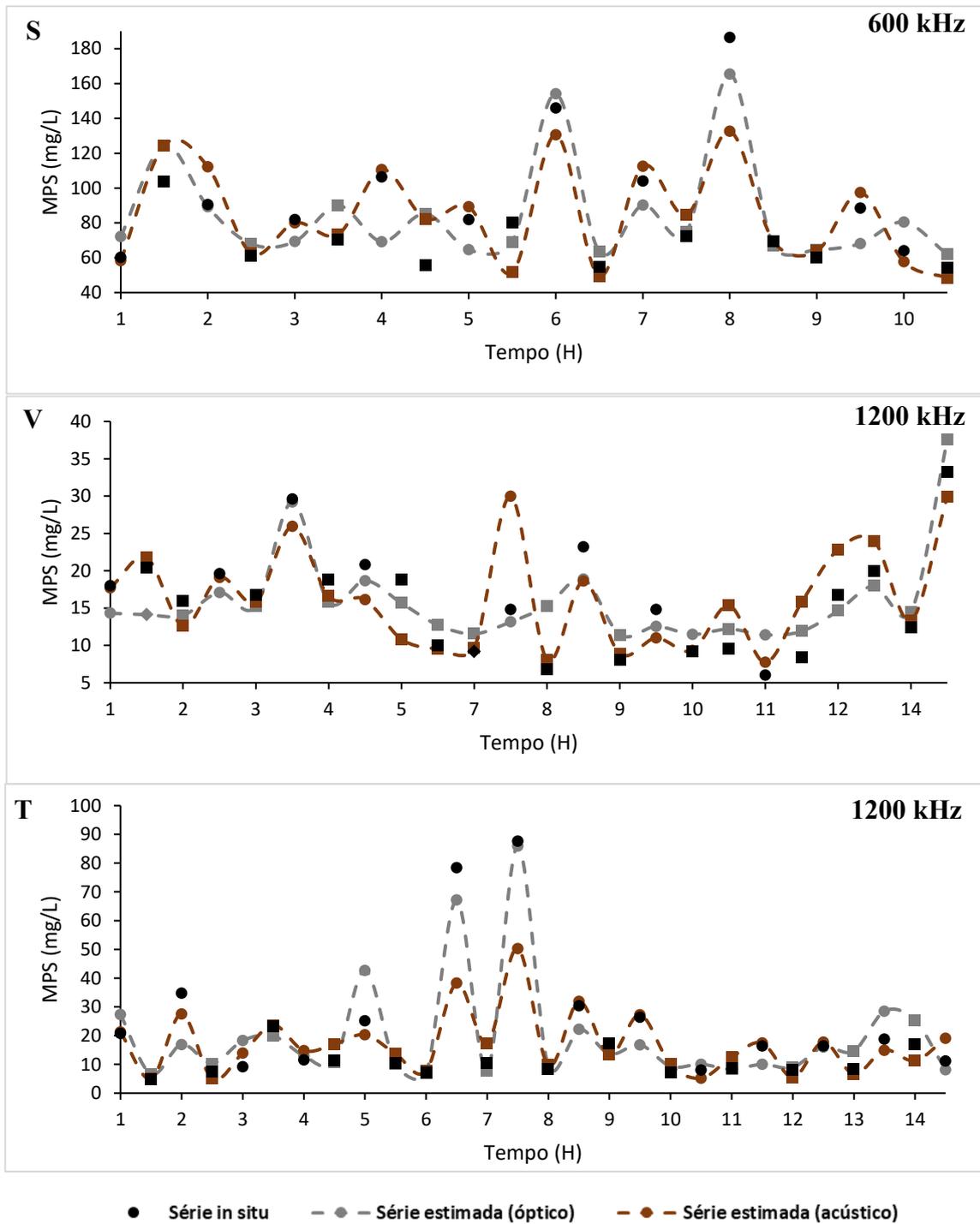


Figura 13: Séries temporais de concentração de MPS in situ e as séries estimada pelo retroespalhamento óptico e retroespalhamento acústico (método de Gartner) no estuário do rio Pará. O marcador em formato de círculo corresponde a amostras de fundo e o quadrado amostras de superfície.

Em Sotave e Turé as melhores estimativas baseadas em RA e RO estão associadas às menores concentrações e a valores de superfície. Em Vigia as melhores estimativas baseadas em RA também estão relacionadas às menores concentrações, já o RO estimou melhor as maiores concentrações. Divergências entre estimativas de RA e RO são maiores no fundo. Em

geral, não houve diferenças significativas entre as estimativas de RA e RO para os pontos estudados. Tanto o MPS quanto a granulometria tendem a ser homogêneas nas águas superficiais, favorecendo medidas mais precisas a partir de RA (Gartner, 2004). Já o sensor óptico, possui sinal mais linear para mudanças granulométricas, o que o torna mais adequado para medidas de fundo (Vousdoukas et al., 2011).

As séries estimadas de MPS mostraram, na maioria dos casos, boa correspondência com os valores observados. As inexatidões do método acústico e óptico provavelmente estão associadas tanto a mudanças de concentração quanto a mudanças de granulometria (Reichel e Nachtnebel, 1994; Bunt et al., 1999), levando o método óptico a medidas mais representativas de MPS.

Ao longo do tempo há momentos de subestimação e superestimação tanto do método óptico quanto do acústico. Comumente, o método óptico tende a superestimar e o método acústico a subestimar os valores de MPS em momentos de granulometria fina (silte/argila). Essa tendência é invertida quando a granulometria aumenta (Gartner, 2004). Este resultado pode indicar mudança granulométrica ao longo de um ciclo de maré no estuário do rio Pará, gerando valores subestimados e superestimados em função desta forçante.

Apesar das frequências empregadas não terem sido aplicadas simultaneamente e nos mesmos ambientes, supõe-se com base no nível de precisão alcançado pelo ADCP de 1200 e 600 khz, que o primeiro adequa-se melhor ao ambiente estudado. Para a frequência do ADCP utilizado neste trabalho, os limites de detecção relacionado ao tamanho do grão são de 140  $\mu\text{m}$  (areia fina), para ADCP de 1200 khz e de 220  $\mu\text{m}$  (areia média), para ADCP de 600 khz. O pico de sensibilidade corresponde a um diâmetro de 300  $\mu\text{m}$  (areia grossa), (Guerrero et al., 2011). Assim é provável que as medições não tenham sido realizadas próximas ao pico de sensibilidade, mas próximas ao limite de detecção do ADCP, pois o tipo de material mais comum de ser transportado em suspensão neste estuário corresponde a fração silte e argila (Corrêa, 2005; Gregório e Mendes, 2009;). Neste caso, a frequência com o pico de sensibilidade compatível com a granulometria silte/argila corresponderia a dezenas de Mhz. Porém, isso implicaria em um alcance acústico muito baixo, inviabilizando a utilização desse equipamento para medições de perfis mais profundos (maiores que 20 m), (Hanes et al., 1988). Princípio, a dependência frequência/tamanho do grão pode ser explorada para obter tanto a concentração como o tamanho dos grãos, caso façam medições com múltiplas frequências (Hay e Sheng, 1992).

Apesar da amostragem ter sido realizada em curto período (~13 horas), as mudanças nas variáveis ambientais (como o sal e o próprio MPS) estão bem representadas, pois é nesse período (ciclo de maré semidiurno) onde acontece as maiores variações desses parâmetros, atestado pela grande faixa de variação de MPS trabalhada, tendo outra expressiva mudança somente em função da sazonalidade (semestralmente), (Costa, 2014).

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A comparação entre estimativas acústicas de MPS com amostras *in situ* demonstraram que medições com boa precisão podem ser obtidas acusticamente utilizando ADCPs. É uma alternativa bastante promissora como técnica de obtenção de perfis de MPS, especialmente pelo seu alcance espaço-temporal.

O método óptico possui a vantagem de não ser tão dependente da granulometria quanto o método acústico, além de mostrar respostas mais lineares ao aumento da concentração. Quantitativamente, não houve diferenças significativas nas estimativas entre o método óptico e acústico, mas há respostas diferentes entre os perfis verticais.

O método de Gartner foi o único que estimou satisfatoriamente os valores de MPS para o estuário do rio Pará, com o método de Deines possuindo o pior resultado.

Os perfis espaço-temporais de retroespalhamento acústico podem ser utilizados como ferramenta para se observar fenômenos de ressuspensão e cálculo de descarga sólida em rios e estuários.

Recomenda-se aumento no período de observação, pois o aumento no número de amostras tende a diminuir o erro dos modelos de previsão. Em conjunto com amostras pontuais *in situ* pode ser usado instrumentos de retroespalhamento óptico para a produção de perfis de MPS, tornando a calibração mais robusta e, por conseguinte mais confiável. No caso do presente estudo foram coletadas amostras de água para calibração do ADCP em diferentes profundidades. Aconselha-se coletar água em um ponto fixo, pois facilita a correlação e o processamento dos dados acústicos.

Para futuros trabalhos seria importante a calibração em laboratório para se determinar com exatidão a relação do pulso acústico com a granulometria e mineralogia dos sedimentos presentes no ambiente estudado. A intensidade do sinal acústico que retorna é bastante dependente do tamanho do grão, por isso a necessidade de haver calibração com amostras em campo e em laboratório. Uma abordagem para resolver esse problema em campo é o uso de sistemas de retroespalhamento acústico multifrequencial. Estes podem obter informações sobre a concentração de sedimento em suspensão e o tamanho das partículas.

Aconselha-se a utilizar o ADCP fixo quando este for empregado para estimar MPS. Uma vez que o desempenho dos ADCPs depende da relação entre a velocidade da água e o deslocamento do equipamento. Sabe-se que pequenas mudanças não afetam os dados de RA, mas é desconhecido o efeito de grandes deslocamentos e balanços na estimativa de RA.

## REFERÊNCIAS

- Amore, C., Randazzo, G, 1997, First data on the coastal dynamics and the sedimentary characteristics of the area influenced by the River Irmínio basin (SE Sicily): *Catena*, **30**, 357-368.
- Baker, E. T., Lavelle, J. W, 1984, The effect of particle size on light attenuation coefficient of natural suspensions: *Journal of Geophysical Research*, **89**, 8197-8203.
- Baranya, S., Józsa, J, 2013, Estimation of suspended sediment concentrations with ADCP in Danube River: *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, **61**, 232-240.
- Baumgarten, M. G. Z., Wallner-Kersanach, M., Niencheski, L. F. H, 2010, Manual de análises em oceanografia química. Rio Grande: Editora da FURG, 174 p.
- Beamish, P., 1971, Quantitative measurements of acoustic scattering from zooplanktonic organisms: In *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, **18**, 811-822.
- Black KP., Rosenberg M. A, 1994, Suspended sand measurements in a turbulent environment: field comparison of optical and pump sampling techniques: *Coastal Engineering Journal*, **24**, 137-150.
- Bunt, J.A.C., Larcombe, P., Jago, C.F, 1999, Quantifying the response of optical backscatter devices and transmissometers to variations in suspended particulate matter: *Continental Shelf Research*, **19**, 1199-1220.
- Clarke, T. L., Proni, J. R., Craynock, J. F, 1984, A simple model for the acoustic cross section of sand grains: *The Journal of the Acoustical Society of America*, **76**, 1580-1582.
- Cook, R. D., 1977, Detection of Influential Observations in Linear Regression: *American Statistical Association Technometrics*, **19**, 15-18.
- Correa, I. C. S., 2005, Aplicação do diagrama de Pejrup na interpretação da sedimentação e da dinâmica do estuário da baía de Marajó-PA: *Pesquisas em Geociências*, **32**, 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: Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará.
- De Campbell, D. E., Spinrad, R. W, 1987, The relationship between light attenuation and particle characteristics in a turbid estuary: *Estuarine, coastal and shelf science*, **25**, 53-65.
- Deines, K. L., 1999, Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers: paper presented at Sixth Working Conference on Current Measurement, IEEE.
- Downing, A., Thorne, P. D., Vincent, C. E, 1995, Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer: *The Journal of the Acoustical Society of America*, **97**, 1614-1620.
- Downing, J., 2006, Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly: *Continental Shelf Research*, **26**, 2299-2318.
- Dyer, K. R., 1988, Fine sediment particle transport in estuaries: In *Physical processes in estuaries*, Springer, 295-310.
- Edwards, T. E., Glysson, G. D, 1999, Field methods for collection of fluvial sediment: U.S. Geological Survey, *Techniques of Water-Resources Investigations*, **3**, 89. Disponível em <https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-c2/html/pdf.html>.
- Esteves, F. A., 1998, *Fundamentos de Limnologia*, Ed- 2, Rio de Janeiro: Interciência.
- Field, A., 2009, *Descobrendo a estatística usando o SPSS*, 2nd. ed.: Artmed.
- Filizola, N., Guyot, J. L, 2011, Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia: *Revista Brasileira de Geociências*, **41**, 566-576.
- Filizola, N., Guyot, J. L, 2004, The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon: *Hydrological Sciences Journal*, **49**, 143-153.
- Flagg, C. N., Smith, S. L, 1989, On the use of the acoustic Doppler current profiler to measure zooplankton abundance: *Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers*, **36**, 455-474.

- Flammer, G. H., 1962, Ultrasonic measurement of suspended sediment: US Government Printing Office, **1141**, 48.
- Franswilliam, J. B., 2005, Obtenção de perfis de concentração de sedimentos em suspensão nos rios da Bacia Amazônica a partir do Sinal de Retorno Acústico (Backscattering) de um Perfilador Doppler Acústico de Corrente (ADCP): Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Gammon, J. R., 1970, The effect of inorganic sediment on stream biota, U.S. Environmental Protection Agency, Water Pollution Control Research Series. U.S., 1-141.
- Gartner, J. W., 2004, Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California: *Marine Geology*, **211**, 169-187.
- Gray, J. R., Gartner, J. W., 2009, Technological advances in suspended sediment surrogate monitoring: water resources research, **45**, W00D29.
- Greenlaw, C. F., 1979. Acoustical estimation of zooplankton populations: *Limnology and Oceanography*, **24**, 226-242.
- Gregório, A. M. D. S., Mendes, A. C., 2009, Batimetria e sedimentologia da baía do Guajará: Amazônia: Ciência e desenvolvimento, Belém- Pará, **5**, 53-72.
- Guimarães, V., Sígolo, J. B., 2008, Associação de Resíduos da Metalurgia com Sedimentos em Suspensão - Rio Ribeira de Iguape: *Geologia USP Série Científica*, **8**, 1-10.
- Ha, H. K., Kim, Y. H., Lee, H. J., Hwang, B., Joo, H. M., 2015, Under-ice measurements of suspended particulate matters using ADCP and LISST-Holo: *Ocean Science Journal*, **50**, 97-108.
- Hampton, L. D., 1967, Acoustic Properties of Sediments: *The Journal of the Acoustical Society of America*. **42**, 882; doi: 10.1121/1.1910662
- Hanes, D. M., Vincent, C. E., Huntley, D. A., Clarke, T. L., 1988, Acoustic measurements of suspended sand concentration in the C<sup>2</sup>S<sup>2</sup> experiment at Stanhope Lane, Prince Edward Island: *Marine Geology*, **81**, 185-196.
- Hatcher, A., Hill, P., Grant, J., Macpherson, P., 2000, Spectral optical backscatter of sand in suspension: effects of particle size, composition and colour: *Marine Geology*, **168**, 115-128.
- Hay, A. E., 1983, On the remote acoustic detection of suspended sediment at long wavelengths: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **88**, 7525-7542.
- Hay, A. E., Burling, R. W., Murray, J. W., 1982, Remote acoustic detection of a turbidity current surge: *Science*, **217**, 833-835.
- Hay, A. E., Sheng, J., 1992, Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multifrequency acoustic backscatter: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **97**, 15661-15677.
- Henley, W. F., Patterson, M. A., Neves, R. J., Lemly, A. D., 2000, Effects of sedimentation and turbidity on lotic food webs: a concise review for natural resource managers: *Reviews in Fisheries Science*, **8**, 125-139.
- Herbert, D. W., Alabaster, J. S., Dart, M. C., Lloyd, R., 1961, The effect of china-clay wastes on trout streams: *International Journal of Air and Water Pollution*, **5**, 56-74.
- Hoitink, A. J. F., Hoekstra, P., 2004, Hoekstra. Observations of suspended sediment from ADCP and OBS measurements in a mud-dominated environment: *Coastal Engineering*, **52**, 103-118.
- Holdaway, G. P., Thorne, P. D., Flatt, D., Jones, S. E., Prandle, D., 1999, Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration: *Continental Shelf Research*, **19**, 421-441.
- Humphrey, C., Weber, M., Lott, C., Cooper, T., Fabricius, K., 2008, Effects of suspended sediments, dissolved inorganic nutrients and salinity on fertilisation and embryo development in the coral *Acropora millepora* (Ehrenberg, 1834): *Coral Reefs*, **27**, 837-850.

- Lewis, J, 2002, Estimation of suspended sediment flux in streams using continuous turbidity and flow data coupled with laboratory concentrations: In: Turbidity and other sediment surrogates workshop.
- Lohrman, A., Huhta, C, 1994, Plume measurement system (Plumes) calibration experiment, dredging Research program: Technical Report DRP-94-3, US Army Corps of Engineers, Washington, 152.
- Lorenz, F. O., 1987, Teaching about Influence in Simple Regression: American Sociological Association Teaching Sociology, **15**, 173–177.
- Marttila, H., Postila, H, Kløve, B, 2010, Calibration of turbidity meter and acoustic doppler velocimetry (Triton-ADV) for sediment types present in drained peatland headwaters: Focus on particulate organic peat: River research and applications, **26**, 1019-1035.
- Mascarenhas, A. F. S., Brabo, E. D. S., Silva, A. P. D., Fayal, K. D. F., Jesus, I. M. D., Santos, E. D, 2004, Avaliação da concentração de mercúrio em sedimentos e material particulado no rio Acre, estado do Acre, Brasil: Acta Amazônica, **34**, 61-68.
- Mccabe, G. D., O'Brien, W. J, 1983, The effects of suspended silt on feeding and reproduction of *Daphnia pulex*: American Midland Naturalist, 324-337.
- Miranda, L. B., Castro, B. M., Kjerfve, B, 2002, Princípios de oceanografia física de estuários: São Paulo: EDUSP.
- Newcombe, C. P., MacDonald, D. D, 1991, Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems: North American journal of fisheries management, **11**, 72-82.
- Olsen, C. F., Cutshall, N. H., Larsen, I. L, 1982, Pollutant—particle associations and dynamics in coastal marine environments: a review: Marine Chemistry, **11**, 501-533.
- Prestes, Y. O., Rollnic, M., Silva, M. S., Rosário, R. P, 2014, Volume transport in the tidal limit of the Pará River, Brazil: In Proceedings of the 17th Physics of Estuaries and Coastal Seas conference, 19-24.
- Prestes, Y. O., SILVA, A. C., Rollnic, M., Rosário, R. P, 2017, The M2 and M4 tides in the Pará river estuary: Tropical Oceanography, **45**, 26-37.
- Proni, J. R., Rona, D. C, Lauter Jr, C. A., Sellers, R. L, 1975, Acoustic observations of suspended particulate matter in the ocean: Nature, **254**, 413-415.
- Proni, J. R., Rona, D. C., Lauter Jr, C. A., Sellers, R. L, 1975, Acoustic observations of suspended particulate matter in the ocean: Nature, **254**, 41-415.
- RDI., 1996, Principles of operation a practical primer, disponível em RDInstruments.com.
- Reichel, G., Nachtnebel, H. P, 1994, Suspended sediment monitoring in a fluvial environment: advantages and limitation applying an acoustic Doppler current profiler: Water Research, **28**, 751 – 761.
- Ridd, P., Larcombe, P, 1994, Biofouling control for optical backscatter suspended sediment sensors: Marine Geology, **116**, 255-258.
- Rosário, R. P., 2016, Análise de processos oceanográficos no estuário do rio Pará. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará.
- Sari, V., Castro, N., Kobiyama, M, 2015, Estimativa da concentração de sedimentos suspensos com sensores ópticos: Revisão: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, **20**, 816-836.
- Sheng, J., Hay, A. E, 1988, An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand: The Journal of the Acoustical Society of America, **83**, 598-610.
- Stoll., R. D., Bryan, G. M, 1970, Wave Attenuation in Saturated Sediments: The Journal of the Acoustical Society of America, **47**, 1440-1447, doi: 10.1121/1.1912054.
- Thorne, P. D., Hardcastle, P. J, 1997, Acoustic measurements of suspended sediments in turbulent currents and comparison with in-situ samples: The Journal of the Acoustical Society of America, **101**, 2603-2613; doi: 10.1121/1.418501.
- Urick, R. J., 1948, The absorption of sound in suspensions of irregular particles: The Journal of the acoustical society of America, **20**, 283-289.

- Urick, R. J., 1983, Principles of Underwater Sound, 3rd. Ed.: New York.
- Vagle, S., Farmer, D. M., 1992, The measurement of bubble-size distributions by acoustical backscatter: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **9**, 630-644.
- Vousdoukas, M. I., Aleksiadis, S., Grenz, C., Verney, R., 2011, Comparisons of acoustic and optical sensors for suspended sediment concentration measurements under non-homogeneous solutions: *Journal of Coastal Research, Special Issue*, **64**, 160-164.
- Wilber, D. H., Clarke, D. G., 2001, Biological effects of suspended sediments: a review of suspended sediment impacts on fish and shellfish with relation to dredging activities in estuaries: *North American Journal of Fisheries Management*, **21**, 855-875.
- Wurl, O., 2009, *Practical Guidelines for the Analysis of Seawater*: Boca Raton, CRC Press.
- Young, R. A., Merrill, J. T., Clarke, T. L., Proni, J. R., 1982, Acoustic profiling of suspended sediments in the marine bottom boundary layer: *Geophysical Research Letters*, **9**, 175-178.