

# UFPA

**PPGEC**

# Universidade Federal do Pará

---



Pablo Abreu de Oliveira

**ESTIMATIVA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO  
UTILIZANDO UM PERFILADOR ACÚSTICO DE  
CORRENTES POR EFEITO DOPPLER**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Prof. Claudio José Cavalcante Blanco,  
Ph.D.

Belém – Pará – Brasil

2019

Pablo Abreu de Oliveira

**ESTIMATIVA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO UTILIZANDO UM  
PERFILADOR ACÚSTICO DE CORRENTES POR EFEITO DOPPLER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Hídrica.

Orientador: Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

Belém-PA

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Biblioteca do ITEC/UFPA-Belém-PA**

---

O48 Oliveira, Pablo Abreu de, 1988-  
Estimativa de sedimentos em suspensão  
utilizando um perfilador acústico de correntes por  
efeito doppler / Pablo Abreu de Oliveira. - 2019.

Orientador: Claudio José Cavalcante Blanco

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal  
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2019.

1.Sedimentos (geologia) – Guamá, Rio (PA).  
2.Sedimentos fluviais. 3.Doppler, velocímetro por  
laser. I.Título.

CDD 23. ed. – 5 5 1 . 3 0 4 0 9 8 1 1 5

---

Elaborado por Kelren Cecília dos Santos Lima da Mota – CRB-2/1461



## ESTIMATIVA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO UTILIZANDO UM PERFILADOR ACÚSTICO DE CORRENTES POR EFEITO DOPPLER

AUTOR:

**PABLO ABREU DE OLIVEIRA**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL.

APROVADO EM: 28 / 03 / 2019.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.  
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. Augusto César de Mendonça Brasil  
Membro Externo (UnB/GAMA)

Profa. Dra. Patrícia da Silva Holanda  
Membro Externo (PNPD/PRODERNA/UFPA)

Prof. Dr. Francisco Carlos Lira Pessoa  
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

“O rio atinge os seus objetivos porque aprendeu a contornar os obstáculos.”

(André Luís)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me guiar e permitir que eu pudesse chegar à conclusão desta etapa.

A toda minha família, em especial à minha mãe, Luzia Renilda, meu pai, Heloiso, minhas irmãs Panmelly e Paola, minha namorada Amanda Ramos e minha filha Ághata, que sempre confiaram em mim e me deram todo apoio.

Ao meu orientador, professor Claudio José Cavalcante Blanco, por ter paciência e ter acreditado em minha capacidade, pelo auxílio e orientação.

Ao Professor Andre Mesquita por ter nos cedido o barco para as pesquisas e ter nos auxiliado na confecção do suporte para os equipamentos.

Ao Engenheiro David Lopes e aos técnicos da CPRM pelos equipamentos cedidos e pelo apoio durante as medições.

A professora Ana Julia por ter cedido espaço no laboratório da UEPA e ter nos auxiliado nas análises laboratoriais.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em Água, Energia e Sustentabilidade da Amazônia (GAES) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pelo apoio e pelos momentos de descontração.

Aos amigos que conheci no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da UFPA, em especial, Laila Rover, Roberto Correa, Eduardo Aguiar, Calina Barros, Artur Vieira, Josias Cruz e Raphael Sampaio.

A todos que não foram citados, mas que também contribuíram direta e indiretamente para que eu concluísse o mestrado, o meu mais sincero agradecimento.

## RESUMO

Na gestão dos recursos hídricos é de fundamental importância conhecer o comportamento, a qualidade e a quantidade de sedimentos transportados em ambientes fluviais. Esses dados sedimentométricos são úteis na definição de vários aspectos e resolução de problemas da engenharia de recursos hídricos. O ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*) é uma nova tecnologia para medições de vazão e velocidade em rios através de ondas acústicas, que também podem ser convertidas em concentrações de sedimentos. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é verificar a aplicabilidade da utilização do ADCP como uma alternativa para medições de sedimentos em suspensão. Para isso, foi utilizado o método de Gartner (2002), calibrando sua equação com as concentrações obtidas pelo método de amostragem pontual, coletadas com uma garrafa de *Van Dorn* no rio Guamá. O método utilizado para obter CSS (Concentração de sedimentos em suspensão) com dados do ADCP resultou em uma boa estimativa das concentrações, apoiada na calibração supracitada. Houve uma boa correlação entre a concentração de sedimentos medida e a estimada de 0,68 para CSS pontual e de 0,81 para CSS média das verticais. Através das análises dos dados gerados podemos afirmar que o ADCP também pode ser utilizado para medir sedimentos em suspensão de maneira indireta a partir do retorno do sinal acústico.

Palavras-chave: ADCP; concentração de sedimentos; rio Guamá.

## **ABSTRACT**

In the management of water resources it is of fundamental importance to know the behavior, quality and quantity of sediments transported in river environments. These sedimentometric data are useful in defining various aspects and problem solving of water resources engineering. ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) is a new technology for flow and velocity measurements in rivers through acoustic waves, which may also be covered in sediment concentrations. In this context, the objective of the present work is to verify the applicability of the use of ADCP as an alternative for suspended sediment measurements. For this, the method of Gartner (2002) was used, calibrating its equation with the concentrations obtained by the point sampling method, collected with a bottle of Van Dorn in the Guamá river. The method used to obtain CSS (Suspended Sediment Concentration) with ADCP data resulted in a good estimate of concentrations, supported by the above calibration. There was a good correlation between the sediment concentration measured and the estimated 0.68 for point CSS and 0.81 for the vertical CSS. Through analyzes of the generated data we may affirm that the ADCP may also be used to measure suspended sediments in an indirect way from the return of the acoustic signal.

Keywords: ADCP; sediment concentration; Guamá river.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo Geral .....	14
1.1.2 Objetivos Específicos.....	14
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1 ESTADO DA ARTE.....	15
2.2 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM CAMPO.....	19
2.2.1 Amostragem Mecânica .....	19
2.2.1.1 Método de amostragem pontual (MAP) .....	20
2.2.1.2 Método de amostragem por integração na vertical .....	20
2.2.2 Métodos Óticos .....	23
2.2.3 Medição com equipamentos nucleares.....	24
2.2.4 Imagem Digital Foto-Ótica .....	24
2.2.5 Método a laser .....	25
2.2.6 Reflectância espectral.....	25
2.2.7 Pressão Diferencial .....	26
2.2.8 Medidores Acústicos de Correntes por Efeito Doppler.....	26
2.2.8.1 Princípio Físico do funcionamento do ADCP .....	28
2.2.8.2 Instalação e áreas de medição do ADCP .....	35
2.2.8.3 Interferências nas medições com o ADCP.....	37
2.2.8.4 Conversão de retroespalhamento (ABS) em CSS.....	38
<b>3. ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>43</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>46</b>
4.1 PROCEDIMENTOS DE CAMPO .....	48

4.1.1	Local das Medições .....	48
4.1.2	Equipamentos utilizados .....	49
4.1.3	Instalação para amostragem.....	53
4.1.4	Procedimento de amostragem .....	55
4.2	PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO .....	56
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>60</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> - ZONAS DE AMOSTRAGENS, MEDIDA E NÃO MEDIDA, NUMA VERTICAL DE AMOSTRAGEM DA CORRENTE COM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE FLUXO E CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO.....	<b>20</b>
<b>FIGURA 2</b> - AMOSTRAGENS PELO MÉTODO DE IGUAL INCREMENTO DE LARGURA. ....	<b>22</b>
<b>FIGURA 3</b> - AMOSTRAGEM PELO MÉTODO DE IGUAL INCREMENTO DE DESCARGA.....	<b>23</b>
<b>FIGURA 4</b> - CÉLULAS DE PROFUNDIDADE MEDIDAS COM ADCP COMPARANDO COM A MEDIÇÃO COM MOLINETES. ....	<b>27</b>
<b>FIGURA 5</b> - FEIXES DO ADCP MEDINDO UMA CAMADA HOMOGÊNEA.....	<b>31</b>
<b>FIGURA 6</b> - DETALHAMENTO DO EFEITO DOPPLER: (A) DISPERSÃO DO ECO CAUSADO PELAS PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO. (B) MUDANÇA NA FREQUÊNCIA DE UM PULSO EMITIDO PELO ADCP. ....	<b>32</b>
<b>FIGURA 7</b> - ÂNGULO FORMADO COM A VERTICAL. ....	<b>33</b>
<b>FIGURA 8</b> - ADCP DA SOLTEK MODELO M9 COM 4 TRANSDUTORES DE 1 MHZ E 4 DE 3 MHZ...	<b>34</b>
<b>FIGURA 9</b> - COMPONENTES DA VELOCIDADE MEDIDAS PELO ADCP. ....	<b>34</b>
<b>FIGURA 10</b> - PRINCIPAIS FORMAS DE INSTALAÇÃO DE ADCPS. ....	<b>35</b>
<b>FIGURA 11</b> - ÁREA MEDIDAS E NÃO MEDIDAS PELO ADCP. ....	<b>36</b>
<b>FIGURA 12</b> - MEDIÇÕES NO CANAL DO TUCUNDUBA NA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ DURANTE O CURSO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO MINISTRADO PELA CPRM (COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSO MINERAIS), VELOCIDADES E RELAÇÃO SINAL/RUÍDO APRESENTADOS PELO PROGRAMA RIVERSURVEYOR LIVE DA SOLTEK. ....	<b>37</b>
<b>FIGURA 13</b> - ESQUEMA DE CONVERSÃO DAS INTENSIDADES EM CONCENTRAÇÕES. ....	<b>42</b>
<b>FIGURA 14</b> – MAPA DO BRASIL DESTACANDO O ESTADO DO PARÁ E IMAGEM DE SATÉLITE DO MUNICÍPIO DE BELÉM. ....	<b>43</b>
<b>FIGURA 15</b> – MAPA DO BRASIL DESTACANDO O ESTADO DO PARÁ E A SUB-REGIÃO HIDROGRÁFICA COSTA ATLÂNTICA NORDESTE. ....	<b>44</b>
<b>FIGURA 16</b> - LAPTOP, SMARTPHONE, ADP DA SOLTEK MODELO M9, MÓDULO DE ALIMENTAÇÃO E ANTENA DGPS. ....	<b>46</b>
<b>FIGURA 17</b> - PROJETO DO SUPORTE EM AÇO INOX PARA O ADCP ....	<b>47</b>
<b>FIGURA 18</b> - BARCO UTILIZADO NA PESQUISA E SUPORTE PARA O ADCP. ....	<b>47</b>
<b>FIGURA 19</b> - ADCP INSTALADO NA EMBARCAÇÃO.....	<b>48</b>

<b>FIGURA 20</b> – IMAGEM DE SATÉLITE DA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM, DA BAIJA DO GUAJARÁ E DO RIO GUAMÁ DESTACANDO A SEÇÃO DE MEDIDAS DAS CONCENTRAÇÕES DE SEDIMENTOS.....	<b>49</b>
<b>FIGURA 21</b> - ADCP M9 UTILIZADO NA PESQUISA. ....	<b>50</b>
<b>FIGURA 22</b> – GARRAFA DE VAN DORN E LASTRO UTILIZADO NAS MEDIÇÕES. ....	<b>50</b>
<b>FIGURA 23</b> - GARRAFA PARA ARMAZENAMENTO DAS AMOSTRAS.....	<b>51</b>
<b>FIGURA 24</b> - GUINCHO HIDROMÉTRICO.....	<b>51</b>
<b>FIGURA 25</b> - NOTEBOOK COM ANTENA BLUETOOTH. ....	<b>52</b>
<b>FIGURA 26</b> – EQUIPAMENTO RTK INSTALADO SOBRE O TRAPICHE DA UFPA. ....	<b>53</b>
<b>FIGURA 27</b> - ESQUEMA IDEAL DE MONTAGEM DO ADCP E DO AMOSTRADOR NO BARCO. ....	<b>54</b>
<b>FIGURA 28</b> - FOTO DO APARELHO E EQUIPAMENTOS DE COLETA INSTALADOS NO BARCO. ....	<b>55</b>
<b>FIGURA 29</b> - PERFIL DE VELOCIDADES NA SEÇÃO DE MEDIÇÃO DO RIO GUAMÁ EM MARÉ VAZANTE. ....	<b>56</b>
<b>FIGURA 30</b> - CADINHO DE GOOCH LIGADO EM UMA BOMBA DE VÁCUO UTILIZADO NOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO.....	<b>57</b>
<b>FIGURA 31</b> - PROVETA COM 100 ML DE AMOSTRA E GARRAFA PLÁSTICA UTILIZADA NA PESQUISA.....	<b>57</b>
<b>FIGURA 32</b> - MEMBRANAS NA BALANÇA DE PRECISÃO SENDO PESADAS E IDENTIFICADAS. ....	<b>58</b>
<b>FIGURA 33</b> – AMOSTRAS NAS LÂMINAS DE VIDRO AO SAÍREM DA ESTUFA E AMOSTRAS NO DESSECADOR. ....	<b>58</b>
<b>FIGURA 34</b> - PERFIL DO RIO GUAMÁ NA SEÇÃO DE MEDIDAS COM OS DADOS DE SNR (RELAÇÃO SINAL/RUÍDO).....	<b>60</b>
<b>FIGURA 35</b> - GRÁFICO BOX PLOT DOS DADOS DE RETROESPALHAMENTO UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO.....	<b>65</b>
<b>FIGURA 36</b> - GRÁFICO BOX PLOT DOS DADOS DE CSS OBTIDOS DAS AMOSTRAS COLETADAS.....	<b>65</b>
<b>FIGURA 37</b> - REGRESSÃO DOS DADOS BRUTOS DE CSS (MG/L) E ABS (DB).....	<b>66</b>
<b>FIGURA 38</b> - REGRESSÃO ENTRE OS DADOS MÉDIOS DE ABS E CSS (MG/L). ....	<b>66</b>
<b>FIGURA 39</b> - REGRESSÃO DA CSS - MAPXADCP. ....	<b>67</b>
<b>FIGURA 40</b> - REGRESSÃO DAS CSS MEDIDA E CSS ESTIMADA MÉDIA DAS VERTICAIS. ....	<b>68</b>
<b>FIGURA 41</b> - GRÁFICO COMPARATIVO CSS MÉDIO ESTIMADO E MEDIDO. ....	<b>68</b>

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

<b>TABELA 1</b> - DADOS VERTICAL 1 DA MEDIÇÃO 1 .....	<b>61</b>
<b>TABELA 2</b> - DADOS VERTICAL 2 DA MEDIÇÃO 1 .....	<b>61</b>
<b>TABELA 3</b> - DADOS VERTICAL 3 DA MEDIÇÃO 1 .....	<b>62</b>
<b>TABELA 4</b> - DADOS VERTICAL 1 DA MEDIÇÃO 2 .....	<b>62</b>
<b>TABELA 5</b> - DADOS VERTICAL 2 DA MEDIÇÃO 2 .....	<b>62</b>
<b>TABELA 6</b> - DADOS VERTICAL 3 DA MEDIÇÃO 2 .....	<b>63</b>
<b>TABELA 7</b> - DADOS VERTICAL 4 DA MEDIÇÃO 2 .....	<b>63</b>
<b>TABELA 8</b> - DADOS VERTICAL 5 DA MEDIÇÃO 2 .....	<b>63</b>
<b>TABELA 9</b> - DADOS VERTICAL 6 DA MEDIÇÃO 2 .....	<b>64</b>
<b>TABELA 10</b> - DADOS MÉDIOS DAS VERTICAIS .....	<b>64</b>

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**ADCP** - Acoustic Doppler Current Profilers (Medidores de Corrente por Doppler Acústico), nome patentado pela RDI.

**ADP** - Acoustic Doppler Profilers (Medidores de Corrente por Doppler Acústico), nome patentado pela *Sontek*.

**NUCLEBRÁS** - Empresas Nucleares Brasileiras S/A era uma estatal brasileira.

**RDI** - *RD Instruments* empresa pioneira da comercialização do ADCP.

**IRD** - *Institut de Recherche Pour Le Développement*.

**HiBAm** - Hidrologia da Bacia Amazônica.

**CSS** - Concentração de sedimentos em suspensão

**CPRM** - Companhia de Pesquisas de Recurso Minerais

## 1. INTRODUÇÃO

Na gestão dos recursos hídricos é de fundamental importância conhecer o comportamento, a qualidade e a quantidade de sedimentos transportados em ambientes fluviais que serão utilizados em estudos ambientais, projetos de obras hidráulicas e usos múltiplos da água. Esses dados sedimentométricos são úteis na definição e resolução de vários aspectos e problemas da engenharia de recursos hídricos. O sedimento em suspensão no meio líquido ou decantado no fundo do rio pode provocar diversos problemas, desde o impedimento da navegação ao assoreamento de portos, de reservatórios, até mudanças de qualidade d'água (CARVALHO, 2008).

Para obtenção desses dados, há vários métodos de medição de sedimentos em suspensão que são classificadas em diretas e indiretas. As diretas exigem apenas um cálculo simples, enquanto as indiretas passam por determinação de outras grandezas para obtenção da concentração de sedimentos. Nesse contexto, os pesquisadores buscam alternativas, como métodos e equipamentos, que auxiliem na quantificação dos sedimentos transportados, a fim de tornar o processo mais ágil, preciso e menos oneroso (CARVALHO, 2008).

A medição dos sedimentos em suspensão pode ser feita com equipamentos que obtêm a concentração diretamente ou através da turbidez. Os medidores ultrassônicos e nucleares obtêm somente a concentração de sedimentos, já aqueles a laser determinam a concentração e a granulometria. Os fotoelétricos ou óticos eletrônicos determinam a concentração pela turbidez da água. O método de Delft determina o volume de sedimento pela colocação da amostra em uma proveta graduada. O medidor ultrassônico Doppler, que foi utilizado neste trabalho, afere a concentração e a velocidade dos sedimentos indiretamente pela medição frequência e pela intensidade dos sinais acústicos que são refletidos pelo sedimento (CARVALHO, 2008).

A medição indireta de concentração é feita também com uso de equipamentos que coletam uma amostra para análise em laboratório. Os coletores mais utilizados são os da série norte-americana de amostradores de sedimentos em suspensão. O amostrador Neyrpic coleta a amostra por integração vertical ou pontual; já o múltiplo OTT que coleta amostras pontuais ou por integração a diversas

alturas usando vários recipientes plásticos num só equipamento; os amostradores de bombeamento nos sistemas de peso acumulativo e amostras individuais (CARVALHO, 2008).

Neste trabalho, utilizou-se o Medidor Ultrassônico por Efeito Doppler chamado de ADCP/ADP (*Acoustic Doppler Current Profiler/ Acoustic Doppler Profile*), conhecido mundialmente por efetuar medições de vazões e velocidades de correntes em rios e oceanos. O medidor citado também é capaz de medir profundidades, mapeando o relevo subaquático. Apesar de pouco utilizado em medições de sedimentos em suspensão, o mesmo tem sido testado para tal com resultados promissores (GAMARO, 2012), pois economiza tempo nas medições e tem boa precisão, no entanto, necessita de calibração para correlacionar a intensidade do sinal acústico com as características dos sedimentos na água. Com essa motivação, o trabalho contribuiu com a utilização de um novo método de medição de sedimentos em suspensão de rios, demonstrando como vantagens a redução dos custos de levantamentos de campo e maior rapidez nas medições.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Verificar a aplicabilidade da utilização de perfiladores acústicos de correntes por efeito Doppler para medições de sedimentos em suspensão.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar medições simultaneamente com amostrador pontual e o perfilador para obtenção de dados de concentração de sedimentos e dados acústicos;
- Obter equação para a região de estudo, correlacionando o sinal acústico com a concentração de sedimentos;
- Calibrar a equação de correlação de intensidade do sinal com a concentração de sedimentos em suspensão;
- Estimar a concentração de sedimento em suspensão a partir dos dados de retroespalhamento do ADCP.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresentamos uma breve revisão da literatura englobando assuntos importantes relacionados ao trabalho desenvolvido. São também relatados alguns métodos já utilizados para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão de rios.

### 2.1 ESTADO DA ARTE

Uma das primeiras tentativas de usar a intensidade de retorno do eco de um perfilador para estimar a concentração de sedimentos em suspensão foi publicada por Reichel e Nachtnebel (1994), que estudaram as vantagens e limitações do uso para monitoramento de sedimentos em suspensão. Suas pesquisas foram realizadas na parte austríaca do rio Danúbio, que apresentava dois grandes problemas: o acúmulo de sedimentos nos reservatórios das hidrelétricas da região e a erosão do leito do rio. Os pesquisadores utilizaram um modelo baseado no método “Rayleigh Scattering” (URICK, 1975) para estimar as concentrações através dos dados de retroespalhamento obtidos nas medições.

As vantagens encontradas demonstram, quando comparado com os métodos convencionais, o perfilador teve maior agilidade nas medições e apresentou melhores valores médios de concentração quando comparado com medições de grandes volumes. No entanto, o perfilador utilizado apresentou limitações nas medições por ter somente uma frequência, que gerou dados poucos representativos das concentrações de sedimentos e dos tamanhos das partículas.

Holidaway *et al.* (1999) compararam o perfilador com os medidores óticos na obtenção das concentrações de sedimentos em suspensão. Utilizaram dados de medições feitas no rio Mersey, no Reino Unido, que originalmente foram usados para aferir qualidade da água, mas como os dados de retroespalhamento foram gravados, o estudo também propôs avaliar a precisão do perfilador de 1 MHz para estimar a concentração de sedimentos em suspensão. Assim, utilizaram um método baseado nas equações da acústica subaquática e para calibração empregaram os valores obtidos através de amostras coletadas. Demonstraram que, com uma boa calibração, o perfilador pode ser utilizado para medir diretamente os sedimentos em suspensão.

Wang *et al.* (2000) utilizaram um perfilador acoplado a um barco em movimento para medir as concentrações de sedimentos em suspensão na entrada da Baía Jiaozhou, na península de Shandong localizada no nordeste da China. Foram coletadas amostras de água junto com a medição do perfilador, obtendo as concentrações por método de filtração. Em seguida, para obter a granulometria, foi utilizado um granulômetro a laser. As concentrações obtidas foram correlacionadas com o retorno do sinal do sensor ótico backscatter (OBS) para estimar as concentrações a partir das medições do perfilador. Com os resultados, os pesquisadores obtiveram uma correlação entre a intensidade do sinal e a concentração de sedimentos em suspensão (CSS), com nível de confiança de 99,9%, com um  $R^2$  de 0,62. Os erros relativos das concentrações calculadas foram da ordem de 30% para CSS, menores que 40 mg/L e semelhante à precisão dos medidores a laser. Sendo assim, constataram que o uso do perfilador é viável para medir CSS.

Gartner *et al.* (2004) utilizaram um sensor ótico backscatter (OBS) para comparar a CSS a partir de medições utilizando um perfilador na Baía de San Francisco, na Califórnia. Os autores observaram uma boa concordância entre os dois métodos, no entanto, os resultados apresentaram uma pequena diferença das concentrações próximas ao fundo do rio. No estudo, eles também descrevem a dependência da intensidade do retroespalhamento do eco e do tamanho de partículas, afirmando que o método requer uma distribuição de tamanho razoavelmente constante de material em suspensão. Os autores observaram ainda que os erros associados às calibrações OBS podem afetar a precisão das estimativas acústicas devido ao acúmulo de erros.

Hoitink *et al.* (2005) avaliaram a concentração de sedimentos utilizando um perfilador de 1.2 MHz, que foi calibrado com dados de um OBS, na Baía de Banten, na Indonésia. As amostras de água foram coletadas para calibração do sensor ótico e as medições simultâneas foram realizadas por meio de um perfilador e um sensor OBS que foi calibrado *in loco*, sendo estes usados para analisar a dinâmica de sedimentos em suspensão em cinco locais da Baía. Esse estudo demonstrou diferenças acentuadas em relação à concentração estimada pela retrodifusão acústica, que pode ter sido ocasionada pela variação dos tamanhos das partículas e pela formação de flocos ou agregações das partículas em suspensão.

Kostaschuk *et al.* (2005) utilizaram um perfilador acústico com transdutores de 500 kHz e 1500kHz para estudar a velocidade do escoamento e transporte de sedimentos no estuário Fraser e no lago Lillooet, no oeste do Canadá. Além das medições de velocidade convencionais, os dados foram utilizados para examinar carga de sedimentos em suspensão. Os autores apontaram a necessidade de mais pesquisas para verificar a viabilidade do método em estudos detalhados de fluxos de sedimentos. Para a estimativa de concentrações de sedimentos em suspensão, amostras coletadas por meio de bombeamento foram comparadas com dados de retroespalhamento do perfilador, mostrando uma boa correlação.

Dinehart e Burau (2005) utilizaram um perfilador para mapear velocidades e sedimentos em suspensão em um estuário com influencia de maré. As campanhas foram realizadas no Rio Sacramento, próximo à entrada do canal Delta Cross, na Califórnia. Os levantamentos foram realizados em vários ciclos de maré, no outono de 2000 e de 2001, com o aparelho acoplado à embarcação. As velocidades foram registradas a cada 27 minutos, em um ciclo de maré diurna. O perfilador também foi utilizado para obter a batimetria e o retroespalhamento acústico para obtenção das concentrações de sedimentos em suspensão. Os resultados demonstraram que o perfilador pode simplificar os cálculos para obtenção do fluxo de descarga de sedimentos em campo.

Merckelbach e Ridderinkhof (2006) realizaram medições no norte da Holanda com um perfilador embarcado. Foram registradas 32 secções de 1998 a 2005, armazenando as velocidades e a intensidade do eco, que pode ser comparado com os sedimentos em suspensão. Os autores propuseram verificar se o modelo de dispersão de Thorne e Hanes (2002) prevê satisfatoriamente valores de CSS com correntes acima de 0,7 m/s, mas os resultados mostraram o contrário. Em períodos de maré, em certas profundidades e com velocidades de até 0,7 m/s, o modelo reproduziu bem as concentrações, porém acima dessa velocidade, o modelo superestima as concentrações. Contudo, a estimativa de CSS com o perfilador apresentou bons resultados em profundidade de 10 a 20 metros.

Xiufang *et al.* (2009) investigaram o uso do perfilador para estimar a concentração de sedimento em suspensão na Costa de Beibu na China. Esse estudo utilizou a intensidade do sinal de retroespalhamento acústico para estimar as

concentrações, calibrando com um *OBS*. O método utilizado foi baseado na equação do sonar, que considera a dispersão do som nas menores partículas. Os resultados obtidos mostraram que houve uma boa correlação entre a *CSS* e a intensidade da retrodispersão, que demonstrou um valor de 0,74 para o coeficiente de correlação e 22,4% para o erro relativo médio. O estudo também analisou a variação do tamanho da partícula durante os períodos de medição e, com isso, conseguiu excluir a influência dessa variação nos resultados. Depois dessa análise, o coeficiente de correlação aumentou para 0,81 e o erro diminuiu para 18,9%. Nesse caso, foi constatado que o perfilador satisfaz as exigências para estimar a *CSS*, pois os erros encontram-se entre 20% a 50%, sendo admissíveis em análise dinâmica das partículas em suspensão.

Ávila *et al.* (2014) estimaram a concentração de material particulado em suspensão com um perfilador de 1,5 MHz na área da Lagoa dos Patos, na região sul do Brasil. Os resultados apresentaram uma boa correlação dos dados obtidos por amostragem e dos estimados pelo método baseado na equação do sonar, que relaciona o eco acústico e a concentração de sedimentos em suspensão. A calibração das equações foi realizada a partir de amostras pontuais. O estudo apresentou uma conversão satisfatória do eco acústico para a área de estudo. Ávila *et al.* (2014) e Guerrero *et al.* (2011) ressaltaram, ainda, a importância do uso de um instrumento de retroespalhamento ótico na calibração para a geração de perfis da *CSS*. Esses autores também ressaltaram a importância da correta associação dos níveis de coleta de água com as células geradas na medição com o ADCP. Essa correspondência das profundidades é de suma importância para uma calibração confiável. Uma tarefa muito difícil nas medições de campo, devidos às intempéries, ondas, correntes fortes, lastros leves.

Anastasiou *et al.* (2015) estudaram a utilização dos métodos acústicos combinados com sensores óticos para a determinação de material particulado em suspensão (*MPS*). As medições foram realizadas no Rio Nestos, no norte da Grécia. O perfilador foi fundeado, ou seja, afixado no fundo do rio. Também foram coletadas amostras de água simultaneamente as medições para calibração do *OBS* utilizado. Os resultados mostraram que as medições indiretas com o perfilador e as de *MPS* foram quase idênticas para valores médios de concentração, mas existem

discrepâncias significativas quando são realizadas medições nos períodos entres as estações do verão e inverno.

## 2.2 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM CAMPO

O transporte de sedimentos suspensos é uma das áreas abrangidas pela sedimentologia. A partícula derivada da rocha passa pelos processos de erosão, deslocamento, transporte do sedimento, deposição e compactação. Esse transporte de sedimentos se processa nos cursos d'água, sendo que a maior quantidade ocorre na época chuvosa (CARVALHO, 2008).

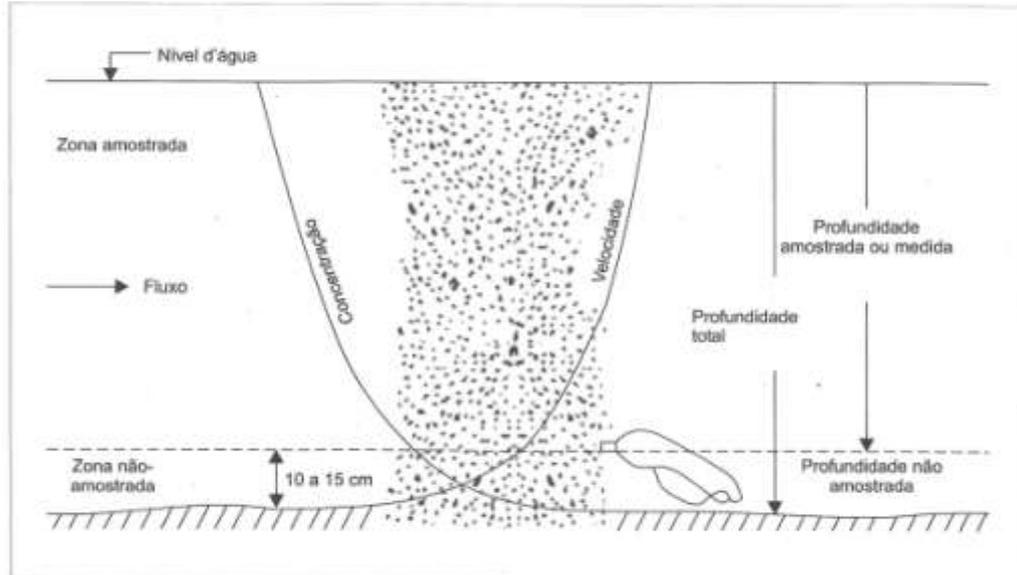
As metodologias para caracterizar o transporte de sedimentos suspensos nas águas de forma tradicional, através de uma coleta rotineira e análise subsequente de amostras de água, estão bem estabelecidas. Mas há uma tendência de que os métodos tradicionais sejam substituídos por outros métodos que oferecem maior precisão, menor custo e possibilitem registros contínuos e seguros para obtenção de dados para a quantificação das concentrações dos sedimentos.

Algumas das técnicas utilizadas para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão serão apresentadas a seguir, destacando a tecnologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, o Efeito Doppler, que utiliza um equipamento de retroespalhamento acústico. Os métodos descritos a seguir foram baseados em (CARVALHO, 2008).

### 2.2.1 Amostragem Mecânica

A forma mais simples de obtenção da concentração de sedimentos em suspensão é a amostragem mecânica, na qual se realiza a extração de amostras de água através do mergulho de frascos, geralmente garrafas graduadas, sendo que a escolha adequada do equipamento de amostragem é de suma importância. Para isso, é necessário conhecer as profundidades e velocidades do curso d'água para que seja feita a seleção do amostrador.

A definição da técnica de obtenção das amostras também é indispensável, pois deve representar o material quanto à concentração e a sua granulometria. Os amostradores não devem alcançar o leito para não coletar sedimento de fundo, por isso, as medições ocorrem, geralmente, entre 9 a 15 cm acima do fundo (Figura 1). Porém, dependendo das características físicas do amostrador, haverá uma profundidade não amostrada, medida desde o bico até a parte inferior do aparelho.



**Figura 1** - Zonas de amostragens, medida e não medida, numa vertical de amostragem da corrente com relação à velocidade de fluxo e concentração de sedimento.

Fonte: CARVALHO, 2008.

As amostragens de sedimentos em suspensão podem ser feitas por diversos métodos mecânicos, como instantânea ou por integração, dependente do tipo de equipamento disponível. Também podem ser chamados de métodos pontuais ou por integração na vertical.

### 2.2.1.1 Método de amostragem pontual (MAP)

O método pontual instantâneo é quando a coleta da amostra no recipiente é feita instantaneamente ou em pouquíssimos segundos (menos de 10). Já no método pontual por integração, a admissão é feita com tempo maior que 10 segundos, com cálculo baseado na velocidade da água. A amostragem pontual é usada comumente para definir a distribuição vertical da concentração de sedimentos e a granulometria na posição de coleta. Também é usada para representar a concentração da seção quando se tem um coeficiente de correção obtido de medições completas anteriores.

Esse tipo de amostragem é feita em posições determinadas da seção transversal, podendo representar todo o sedimento contido no fluxo d'água passado na seção. As amostragens do tipo pontual, numa vertical, mais comuns são:

- Uma única amostra à superfície;
- Uma única amostra a 0,6 da profundidade;
- Uma única amostra em posição previamente estudada;

- Duas amostras, uma perto da superfície e outra próxima ao fundo. Consideradas como de pesos iguais (20 e 80% da profundidade);
- Três amostras, tomadas próxima à superfície, no meio da profundidade e outra próxima ao fundo, com pesos iguais (20%, 60% e 80% da profundidade);
- Três amostras, uma próxima à superfície, uma no meio da profundidade e outra próxima ao fundo, dando peso dois àquela do meio (20%, 2x60% e 80% da profundidade);
- Amostras tomadas em vários pontos para estabelecer a distribuição vertical com necessária precisão (20%, 40%, 60% e 80% da profundidade);
- Amostras tomadas em pontos definidos com correções baseadas em conhecimentos prévios;
- Método de Straub com amostragens a 0,2 e a 0,8 da profundidade;
- Método de Luby com amostragens nos centros de área de igual descarga nas diversas verticais; a área descrita pela curva de velocidades é então dividida em partes iguais e os amostradores são locados nos centros destas.
- Método de B.C. Colby que recomenda dividir a profundidade da vertical em iguais porções, sendo as amostra feitas nos centros destas; usando-se pontos a 1/10, 3/10, 5/10, 7/10 e 9/10 da profundidade. As concentrações são consideradas de acordo com as velocidades em cada posição amostrada; a curva de distribuição de velocidade pode ser obtida antes ou depois da amostragem; se é desejada uma amostra composta para a vertical, todas as amostras devem ser tomadas com o mesmo tempo (CARVALHO, 2008).

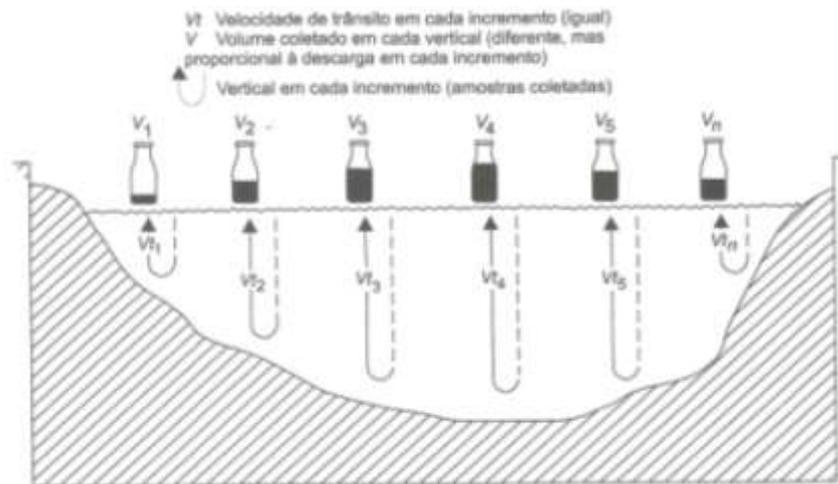
#### **2.2.1.2 Método de amostragem por integração na vertical**

A amostragem por integração na vertical é efetuada em maior tempo, sendo realizada em dois sentidos: ascendente e descendente, excepcionalmente, a amostragem pode ser feita em um só sentido. O amostrador é descido até o fundo do rio em uma velocidade constante e, aproximadamente na mesma velocidade, é erguido de volta até a superfície (CARVALHO, 2008).

Essa técnica depende da velocidade do rio, que define a velocidade do amostrador através da coluna da água. Esse processo de integração da profundidade é utilizado nos principais métodos de medição, o método de igual incremento de largura (IIL) e o método de igual incremento de descarga (IID). Os

dois métodos possuem uma vantagem quando aplicados corretamente, pois permitem a junção das várias amostras, originando uma única análise no laboratório. No entanto, ambos precisam do conhecimento prévio das velocidades na vertical, sendo que o IID precisa também do conhecimento da distribuição da vazão na seção (CARVALHO, 2008).

Na amostragem com uso do método igual incremento de largura (IIL), a seção transversal é dividida em uma série de segmentos de igual largura. Logo, obtém-se uma série de subamostras, sendo as velocidades de trânsito em cada vertical a mesma usada nas outras verticais (Figura 2). Utilizando o mesmo bico no amostrador, essas subamostras serão compostas de volumes diferentes. Tal procedimento fornece em cada vertical uma subamostra com um volume proporcional à vazão da zona amostrada. As diversas subamostras podem ser reunidas em uma só e levadas para o laboratório com intuito de realizar a análise de concentração de sedimentos.

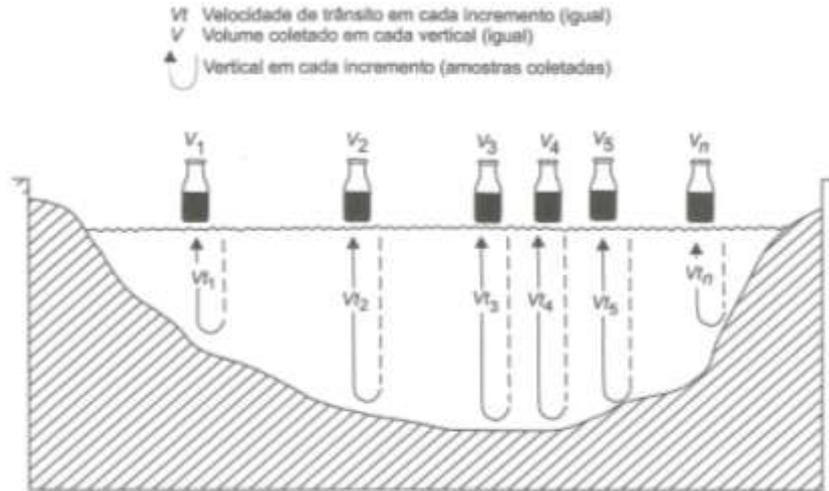


**Figura 2** - Amostragens pelo método de igual incremento de largura.

**Fonte:** Carvalho, 2008.

O método de amostragem por igual incremento de descarga (IID) exige o conhecimento prévio da distribuição da velocidade nas verticais e da distribuição da vazão na seção transversal. Esse método consiste em dividir a seção em uma série de subseções nas quais há a mesma porção de vazão. As coletas das amostras são feitas por integração na vertical de forma que divida essas subseções em duas partes iguais de vazão. Como cada amostra representa uma parte igual de vazão (Figura 3), o volume amostrado também deverá ser igual, ajustando-se a velocidade de trânsito em cada vertical para que isso ocorra. Como o outro método, as

amostras poderão ser misturadas no laboratório para originar uma única análise de concentração média da seção. Caso as amostras individuais não tenham o mesmo volume será necessário analisá-las individualmente (DORNELLES, 2009).



**Figura 3** - Amostragem pelo método de igual incremento de descarga.

**Fonte:** (Carvalho, 2008).

O número de verticais vai depender da largura da seção, da quantidade de sedimentos transportados pelo rio, dos métodos de análise e das exigências do laboratório. No entanto, como no processo por IID se obtém maior volume de amostra por vertical devido ao quase enchimento de cada garrafa, essas quantidades de verticais podem ser menores que no método por IIL. A Organização Mundial de Meteorologia (OMM, 1981) sugere que sejam coletadas amostras de 5 a 15 verticais, de acordo com a largura do rio e as necessidades do laboratório (CARVALHO, 2008).

A amostragem mecânica é uma técnica confiável, bem documentada e amplamente usada. Os amostradores pontuais e por integração da profundidade permitem que quase toda a profundidade do rio seja amostrada. As amostras mecânicas são, geralmente, consideradas como padrão em comparação com os outros tipos de medição de sedimentos em suspensão.

### 2.2.2 Métodos Óticos

Podemos medir a quantidade de material suspenso na água usando métodos óticos. Os instrumentos óticos são divididos em três tipos: os que utilizam a atenuação, a transmitância ou o espalhamento da luz. Quando a fonte ótica é mostrada diretamente no sensor, o instrumento mede a transmissão da luz, que é

uma propriedade ótica inerente. No caso do espalhamento, o sensor mede a luz dispersada pelas partículas suspensas. Ambos são funções do índice de refração, do tamanho e da forma das partículas suspensas (DORNELLES, 2009).

Também existem os medidores ótico-eletrônicos de turbidez, que determinam a concentração de sedimentos diretamente baseado no efeito fotoelétrico, ou seja, é a emissão de radiação eletromagnética, no caso a luz, em uma frequência suficientemente alta, que gera um arrancamento de elétrons que podem ser medidos. O método é usado para concentrações baixas a médias, sendo o limite superior de aplicação de 1 a 5g/L (CARVALHO, 2008).

O método ótico, por não estar medindo a concentração diretamente, necessita da calibração em laboratório e por medições convencionais, sendo as últimas realizadas periodicamente em cada rio e seção. Esse método também pode fazer registro contínuo, instalando os equipamentos numa posição adequada para medição pontual constante. O método apresenta a desvantagem de sofrer ações biológicas devido à permanência do equipamento na água (CARVALHO, 2008).

### **2.2.3 Medição com equipamentos nucleares**

As medições com equipamentos nucleares são feitas quando há a necessidade de medir grande quantidade de sedimentos em suspensão. Esses equipamentos efetuam testes que variam de 0,5 até 1000 g/L. A concentração de sedimentos é determinada utilizando radioisótopos, também conhecidos como traçadores radioativos. Em geral, baseiam-se na absorção ou difusão de radiações eletromagnéticas pela matéria, medindo a densidade do sedimento na mistura água/sedimento (CARVALHO, 2008).

Tal método necessita de calibrações pela comparação de medições por métodos tradicionais de amostragem efetuadas periodicamente nos mesmos locais, garantindo a precisão e a confiabilidade. No Brasil, o Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, da NUCLEBRÁS, tem feito medições com sucesso a partir dos equipamentos que desenvolve.

### **2.2.4 Imagem Digital Foto-Ótica**

O método de imagem digital foto-ótica foi originalmente utilizado pra medir características do sangue. Posteriormente, essa tecnologia foi adaptada para a

determinação em campo do tamanho e da forma dos sedimentos suspensos (GOODING, 2001). A Universidade de São Paulo (USP) desenvolveu um protótipo de sistema de foto digital que emprega lente, cabo de fibra ótica, célula de fluxo projetada especialmente, câmera acoplada a um computador e um sistema capaz de obter a imagem bidimensional de partículas suspensas.

Este método foi projetado para uso em laboratório, mas agora, com novas tecnologias, pretende-se aplicá-lo em campo. Uma grande vantagem que esses sistemas apresentam é que não requerem quase nenhuma calibração e podem finalmente substituir técnicas visuais de acumulação do tubo e da pipetagem em laboratório para a análise de distribuições de tamanho de partículas (DORNELLES, 2009).

#### **2.2.5 Método a laser**

Este método está disponível para utilização em laboratório e medições em campo, no qual é aplicada a difração a laser para determinar a distribuição do tamanho do material em suspensão e da concentração. Há também equipamentos que se baseiam na mesma tecnologia, medindo a velocidade de queda de partículas e laboratório portátil para análise da concentração e da granulometria (CARVALHO, 2008).

Equipamentos a laser podem ser usados para determinar a concentração do volume ou a concentração dos sólidos suspensos, se a densidade da partícula for conhecida ou puder ser confiavelmente medida. Ao contrário dos espalhadores óticos de frequência única, os instrumentos de difração a laser não são sujeitos às imprecisões associadas com as mudanças no tamanho das partículas do material suspenso. Entretanto, como em todos os tipos de instrumentos óticos de campo, os agentes biológicos podem alterar as medidas (SANTOS, *et al.*, 2001).

#### **2.2.6 Reflectância espectral**

Esta técnica está baseada na relação entre a quantidade de radiação, geralmente na faixa do visível ou infravermelho, refletida por uma porção d'água. A radiação é medida por um dispositivo que trabalha com espectrômetros, que pode ser portátil ou instalado em uma aeronave ou satélite. O tamanho da área medida é muito maior que dos outros métodos já citados, variando de m<sup>2</sup> a km<sup>2</sup>. Tal medida é mais adequada para ambientes marinhos ou situações onde variações de

concentração ocorram em grandes áreas de interesse que, por isso, devam ser observadas (BARBOSA, 2005).

### **2.2.7 Pressão Diferencial**

A técnica de pressão diferencial emprega transdutores de pressão duplos para inferir a concentração dos sólidos suspensos a partir da densidade do escoamento do sedimento na água (DORNELLES, 2009). Um transdutor por pressão diferencial é usado para determinar o peso específico de um tipo de sedimento em relação à água, após isso, compara-se com uma amostra próxima à superfície, que tenha uma baixa concentração de sedimentos. Essa diferença de pressão pode ser usada para determinar a CSS entre dois pontos.

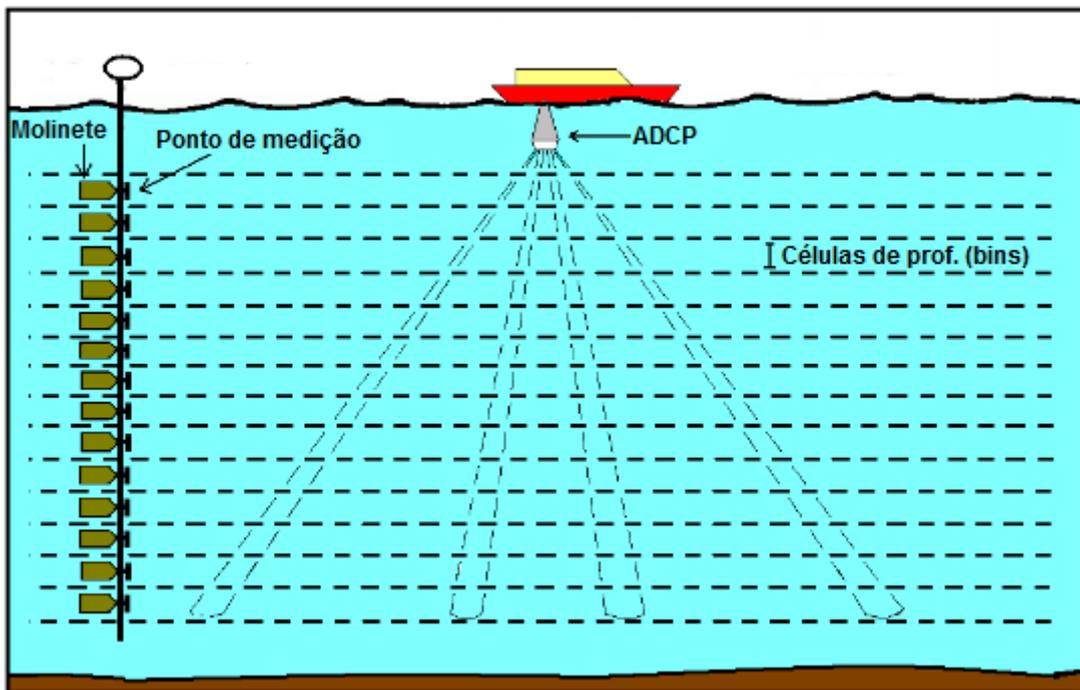
O tamanho do volume medido dependerá da diferença de pressão existente entre o transdutor diferencial, enquanto o alcance de concentração depende da sensibilidade desse transdutor. Mudanças no gradiente de temperatura, turbulências e concentração de sólidos dissolvidos podem afetar as essas medições (LEWIS & RASMUSSEN, 1999).

### **2.2.8 Medidores Acústicos de Correntes por Efeito Doppler**

Este método utiliza o princípio físico Doppler, descoberto pelo austríaco Christian Johann Doppler, no ano de 1842, que transmite pulsos sonoros de frequência fixa e escutando o eco que retorna das partículas em suspensão. Os aparelhos que utilizam ondas acústicas por efeito Doppler na hidrometria ficaram conhecidos como ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*), nome dado pelo fabricante que começou a comercialização. Neste trabalho, a sigla ADCP fará referência à tecnologia Doppler de medição de vazão, podendo ser aplicados para equipamentos da *RD Instruments* RDI (ADCP), quanto para *Sontek* (ADP).

Originalmente, esse equipamento foi desenvolvido para medir correntes marinhas e, posteriormente, começou a ser utilizado para medições de vazão em seções transversais de cursos d'água, através de velocidades das partículas nas correntes de água em sucessivos perfis de profundidade medidos pelo instrumento. No entanto, outras aplicações têm sido desenvolvidas como é o caso da caracterização de transporte de sedimentos (GAMARO, 2012).

Uma grande vantagem da utilização do ADCP é a rapidez na medição da velocidade da água, uma vez que esse equipamento pode medir vários pontos em uma seção transversal, diferentemente de instrumentos convencionais, como molinetes (Figura 4). O ADCP pode conectar-se a computadores e assim transferir os dados das medições em tempo real. O método acústico não sofre ação de agentes biológicos, porém, apresenta como desvantagem, o elevado custo do aparelho (DORNELLES, 2009).



**Figura 4** - Células de profundidade medidas com ADCP comparando com a medição com molinetes.

**Fonte:** Adaptado DORNELLES, 2009.

No Brasil, as medições com o ADCP se iniciaram em 1992 com a *RD Instruments*, que trouxe um aparelho para demonstração, realizando medições no rio Paraíba do Sul, perto da cidade de Volta Redonda (RJ), e no rio Solimões, na cidade de Manacapuru (MA). No ano seguinte, foi feita uma nova apresentação, agora na usina de Itaipu, com a presença de técnicos de várias empresas da América do Sul. Em 1994, o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (atual Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel) comprou um aparelho em parceria com o IRD (*Institut de Recherche Pour Le Développement*) da França, para uso no projeto HiBAm (Hidrologia da Bacia Amazônica). Assim, iniciaram-se os estudos e o monitoramento com este equipamento no país (GAMARO, 2012).

Os ADCPs são classificados de acordo com o tipo de instalação que podem ser: dinâmicos - instalados em barcos, catamarãs, trimarãs, caiaques ou até operados manualmente; estáticos - instalados nas margens do rio, em boias ou no fundo do rio. Também podem ser classificados de acordo com a frequência, de 150 kHz a 5,0 MHz, que varia de um rio para o outro. Atualmente, já existem aparelhos de multifrequência.

#### **2.2.8.1 Princípio Físico do funcionamento do ADCP**

O princípio do funcionamento do ADCP é o Efeito Doppler, que é uma mudança na frequência do som devido ao movimento relativo entre a fonte emissora e o observador. A frequência do som emitido por um objeto em movimento para um observador parado aumenta quando o objeto se aproxima dele e diminui quando o objeto se afasta (GAMARO, 2012).

O efeito Doppler acontece não só com ondas sonoras, mas também com as eletromagnéticas, incluindo micro-ondas, ondas de rádio e a luz visível. A polícia usa o efeito Doppler com micro-ondas para determinar a velocidade de carros, os astrônomos usam o efeito Doppler com luz visível para determinar as velocidades de várias estrelas e galáxias em relação à Terra (HALLIDAY *et al.* 2004). Na discussão que segue, vamos nos restringir ao efeito Doppler em ondas sonoras utilizado no ADCP.

O Efeito Doppler é uma mudança na frequência do som devido ao movimento relativo entre a fonte emissora do som e o observador. A frequência do som emitido por um objeto em movimento, para um observador parado, parece aumentar quando o objeto se aproxima dele e diminui quando o objeto se afasta (DORNELLES, 2009). O Efeito Doppler é usado para distinção entre objetos parados e objetos em movimento e para fornecer informação sobre a velocidade destes objetos, através da medição da diferença de frequência entre o som emitido por uma fonte e o som percebido por um observador (receptor). O Efeito Doppler leva em consideração a frequência do som quando tudo está parado, a velocidade relativa entre a fonte e o receptor das ondas acústicas, e a velocidade do som. Ele depende somente do movimento radial entre a fonte e o receptor, ou seja, do movimento de aproximação ou afastamento entre eles (RDI, 2011).

Calcula-se o efeito Doppler de acordo com a situação da fonte emissora, do detector ou do tipo de onda. Temos uma formulação para quando a fonte é estacionária, uma quando a fonte está em movimento e outra para baixas velocidades. Matematicamente, o efeito Doppler é deduzido da Equação 1 a partir do cálculo do comprimento da onda.

$$\lambda_r = v \cdot T \quad (1)$$

Em que:

- $\lambda_r$  = Comprimento da onda real;
- $v$  = velocidade;
- $T$  = período.

Quando a fonte se desloca e considerando o observador em repouso tem-se:

$$\lambda_d = v \cdot T - v f \cdot T \quad (2)$$

$$\lambda_d = (v - v f) \cdot T \quad (3)$$

Em que:

- $\lambda_d$  = Comprimento da onda aparente;
- $v$  = velocidade de propagação da onda;
- $v f$  = velocidade da fonte.

Agora, inserindo a Equação 3 na Equação 4, chamando de  $F_r$  frequência real emitida pela fonte e a  $F_d$  de frequência aparente que será recebida pelo observador, tem-se:

$$F_d = \frac{v}{\lambda_d} \quad (4)$$

$$F_d = \frac{v}{(v - v f) \cdot T} \quad (5)$$

$$\text{Logo: } F_d = F_r \frac{v}{v \pm v f} \quad (6)$$

Se o observador estiver em movimento e a fonte em repouso, tem-se:

$$F_d = \frac{(v \pm v_o)}{v} \quad (7)$$

Na qual:

-  $v_o$  = velocidade do observador.

Generalizando, tem-se a equação do efeito Doppler (Equação 7).

$$F_d = F_r \frac{(v \pm v_o)}{(v \pm v_f)} \quad (8)$$

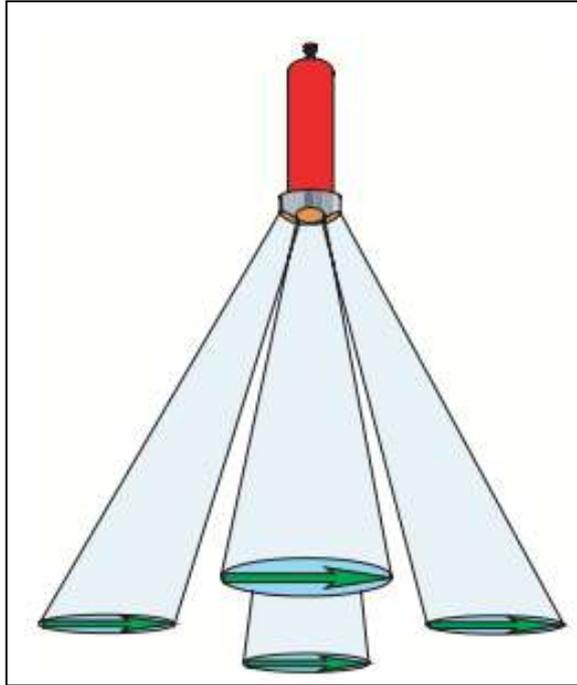
O efeito Doppler para um detector em movimento e uma fonte em movimento é diferente, mesmo quando o detector e a fonte se movem com a mesma velocidade. No entanto, se as velocidades são suficientemente baixas, isto é, se  $v_o \ll v$  e  $v_f \ll v$ , as variações de frequência causadas pelos dois movimentos são essencialmente as mesmas. Segundo Halliday et al. (2004) a equação 8 pode ser simplificada na Equação 9.

$$F_d = F_r \left(1 \pm \frac{V}{c}\right) \quad (9)$$

Na qual:

- $F_d$  = Diferença de frequência (Hz);
- $F_r$  = Frequência transmitida de uma fonte (Hz);
- $V$  = Velocidade relativa entre a fonte e o objeto (m/s); ( $V = V_f \pm V_i$ );
- $c$  = Velocidade do som (m/s).

O ADCP é constituído por sensores (transdutores) que, alternadamente, assumem as funções de emissor e receptor de pulsos sonoros. Ao emitir uma onda sonora, os pulsos acústicos percorrem a coluna d'água, subsequentemente, formando ondas sonoras (Figura 5). As partículas de sedimentos transportadas pela corrente de água, sujeitas aos feixes sonoros, refletem os pulsos que retornam para o aparelho. O aparelho recebe e registra essa frequência modificada pelo movimento das partículas, chamado de eco, retroespalhamento ou Acoustic Backscatter (ABS) (SCHUCK, 2013).

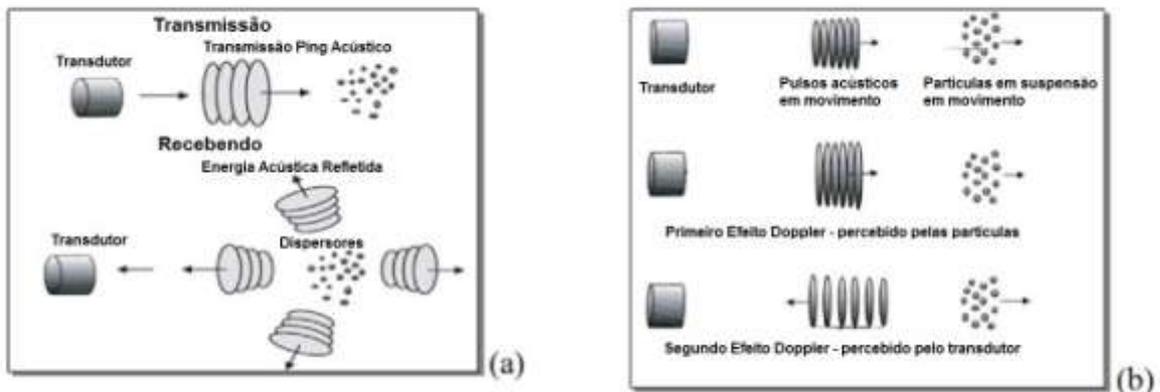


**Figura 5** - Feixes do ADCP medindo uma camada Homogênea.

**Fonte:** SIMPISON, 2001.

Os perfiladores acústicos, no caso dos ADCPs, têm um sinal sonoro emitido pelo aparelho e refletido pelas partículas em suspensão que existem na água, movimentadas pela corrente, que permitem medir a velocidade existente, e gerar um somatório de verticais, formando o perfil transversal da seção. A diferença entre a frequência do sinal refletido por esses alvos em movimento é proporcional à velocidade dos alvos e, portanto, a velocidade da própria corrente (SCHUCK, 2013).

O eco acústico das frequências refletidas pelas partículas para transdutor é considerado fraco e a maior parte é absorvida ou refletida em outras direções. Na Figura 6-a, a imagem mostra o espalhamento da frequência e o retorno acústico para o registro no transdutor, enquanto que na Figura 6-b tem-se a descrição do Efeito Doppler, sem as perdas de frequências. Apenas parte do eco refletido é registrada pelo instrumento (SCHUCK, 2013).



**Figura 6** - Detalhamento do efeito Doppler: (a) dispersão do eco causado pelas partículas em suspensão. (b) Mudança na frequência de um pulso emitido pelo ADCP.

**Fonte:** Adaptada de (SIMPISON, 2001).

A Equação 10 descreve os componentes para o cálculo da diferença de frequência. Como há mudança na frequência entre o transdutor e a partícula, e da partícula para o transdutor, a Equação 9 torna-se Equação 10 (SONTEK,2000).

$$F_d = 2F_s \frac{V}{c} \quad (10)$$

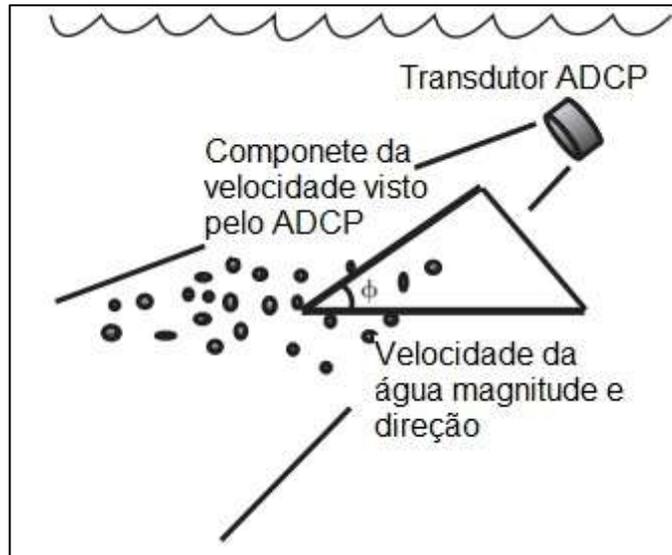
Sendo:

- $F_d$  = Mudança na frequência recebida;
- $F_s$  = Frequência do som transmitido;
- $V$  = Velocidade Relativa das partículas;
- $c$  = Velocidade do Som.

Na prática, a partícula geralmente não está exatamente na direção de propagação do pulso sonoro, mas sim formando um ângulo  $\theta$  com este (DORNELLES, 2009). Nesse caso, deve-se considerar apenas a componente da velocidade da partícula que está na direção do transdutor para o cálculo do desvio de frequência. Assim, a Equação 10 se modifica para Equação 11.

$$F_d = 2F_s \frac{V}{c} \cos \theta \quad (11)$$

Em que  $\theta$  é o menor ângulo formado entre a direção do feixe do pulso acústico e a direção horizontal (Figura 7).



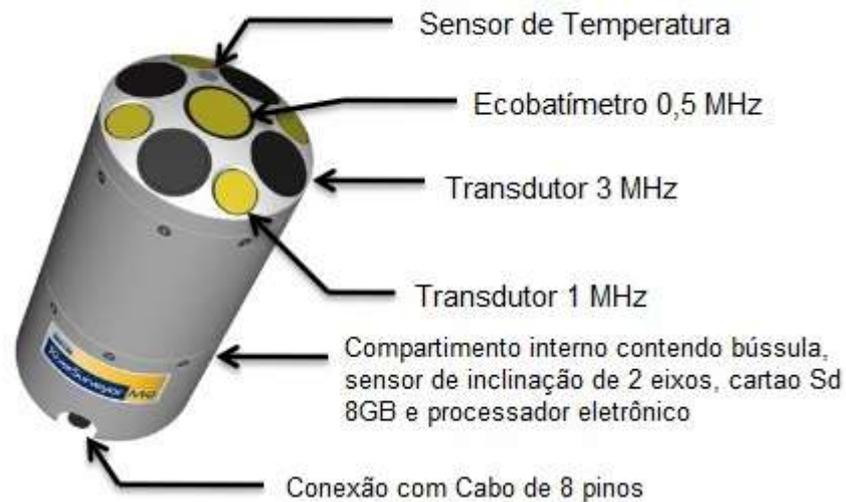
**Figura 7** - Ângulo formado com a vertical.

**Fonte:** Adaptada de SIMPISON, 2001.

A partir do momento que o aparelho começa a processar os sinais acústicos de retorno das partículas em suspensão, a coluna de água é dividida em segmentos na vertical, denominados *bins* ou células de profundidade. O equipamento determina a velocidade e a direção de cada célula de profundidade, cuja altura é determinada pelo operador, em determinados modelos de ADCP, essa altura é determinada pelo próprio aparelho.

Já a largura de cada célula é determinada em função da velocidade do barco e do processamento dos pulsos. O cálculo da vazão é feito a partir da área e da velocidade das partículas em cada célula, logo, a vazão da seção do rio é obtida através da integração das vazões de cada célula de profundidade em toda a seção medida (DORNELLES, 2009).

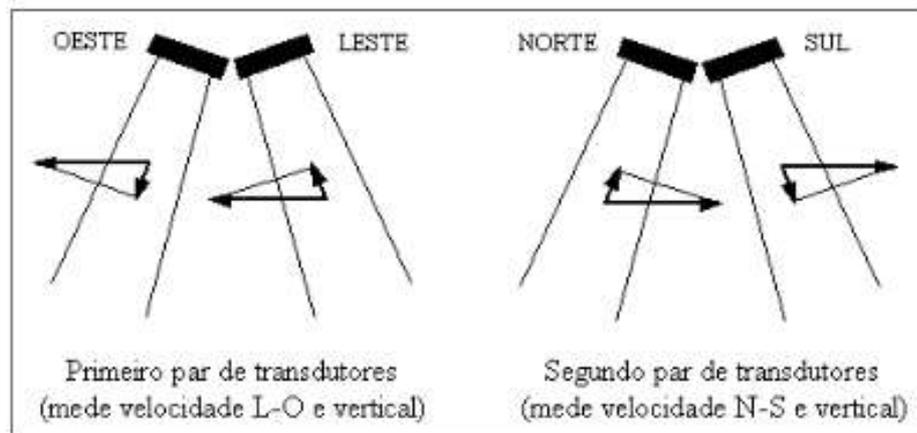
Os ADCPs utilizam a transmissão de feixes acústicos na coluna de água por 3 ou 4 transdutores, dependendo do modelo, sendo direcionais e inclinados em 20 ou 25 graus da vertical (Figura 8). Esses aparelhos medem, através de uma série rápida e contínua, a estimativa da velocidade de cada célula de uma coluna de água segundo a direção em que são emitidos os pulsos acústicos. Os dados determinados em cada célula são os componentes da velocidade nas direções x, y e z, que são agrupados em verticais e gravados instantaneamente no aparelho, depois são transmitidos para o computador para análise em um software fornecido pelo fabricante do aparelho (DORNELLES, 2009; GAMARO, 2012).



**Figura 8** - ADCP da Soltek modelo M9 com 4 transdutores de 1 MHz e 4 de 3 MHz.

**Fonte:** Adaptada de SONTEK, 2009.

O modelo ADP M9 da Sontek tem dois pares de transdutores: um alinhado na direção Leste-Oeste e outro na direção Norte-Sul (Figura 9). Com o primeiro par, mede-se uma das componentes horizontais da velocidade e a componente vertical. Com o segundo, mede-se a segunda componente horizontal, que é ortogonal à primeira, bem como uma segunda estimativa da componente vertical. Logo, são produzidas as duas estimativas da componente vertical (DORNELLES, 2009).



**Figura 9** - Componentes da velocidade medidas pelo ADCP.

**Fonte:** (DORNELLES, 2009).

A diferença entre as duas estimativas da componente vertical é chamada de “erro de velocidade” e seria nula se as camadas horizontais fossem totalmente homogêneas e se o processo de medição fosse absolutamente preciso. Para medir as três componentes da velocidade seriam necessários apenas três transdutores,

sendo o quarto redundante, mas que permite justamente calcular o “erro de velocidade”. Essa estimativa permite avaliar a qualidade dos dados, independentemente da origem dos erros: equipamento, processamento ou não homogeneidade das camadas (SANTOS et al. 2001).

### 2.2.8.2 Instalação e áreas de medição do ADCP

Os ADCPs podem ser instalados de diversas formas, dependendo dos modelos e das informações que se deseja obter do curso d’água. As principais formas de instalá-los são: fundeados ou estáticos (fixos no fundo do rio, virados para cima ou fixos nas margens, virados para outra margem) e embarcados ou dinâmicos (emitindo os sinais próximos da superfície em direção ao fundo) (Figura 10).

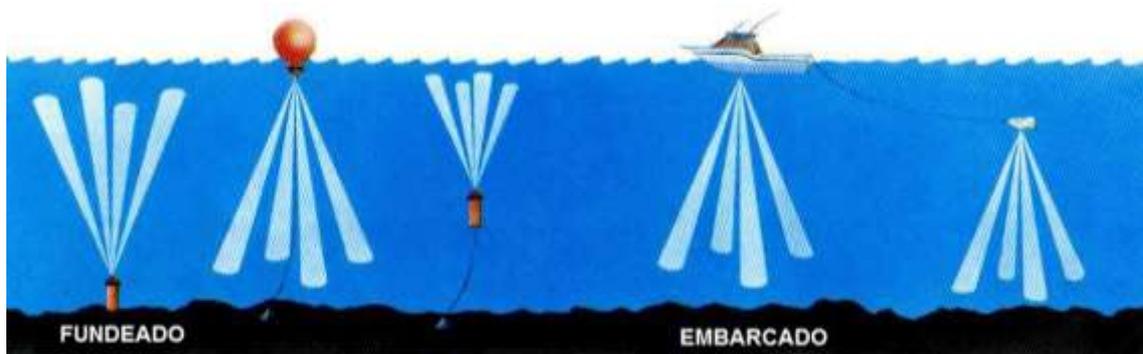


Figura 10 - Principais formas de instalação de ADCPs.

O método mais utilizado para monitoramento no Brasil é o equipamento acoplado em um barco. Trata-se de um eficiente método para medir a descarga e mapear padrões da velocidade nos rios e segue o princípio de que as partículas estejam se movendo na mesma velocidade que a água da célula em que estão.

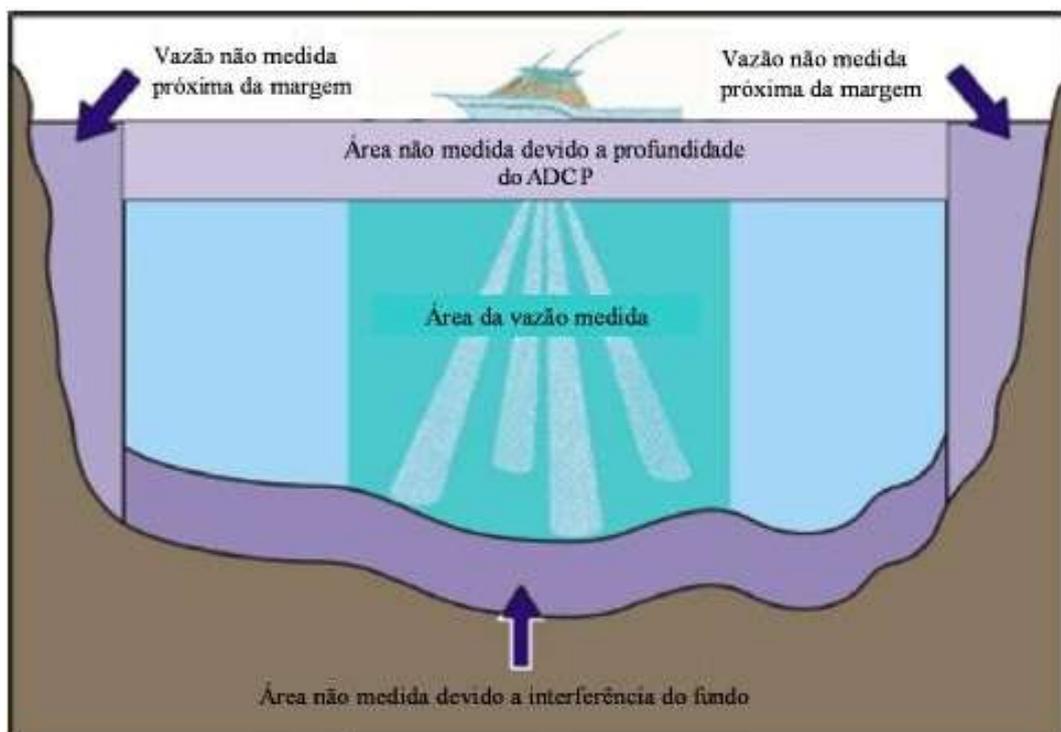
A velocidade pode ser determinada usando-se a técnica do *bottom tracking*. A velocidade medida pelo ADCP é a velocidade relativa entre a água e o equipamento (velocidade relativa da água). No entanto, como o aparelho está montado sobre o barco em movimento, a velocidade do barco em relação à água deve ser conhecida para determinação da velocidade real entre a água e o aparelho.

Essa técnica chamada de *bottom tracking* calcula o deslocamento do pulso acústico Doppler refletido do fundo. Assumindo que o fundo não está se movendo, a velocidade medida pelo *bottom tracking* é a velocidade do barco em relação ao fundo. Porém, o transporte do sedimento próximo ao fundo móvel pode afetar o Efeito Doppler dos pulsos do fundo. Se o *bottom tracking* for afetado pelo transporte,

a velocidade do barco estará inclinada no sentido oposto do movimento do sedimento (GAMARO, 2012).

O ADCP possui algumas limitações que são consideráveis para o monitoramento de fluxos de correntes, como a presença de bolhas de ar na água que podem interferir na transmissão do sinal, podendo ocasionar uma velocidade, significativamente, diferente da velocidade real da água devido à compressão e pelo fato de produzirem ruídos consideráveis nos resultados.

Outra limitação refere-se à profundidade e largura da seção medida do rio que está ligada à frequência do aparelho empregado. Atualmente, existem aparelhos que operam em mais de uma frequência simultaneamente, porém, nem toda região da seção é medida pelo aparelho como uma área próxima a superfície devido à emersão do ADCP, conhecido como *blanking region*. As áreas próximas às margens não são medidas devido à pouca profundidade (Figura 11) (GAMARO, 2012).

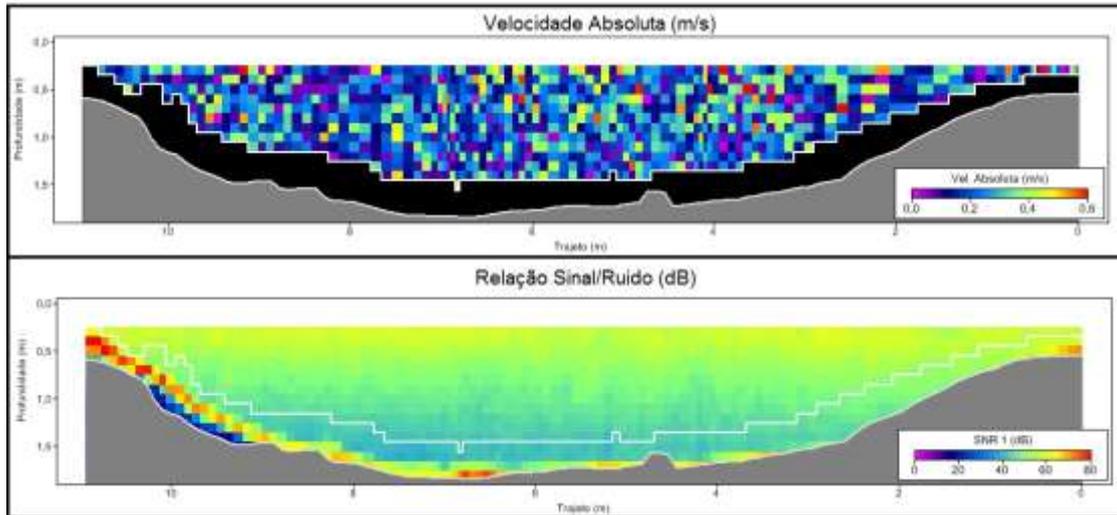


**Figura 11** - Área medidas e não medidas pelo ADCP.

**Fonte:** Adaptado RDI, 1996.

Próximo ao fundo, também há uma área onde não é possível medir devido às ondas sonoras que se espalharam na vertical, formando um feixe paralelo denominado *side lobe*, que por possui uma energia muito fraca, não produz ruído

considerável. A Figura 11 apresenta as áreas medidas e não medidas pelo ADCP e a Figura 12 apresenta o perfil gerado pelo programa de medições com as informações de velocidade e intensidade do sinal.



**Figura 12** - Medições no canal do Tucunduba na Universidade Federal do Pará durante o curso de medição de vazão ministrado pela CPRM (Companhia de Pesquisas de Recurso Minerais), Velocidades e Relação Sinal/ruído apresentados pelo programa RiverSurveyor live da soltek.

### 2.2.8.3 Interferências nas medições com o ADCP

Algumas variáveis que influenciam muito nos cálculos são as perdas de transmissão, pois o sinal emitido tem perdas por espalhamento (espalhamento, dispersão), atenuação (absorção) e cavitação (GAMARO, 2012). Esse espalhamento ou dispersão é o efeito geométrico que representa o enfraquecimento regular do sinal acústico, conforme se espalha para longe da fonte (URICK, 1975). A absorção ou atenuação são a forma real de perda e envolve um processo de conversão de energia acústica em calor, por isso, representa realmente uma perda verdadeira de energia acústica para o meio onde a propagação ocorre (GAMARO, 2012).

Outra interferência que pode influenciar nas medições são os ruídos, que podem ter causas variadas, tais como: algas, peixes, bolas, etc. Fatores que gerem efeitos na intensidade do sinal, não sendo as micropartículas em suspensão na água. Quando a intensidade do sinal acústico aproxima-se da intensidade do ruído, fica difícil de ler o sinal que retorna ao aparelho e, conseqüentemente, os dados de velocidade da água tornam-se de difícil obtenção, mais difícil ainda os dados de sedimentos.

O ADCP, ao amplificar o retorno dos ecos para poder medir corretamente, cria um ruído térmico. O motor principal dos barcos, geradores e bombas, entre outros, criam ruídos. A água passando na face dos transdutores, bolhas de ar criadas pela fricção do casco com a água, ruídos do convés como mover objetos e a trepidação do eixo do motor, todos esses exemplos são ruídos que podem afetar a leitura de ABS e posteriormente a estimativa de sedimentos.

Existem alguns fatores que afetam a qualidade das medições, como a precisão ao medir a intensidade do eco (Backscatter ou retroespalhamento), a precisão da calibração e a precisão do processamento para converter intensidade do backscatter para concentração de sedimento. Os parâmetros que assumimos na conversão também influenciam na precisão do processamento, por exemplo: atenuação causada pela água e sedimento, precisão em quão verdadeiro é a nossa medida de sedimento, ou seja, o que há na água que não é sedimento que estamos medindo como sedimento exemplo: bolhas de ar, algas, etc. (GAMARO, 2012).

Mesmo com todas essas interferências, o ADCP é uma alternativa a ser considerada para as medições de velocidade, vazão e sedimentos. Pois, o equipamento precisa de somente uma travessia para determinar toda a vazão e velocidades da corrente de um rio, nos outros métodos tradicionais, como molinete, precisaria de várias horas de medições com vários pontos de coleta com o barco teoricamente parado, já o ADCP faz toda a medição em movimento.

#### 2.2.8.4 Conversão de retroespalhamento (ABS) em CSS

A CSS em cada célula é estimada a partir do retroespalhamento do sinal acústico do ADCP. Atualmente, existem vários métodos, como o de Deines (1999); Mayerle e Poerbandono (2002); Gartner (2002); Gamaro (2012) e a comparação direta entre a concentração e intensidade do *backscatters* registrados pelo ADCP.

O método de Gamaro (2012) utiliza a Equação 12 modificada do sonar, (URICK, 1975).

$$EL = SL - 2TL + S_V + 10\text{Log}_{10}(V_e) \quad (12)$$

Em que:

$EL$  = Nível do eco em dB;

$SL$  = Nível da fonte no transdutor em dB;

$2TL$  = Duas vezes as perdas de transmissão (ida e volta);

$S_v$  = Força volume de eco das partículas em dB;

$V_e$  = Volume ensonificado (célula).

A Equação 13 também pode ser escrita de outra forma.

$$CSS_{estimado} = 10^{(A+B.RB)} \quad (13)$$

Em que:

$RB$  = Acústico backscatter relativo

$CSS$  = concentração de sedimento em suspensão

$A$  e  $B$  = constantes retiradas da correlação entre o *ABS (Acoustic Backscatter)* é o retorno do pulso sonoro lido pelo ADCP) e a concentração de sedimentos medida com aparelhos convencionais em folha semi-log.

O sinal emitido pelo ADCP tem perdas por espriamento (espalhamento, dispersão), atenuação (absorção) e por cavitação (bolhas de ar geradas pelo movimento). Durante a propagação do feixe acústico na água, ocorrem perdas de energia sob a forma de espalhamento geométrico e atenuação, devido à massa de água e à presença dos sedimentos em suspensão, que geram uma perda na intensidade do sinal emitido, chamadas de perdas de transmissão, podendo ser calculada pela Equação 14 (GAMARO, 2012).

$$2TL = 20\log_{10}R + (2 \cdot \alpha \cdot R) \quad (14)$$

Em que:

$R$  = Distância do volume ensonificado (célula) em m;

$\alpha$  = Coeficiente de absorção em dB/m;

$20\log_{10}R$  = Perda por espriamento;

$2\alpha R$  = Perda por absorção (da água).

$TL$  = perdas de transmissão

O método desenvolvido por Mayerle e Poerbandolo (2002) tem como base a equação desenvolvida por Deines (1999). Esses pesquisadores perceberam que a

inserção de um coeficiente (KM) na equação proporciona melhores resultados na conversão da intensidade acústica em relação ao CSS (Equação 15).

$$C_i = 10^{\left[\log C_r + KM \frac{(EC_i - EC_r)}{10}\right]} \quad (15)$$

Em que:

$C_i$  = concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número  $i$  ( $\text{mg.l}^{-1}$ );

$C_r$  = concentração de sedimentos medida no nível de referência para calibração ( $\text{mg.l}^{-1}$ );

$EC_i$  = intensidade do eco correspondente a célula do número  $i$  (dB);

$EC_r$  = intensidade do eco correspondente ao nível de referência (dB);

KM = coeficiente proposto por Mayerle e Poerbandolo.

O coeficiente KM é um valor empírico para aprimorar a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão. A literatura recomenda valores de KM entre 0,35 e 0,45.

Em quanto o método de Gartner (2002) consiste na estimativa da concentração de sedimentos em suspensão por meio da Equação 16.

$$C_i = 10^{(EC_i \cdot A + B)} \quad (16)$$

Em que:

$C_i$  = concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número  $i$  ( $\text{mg.l}^{-1}$ );

$EC_i$  = intensidade do eco correspondente à célula de número  $i$  (dB);

A e B são, respectivamente, o coeficiente angular e os pontos nos quais interceptam o eixo das ordenadas, determinados por regressão dos valores correspondentes de intensidade do eco e concentração de sedimentos, medidos, simultaneamente, em uma plotagem mono-log como mostra Equação 17.

$$\log_{10}(C_i) = EC_i \cdot A + B \quad (17)$$

Nessa Equação, são determinados os coeficientes A e B utilizando o conjunto de informações referente aos pontos medidos nas seções.

O método de Deines (1999) considera a proporcionalidade entre incrementos de intensidade do sinal acústico e a razão entre as concentrações. As intensidades dos ecos registradas pelo ADCP são convertidas em concentrações de sedimentos através de uma correlação estabelecida a partir de uma intensidade do eco e uma concentração de sedimentos em suspensão correspondente (Equação 18).

$$C_i = 10^{\left[\log C_r + \frac{(EC_i - EC_r)}{10}\right]} \quad (18)$$

Em que:

$C_i$  = concentração de sedimentos em suspensão estimada na célula número i ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$C_r$  = concentração de sedimentos medida no nível de referência para calibração ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$EC_i$  = intensidade do eco correspondente à célula de número i (dB);

$EC_r$  = intensidade do eco correspondente ao nível de referência (dB).

Na Figura 13, uma coluna de dados do ADCP (*ensemble*) é apresentada esquematicamente, indicando as variáveis consideradas no método de conversão e o nível de referência, local onde é medida a concentração de sedimentos em suspensão, por amostragem mecânica, simultaneamente com o registro do sinal acústico.

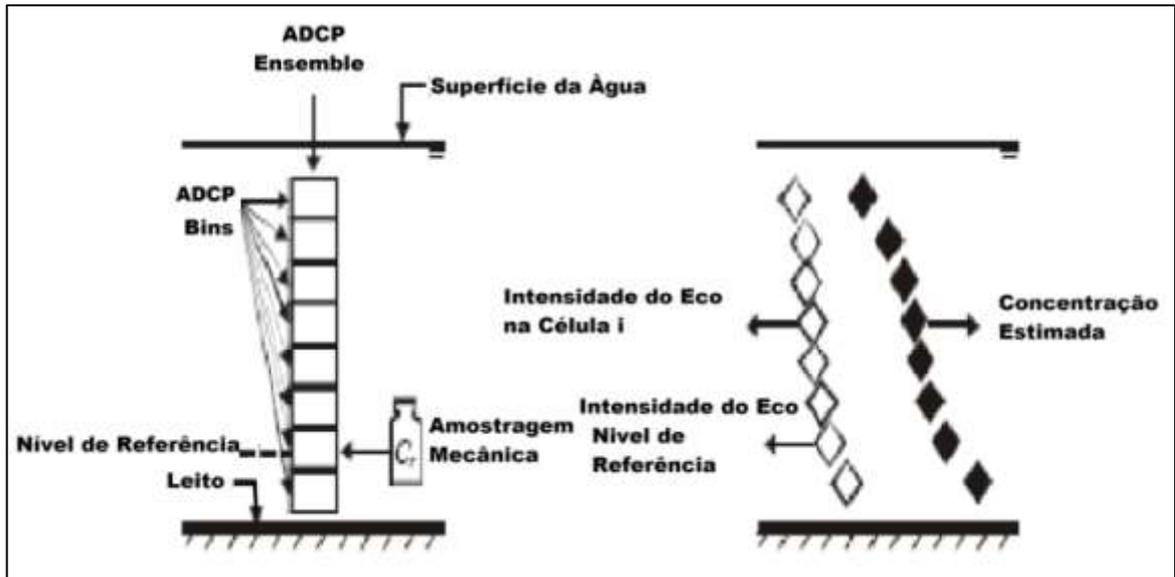


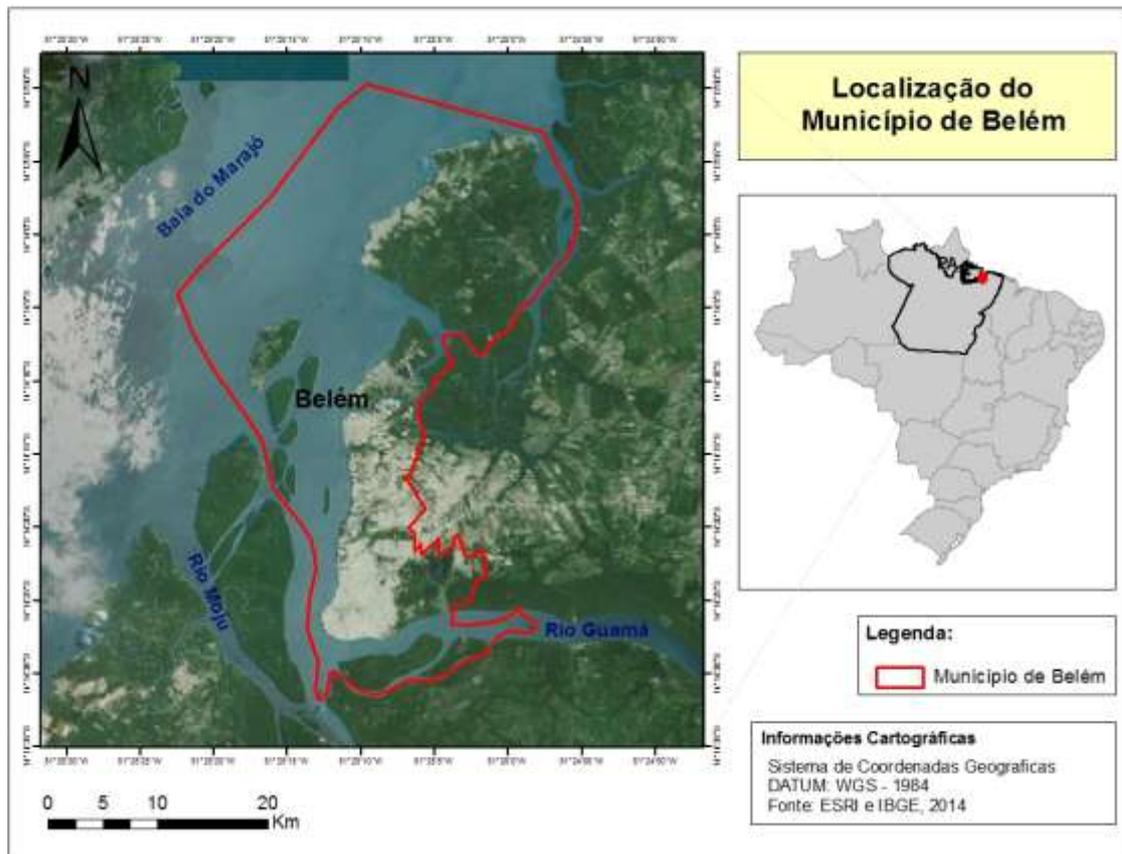
Figura 13 - Esquema de conversão das intensidades em concentrações.

Fonte: (DORNELLES, 2009)

### 3. ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi realizada no rio Guamá, localizado no nordeste do Estado do Pará. Sua bacia hidrográfica drena uma área de 87.389,54km<sup>2</sup>, o que equivale a 7% da área do estado. Situado entre os paralelos (01°11'04" W) e (05°06'08" S) de latitude e os meridianos de (46°40'48" E) e (-05°06'08" W) de longitude, o rio Guamá tem navegabilidade nos últimos 160 km, que se estende do município de São Miguel do Guamá até a Baía do Guajará.

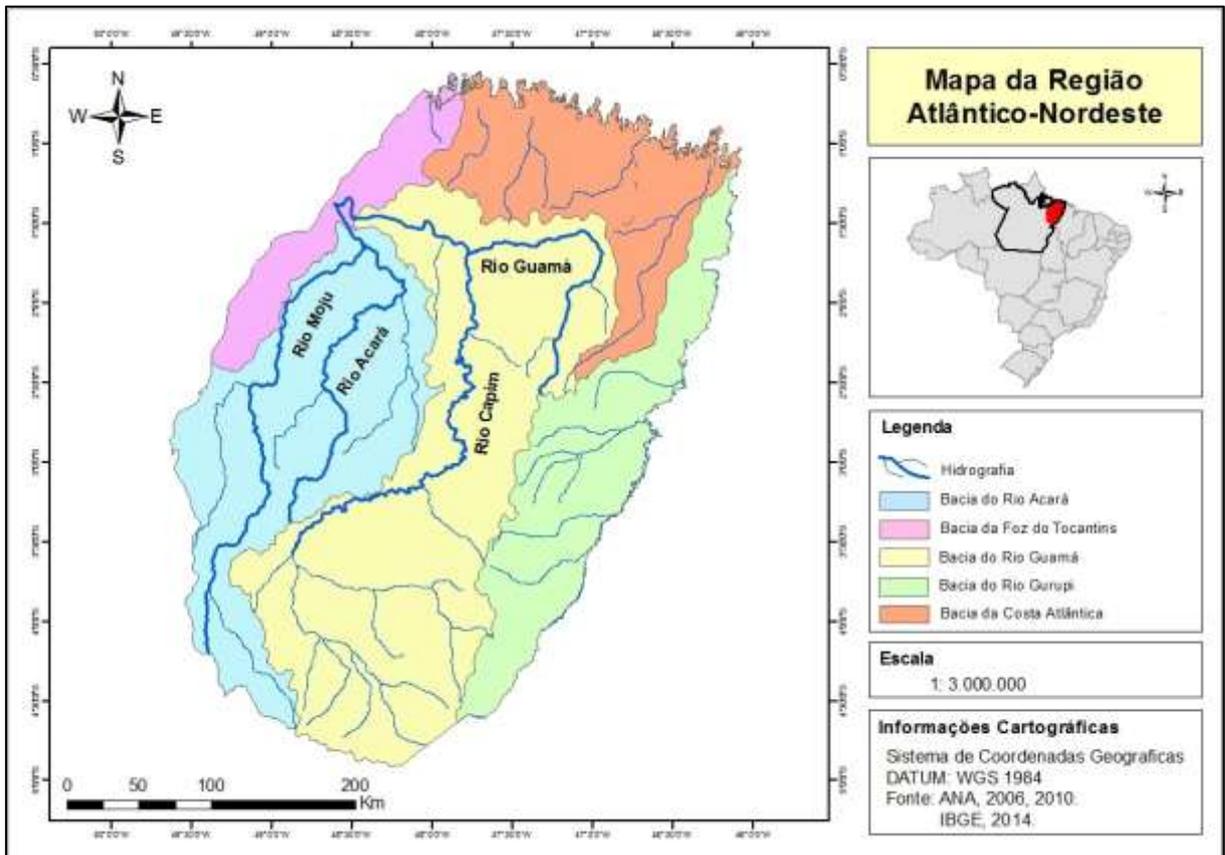
A foz está localizada na cidade de Belém, município com uma população aproximada de 1.393.399 habitantes e uma área territorial de 1.059.458km<sup>2</sup> (IBGE, 2014). A capital do Estado do Pará situa-se à margem direita do rio Guamá, onde foi o ponto das campanhas das medições utilizando o ADCP (Figura 14).



**Figura 14** – Mapa do Brasil destacando o estado do Pará e imagem de satélite do município de Belém.

Considerando o cenário hidrológico, a área de estudo está localizada na região hidrográfica Atlântico Norte/Nordeste, que ocupa 10,1% da área do Estado do Pará. Constitui-se das bacias dos rios Guamá-Moju, Gurupí e das bacias da região do Atlântico. Tem como drenagens principais os rios Guamá, Capim, Acará, Mojú,

Aiu-Açu, Acará Miri, Camari, Piriá, Gurupi-Miri, Guajará, Rolim, Coaraci-Paraná, Uarim, Caeté, Pirabas, Maracanã, Marapanim, Mojuí e Maguarí. Sendo essas as principais bacias que estão na região hidrográfica estudada, como mostra a Figura 15. (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, 2017).



**Figura 15** – Mapa do Brasil destacando o estado do Pará e a Sub-Região Hidrográfica Costa Atlântica Nordeste.

A Carga de sedimentos proveniente da bacia do rio Guamá e Capim têm influencia da sazonalidade das variáveis ambientais (maré, chuva, descarga de água doce e de sedimentos etc.) afetando, diretamente, a quantidade de material transportado/depositado. Essa carga é composta de sedimentos arenosos, de coloração avermelhada devido ao capeamento por óxido de ferro, que dão a cor marrom as águas, têm como rocha fonte o arenito ferruginoso conhecido como “grés-do-Pará”. Ao longo das margens dos rios Guamá e Acará, observam-se falésias ativas dessa formação geológica, sob constante retrabalhamento pela maré. A cobertura arenosa do substrato é mantida graças às fortes correntes de vazante e, posteriormente, pelas correntes de enchente, que erodem o material fino depositado nos ciclos de maré anteriores (Gregório & Mendes, 2009).

Na região de estudo a variação da maré de sizígia atinge 3,6 m em média. Nesse caso, a vazante dura mais tempo que a enchente, principalmente nos períodos de sizígia. A região também apresenta baixa salinidade. No entanto, em alguns períodos do ano, águas salinas invadem o rio Guamá advindas da baía do Marajó através da baía do Guajará (Gregório & Mendes, 2009). Devido a isso, a quantidade de material em suspensão tem maior variação durante um ciclo de maré do que ao longo do ano.

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

O ADCP utilizado é o *River Surveyor*, fabricado pela empresa americana “Sontek YSI”, que possui uma combinação com equipamento de medição de velocidade pelo efeito Doppler, com um conjunto de softwares de gerenciamento de dados, permitindo visualizar a medição e coletar os dados em um computador portátil ou celular compatível. Esse equipamento efetua medições com alto grau de exatidão. Tendo facilidade de uso, permite medições com confiança, sem a necessidade de mudanças nas configurações de medição para qualquer situação fluvial específica. O *M9* (Figura 8) apresenta um sistema de nove feixes com dois conjuntos de quatro feixes perfiladores (cada conjunto com sua própria frequência) e um feixe vertical. Também tem um alcance máximo de até 40 m de profundidade para medição de velocidade de perfil e 80 m para medições de vazão (utilizando como referência o GPS e o feixe vertical) (SONTEK, 2009).

Para o funcionamento do ADCP é necessário ligação, via cabo, do módulo de alimentação e comunicação (PCM – *Power and Communication Module*) ao equipamento. A conexão *Bluetooth* permite a transmissão dos dados coletados para um computador ou aparelho celular. A Figura 16 ilustra os aparelhos que foram utilizados.

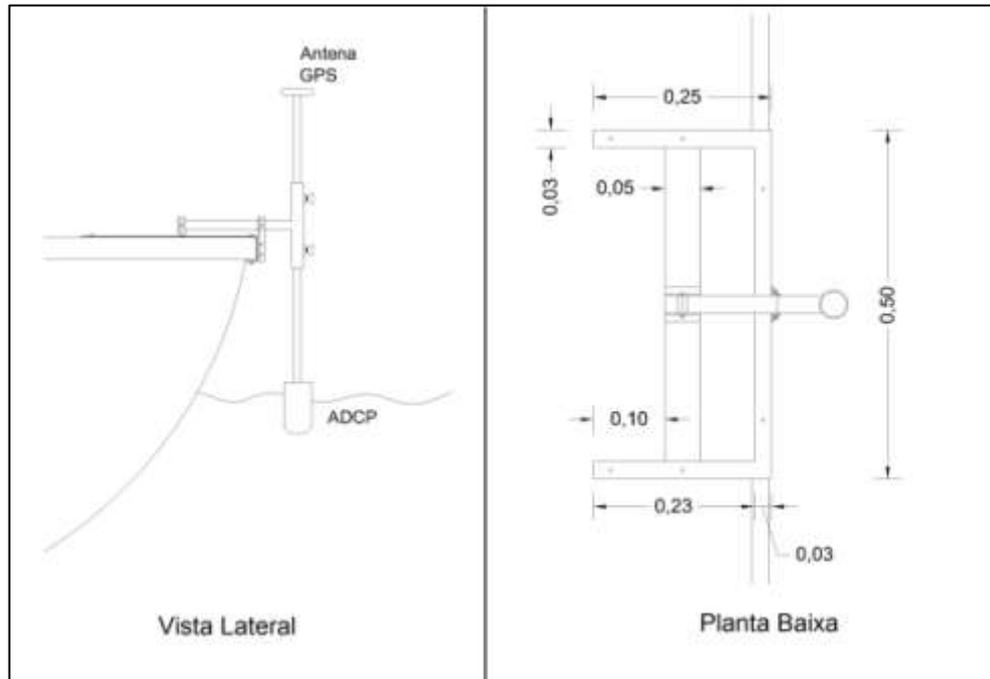


**Figura 16** - Laptop, Smartphone, ADP da Soltek modelo M9, módulo de alimentação e antena DGPS.

**Fonte:** SONTEK, 2009.

Esses equipamentos foram instalados no barco de pesquisa, com um suporte fabricado especialmente para a embarcação utilizada pela Universidade Federal do Pará (UFPA) (Figura 18). O projeto deste suporte foi confeccionado em parceria com a faculdade de engenharia mecânica, no laboratório de turbomáquinas. Possui uma

base fixa, um braço móvel com giro de até 180° e um eixo integrado com trava borboleta. Tal eixo também rotaciona na outra direção para melhor ajuste do aparelho e manuseio na hora de sua instalação (Figuras 17, 18 e 19).



**Figura 17** - Projeto do suporte em aço inox para o ADCP



**Figura 18** - Barco utilizado na pesquisa e suporte para o ADCP.



**Figura 19** - ADCP instalado na embarcação.

#### 4.1 PROCEDIMENTOS DE CAMPO

A seguir serão demonstrados os locais de medição, a instalação e descrição dos equipamentos utilizados na coleta de dados em campo, assim como, os procedimentos que foram utilizados na amostragem de sedimentos em campo.

##### 4.1.1 Local das Medições

As medições de concentração de sedimentos em suspensão foram realizadas no rio Guamá, 11 km da sua foz, às margens da Universidade Federal do Pará, localizada na cidade de Belém, realizadas no braço principal do rio e em varias seções para efeito comparativo. A Figura 20 apresenta a localização da seção onde foram realizadas as medições.



**Figura 20** – Imagem de Satélite da região metropolitana de Belém, da Baía do Guajará e do rio Guamá destacando a seção de medidas das concentrações de sedimentos.

**Fonte:** Adaptado de Google Earth, 2015.

As medições foram realizadas no período de vazante e no período de enchente, pois o rio sofre grande influência das marés. Também foram realizadas campanhas no final do mês de março e no início do mês de junho. Nas travessias foram realizadas coletas simultâneas de amostras de água/sedimento com a garrafa de *Van Dorn* (Figura 22). A fim de se obter dados para calibração das equações do método de conversão do sinal de retroespalhamento em CSS. Posteriormente, foram comparadas as concentrações de sedimentos das amostras com as concentrações obtidas pelas equações.

#### 4.1.2 Equipamentos utilizados

Nas medições foram utilizados diversos equipamentos para se obter os dados acústicos, de vazão e velocidade, como o ADCP (Perfilador acústico de corrente por Efeito Doppler) modelo M9 da Sontek, com as frequências de 1 e 3MHz (Figura 21). Esse novo aparelho da Sontek apresenta um autoajuste para muitas situações que ocorrem em uma medição, porém, antes das medições é necessário calibrar a bússola e alimentar o programa com os dados da região a ser estudada, como

declividade magnética, salinidade e temperatura da água que é medida pelo próprio equipamento, pois o modelo utilizado já possui termômetro.



**Figura 21** - ADCP M9 utilizado na pesquisa.

Para comparação e calibração das informações dos sedimentos em suspensão, foram realizadas coletas de amostras com a garrafa de *Van Dorn* com um lastro de 20 kg (Figura 22), nas profundidades calculadas de acordo com o método B.C.Colby (CARVALHO, 2008).



**Figura 22** – Garrafa de Van Dorn e Lastro utilizado nas medições.

As amostras foram armazenadas em garrafas de plástico escuro com 600 ml cada (Figura 23).



**Figura 23** - Garrafa para armazenamento das amostras.

Para a coleta das amostras de água/sedimento foi utilizado um guincho hidrométrico para verificação da profundidade das coletas (Figura 24).



**Figura 24** - Guincho Hidrométrico.

A comunicação do ADCP com o computador foi realizada por meio de uma antena Bluetooth (Figura 25). Essa conexão sem fio possibilitou que os equipamentos ficassem a certa distância, permitindo que o notebook ficasse em local coberto no barco, o que foi de grande ajuda nos períodos de chuva, que se mantiveram constantes durante as medições, observando-se mais uma das praticidades do ADCP nas medições.



**Figura 25** - Notebook com antena Bluetooth.

Para obter as coordenadas, o ADCP utiliza o método da triangulação que consiste em utilizar três pontos de referência. Com o GPS ligado, utiliza-se no mínimo três satélites para calcular a localização com uma precisão média de 10 metros. O RTK (*Real Time Kinematic*), (Figura 26) ligado pode ser utilizado, juntamente com o GPS, para corrigir e melhorar o posicionamento em tempo real durante as medições.

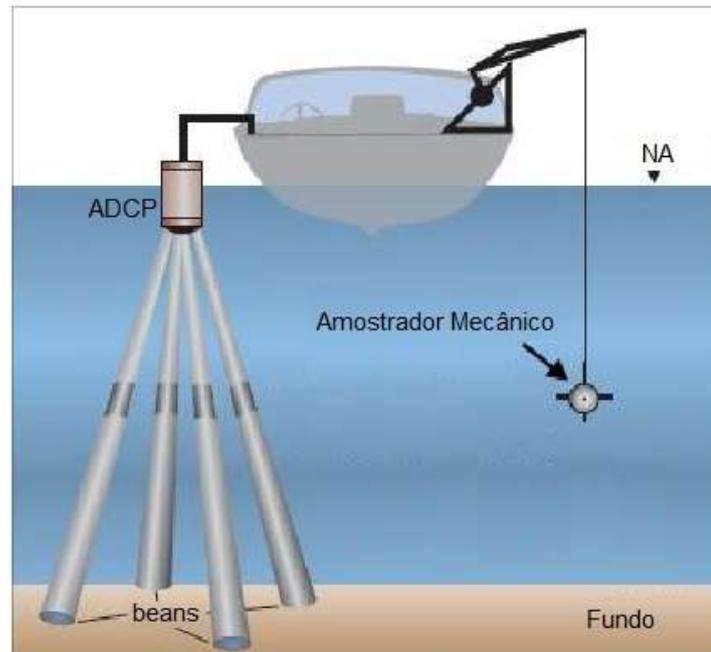
Também foi utilizado o rastreamento do fundo do rio do ADCP (chamado de *bottom tracking*) como mais um ponto de referência para melhorar o cálculo da localização, com isso, o erro passa para aproximadamente de 0,3 cm. A partir do cálculo da localização, o ADCP obtém a velocidade do barco e da corrente de água com alta precisão. O RTK é um referencial fixo, que corrige a posição do ADCP durante o seu deslocamento. É equipado com uma antena de rádio, que tem a função de comunicação entre os equipamentos (RTK e ADCP), e um GPS com a função de georeferenciar o equipamento. Deste modo, a sua instalação deve ser feita em um local mais elevado (Figura 26), para que obtenha o melhor sinal durante a medição com o ADCP.



**Figura 26** – Equipamento RTK instalado sobre o trapiche da UFPA.

#### **4.1.1 Instalação para amostragem**

Para estimar a concentração de sedimentos em suspensão é necessária a realização de coletas de amostra de água nos mesmos instantes e o mais próximo da posição onde o ADCP está executando as medições. As concentrações obtidas a partir dessas amostras foram utilizadas para calibração das equações de estimativa. Posteriormente, foram feitos os cálculos das concentrações com os valores dos quatro sensores do equipamento acústico. A Figura 27 apresenta o esquema ideal de instalação e as posições relativas dos pontos de amostragem de cada um dos equipamentos a serem utilizados.



**Figura 27** - Esquema ideal de montagem do ADCP e do Amostrador no barco.

**Fonte:** Adaptado de WALL et al., 2006.

Nas medições esse esquema foi utilizado para instalação dos aparelhos e equipamentos com uma pequena mudança. O ADCP e o guincho ficaram do mesmo lado do barco para as coletas das amostras serem feitas o mais próximo possível (Figura 28), gerando dados confiáveis para calibração das equações.

Como mostrado na Figura 13, o ADCP divide a sua medição em células de igual tamanho, e obtêm vários dados, sendo um deles a intensidade do eco, a qual se correlaciona com as concentrações obtidas por amostragem. Para melhor correlação entre esses dados, optou-se pelo uso do método pontual de amostragem mecânica para as amostras.

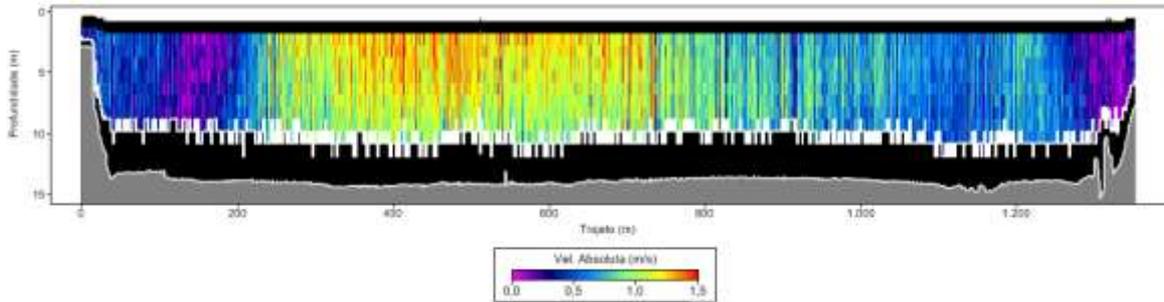


**Figura 28** - Foto do aparelho e equipamentos de coleta instalados no Barco.

#### **4.1.2 Procedimento de amostragem**

Para a determinação da concentração dos sedimentos suspensos pelo método de amostragem padrão, a seção foi dividida em quatro verticais a 20%, 40%, 60% e a 80% da vazão medida, e, em cada vertical, foram coletados cinco amostras a 10%, 30%, 50%, 70% e 90% da profundidade da vertical, de acordo com o método de B.C. Colby (CARVALHO, 2008). Esse método é o mais adequado, pois o ADCP mede o sinal em cada célula, que será associado a uma concentração coletada em mesma profundidade para melhor calibração das equações.

Para identificar a vazão, profundidade e seção do rio, foi realizada uma medição somente com o ADCP na água, a fim de se obter esses dados. Com os dados realizados, foram calculadas as localizações das coletas e, posteriormente, calculadas as profundidades das cinco coletas de amostras da mistura água/sedimento de acordo com o método acima.



**Figura 29** - Perfil de velocidades na seção de medição do Rio Guamá em maré vazante.

Durante a coleta das amostras, o ADCP também estava emitindo e recebendo informações acústicas a uma taxa de dois pulsos acústicos (pings) por segundo, ou seja, para cada ponto amostrado foram obtidos, em média, 120 valores instantâneos (*ensembles*) de velocidade e os dados de retroespalhamento para cada um dos quatro sensores (*beams*) e para todas as profundidades daquela vertical. Portanto, para cada ponto amostrado existe uma concentração obtida pela amostra coletada que foi relacionada com a média dos valores de retroespalhamento (*backscatter*) dos quatro transdutores obtidos no mesmo ponto.

Para identificação e correlação dos dados durante a execução das medições e coletas das amostras, foram anotadas as seguintes informações para cada ponto de coleta.

- Data e hora;
- Cota da maré nessa hora;
- Número e profundidade da vertical e distância em relação à margem;
- Número e profundidade do ponto.

#### 4.2 PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO

Os procedimentos de laboratório envolveram a determinação da CSS através de análise das amostras coletadas com o amostrador mecânico. Essas concentrações foram obtidas pelo método da filtração (CARVALHO, 2008). Após a montagem do equipamento de filtração (Figura 30), tomaram-se as amostras coletadas em campo que estavam armazenadas em garrafas plásticas e foram agitadas vigorosamente para assegurar uma suspensão uniforme do material e, posteriormente, foram tirados 100 ml em uma proveta (Figura 31).



**Figura 30** - Cadinho de Gooch ligado em uma bomba de vácuo utilizado nos ensaios em laboratório.



**Figura 31** - Proveta com 100 ml de amostra e garrafa plástica utilizada na pesquisa.

Antes desse procedimento, as membranas filtrantes de fibra de vidro utilizadas no ensaio foram pesadas e identificadas em laminas de vidro (Figura 32).



**Figura 32** - Membranas na balança de precisão sendo pesadas e identificadas.

Em seguida, ocorreu a filtração propriamente dita, na qual os 100 ml da amostra foram cuidadosamente despejados no cadinho de Gooch (Figura 30) e passados pela membrana filtrante, que foi retirada cuidadosamente com uma pinça e depositado nas lâminas de vidro para serem aquecidas (Figura 33). Essas foram colocadas na estufa para secar a 60° por duas horas, uma temperatura baixa para não queimar alguns minerais. Depois, as lâminas foram retiradas da estufa e colocadas no dessecador para descansar e, após duas horas, no mínimo, foram pesadas (Figura 32).



**Figura 33** – Amostras nas lâminas de vidro ao saírem da estufa e amostras no dessecador.

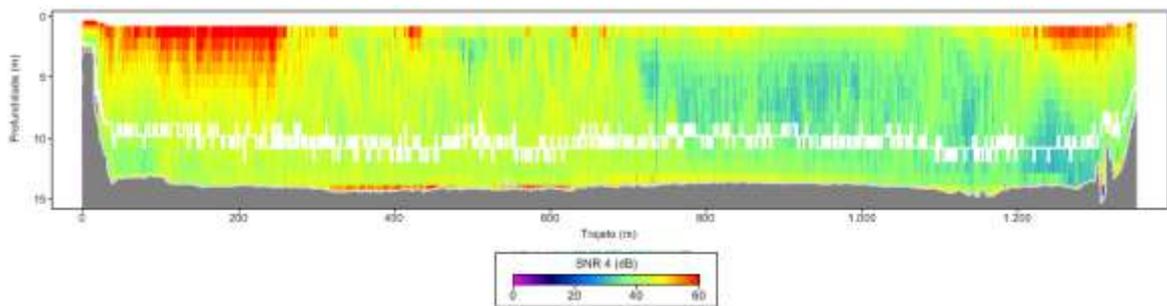
Após a pesagem dos sedimentos em balança de precisão e descontado o peso da lâmina de vidro, as concentrações de sedimentos foram calculadas a partir

da razão entre o peso seco do material e o volume amostrado. Assim, foram obtidas as concentrações em mg/L de cada ponto amostrado, as quais foram utilizadas nas calibrações das fórmulas de estimativa de sedimentos em suspensão.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, que compreendem os dados utilizados como base para os cálculos obtidos pelos equipamentos nas medições e os valores de concentração de sedimentos em suspensão estimados pelo método utilizado.

Para os cálculos de estimativa da concentração de sedimento, com a utilização de informações do ADCP (Figura 34), os valores médios dos quatro beams (dB médio) foram utilizados e são apresentados a seguir.



**Figura 34** - Perfil do Rio Guamá na seção de medidas com os dados de SNR (Relação Sinal/ruído)

As Tabelas de 1 a 6 mostram os dados obtidos com o ADCP e pela amostragem pontual, cada amostra foi denominada de Pn% (Ponto n, a % da profundidade). Com o equipamento de efeito Doppler, foram obtidos os dados do retroespalhamento (*backscatters*) dos quatro transdutores (*beams*) e calculou-se o retroespalhamento médio da célula analisada. Nas tabelas também demonstram as concentrações de sedimento em suspensão (CSS) obtidas em laboratório a partir das amostras coletadas em campo. É mostrada também a profundidade de cada coleta e a sua porcentagem em relação à profundidade da vertical, segundo o método de amostragem utilizado. As análises das tabelas apontam que a variação crescente das CSS medidas de acordo com o aumento da profundidade. Na maioria das verticais, as concentrações mais elevadas estiveram em maiores profundidades. Entretanto, na vertical V3 da medição 1 e na vertical V3 da medição 2 houve uma variação aleatória no perfil com dados discrepantes.

Na medição 1 não foi possível realizar a coleta a P190 a 90% da profundidade, pois no dia dessa medição a corda utilizada não tinha comprimento suficiente para chegar à profundidade desejada. Também na medição 1, as verticais V1 e V2 apresentaram valores baixos de concentração e com um aumento gradativo

das concentrações em função do aumento da profundidade. Enquanto na medição 2, a variação na metade da profundidade foi menor e suas concentrações apresentaram valores maiores, chegando até 362 mg/L, representado o comportamento da CSS em relação à profundidade.

Os dados de retroespalhamento (*backscatters*) apresentaram uma variação semelhante a das concentrações obtidas em laboratório, variando de acordo com a profundidade, pois quanto maior a profundidade maior a concentração de sedimentos. Na calibração das equações se utilizou os dados médios das verticais de retroespalhamento para a estimativa das concentrações (Tabela 10). As verticais V3 das medições 1 e 2 e vertical V6 da medição 2 foram descartadas devido à presença de concentrações discrepantes em relação à profundidade e o padrão das outras verticais. Isso dever ter ocorrido devido à alguma falha no processo de coletas das amostras em campo.

**Tabela 1 - Dados Vertical 1 da Medição 1**

Identific.	Nº Medição: 1		Vertical: V1		Profundidade da vertical: 14,4m			
Amostra	Prof.(m)	% prof.	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB Médio	CSS (mg/L)
P1 10	1,44	10%	41,1	41,1	40,8	41,2	41,05	52,00
P1 30	4,33	30%	34,8	37,5	32,6	30,8	33,925	51,00
P1 50	7,22	50%	31,3	35,4	34,5	32,7	33,475	74,00
P1 70	10,15	70%	33,2	35,3	34,9	35	34,6	60,00

**Tabela 2 - Dados Vertical 2 da Medição 1**

Identific.	Nº Medição: 1		Vertical: V2		Profundidade da vertical: 13m			
Amostra	Prof.(m)	% prof.	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB Médio	CSS (mg/L)
P2 10	1,3	10%	46,5	43,5	46,2	45,6	45,45	64,00
P2 30	3,91	30%	45,2	40,9	40,1	43,9	42,525	83,00
P2 50	6,52	50%	37,7	34	33,2	30,8	33,925	57,00
P2 70	9,13	70%	32,1	28,4	31,9	31	30,85	68,00
P2 90	10,38	80%	28,8	29,3	30,9	30,7	29,925	110,00

**Tabela 3 - Dados Vertical 3 da medição 1**

<b>identf.</b>	<b>Nº Medição: 1</b>		<b>Vertical: V3</b>		<b>Profundidade da vertical: 12,6m</b>			
	Amostra (h)	% (h)	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB Médio	C (mg/L)
<b>P3 10</b>	1,26	10%	43,1	40,5	42,8	41,9	42,075	172,00
<b>P3 30</b>	3,78	29%	39,5	34,5	34,8	34,1	35,725	250,00
<b>P3 50</b>	6,31	49%	42,5	32,9	37,7	35,3	37,1	90,00
<b>P3 70</b>	8,84	68%	36,7	32,2	32,2	31,5	33,15	86,00
<b>P3 90</b>	10,53	81%	27,8	27,7	33,5	30,6	29,9	238,00

**Tabela 4 - Dados Vertical 1 da Medição 2**

<b>Identific.</b>	<b>Nº Medição: 2</b>		<b>Vertical: V4</b>		<b>Profundidade da vertical: 12,8m</b>			
<b>Amostra</b>	Prof.(h)	% (h)	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB Médio	CSS (mg/L)
<b>P1 10</b>	1,28	10%	39	39,4	40	39,1	39,375	52,00
<b>P1 30</b>	3,84	30%	46,6	50,3	51,2	49,5	49,4	93,00
<b>P1 50</b>	6,41	50%	49,1	50	48	46,2	48,325	100,00
<b>P1 70</b>	8,97	70%	46,8	46	48,2	47	47	288,00
<b>P1 90</b>	11,54	90%	46,5	40,9	47,1	46,1	45,15	246,00

**Tabela 5 - Dados Vertical 2 da Medição 2**

<b>Identific.</b>	<b>Nº Medição: 2</b>		<b>Vertical: V5</b>		<b>Profundidade da vertical: 13,4m</b>			
<b>Amostra</b>	Prof.(h)	% (h)	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB Médio	CSS (mg/L)
<b>P2 10</b>	1,34	10%	47,6	45,3	44,9	41,9	44,925	38,00
<b>P2 30</b>	4,03	30%	49,8	46,8	49,6	51,9	49,525	106,00
<b>P2 50</b>	6,72	50%	44,8	45,3	45,7	47,6	45,85	163,00
<b>P2 70</b>	9,4	70%	40	40,2	40,6	39,8	40,15	235,00
<b>P2 90</b>	12	90%	55	51,7	47,4	45,1	49,8	362,00

**Tabela 6 - Dados Vertical 3 da Medição 2**

<b>identf.</b>	<b>Medição: 2</b>		<b>Vertical: V6</b>		<b>Profundidade: 12,93 m</b>				
	Amostra (h)	% (h)	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB Médio	C (mg/L)	
<b>P3 10</b>	2,3	18%	48,8	46,7	51,9	45	48,1	83,00	
<b>P3 30</b>	3,88	30%	48	46,7	48,2	45,1	47	67,00	
<b>P3 50</b>	6,47	50%	49,5	46,3	45,5	46,9	47,05	148,00	
<b>P3 70</b>	9,6	74%	46,2	46,1	46,8	45,7	46,2	39,00	
<b>P3 90</b>	11,65	90%	50,3	48,9	44,9	44,4	47,125	142,00	

**Tabela 7 - Dados Vertical 4 da Medição 2**

<b>Identific.</b>	<b>Nº Medição: 2</b>		<b>Vertical: V7</b>		<b>Profundidade da vertical: 13,9m</b>				
<b>Amostra</b>	Prof.(h)	% (h)	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB Médio	CSS (mg/L)	
<b>V1 10</b>	1,39	10%	47,5	47	44,9	40,5	44,975	84,00	
<b>V1 30</b>	4,17	30%	39,1	34,3	39,7	40,6	38,425	51,00	
<b>V1 50</b>	6,95	50%	37,8	35,3	42,1	34,5	37,425	95,00	
<b>V1 70</b>	9,73	70%	35,5	35,2	35,9	36,5	35,775	81,00	
<b>V1 90</b>	12,51	90%	49,5	48,6	44,5	41,1	45,925	166,00	

**Tabela 8 - Dados Vertical 5 da Medição 2**

<b>Identific.</b>	<b>Nº Medição: 2</b>		<b>Vertical: V8</b>		<b>Profundidade da vertical: 13,1m</b>				
<b>Amostra</b>	Prof.(h)	% (h)	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)	dB Médio	CSS (mg/L)	
<b>V2 10</b>	1,31	10%	38,3	36,2	42,5	40,6	39,4	94,00	
<b>V2 30</b>	3,94	30%	34,1	30,5	34,9	33,1	33,15	69,00	
<b>V2 50</b>	6,56	50%	33,2	33,3	36,1	33,3	33,975	115,00	
<b>V2 70</b>	9,19	70%	27,9	26,8	27,9	26,6	27,3	111,00	
<b>V2 90</b>	11,81	90%	48,2	46	29,2	25,7	37,275	127,00	

**Tabela 9 - Dados Vertical 6 da Medição 2**

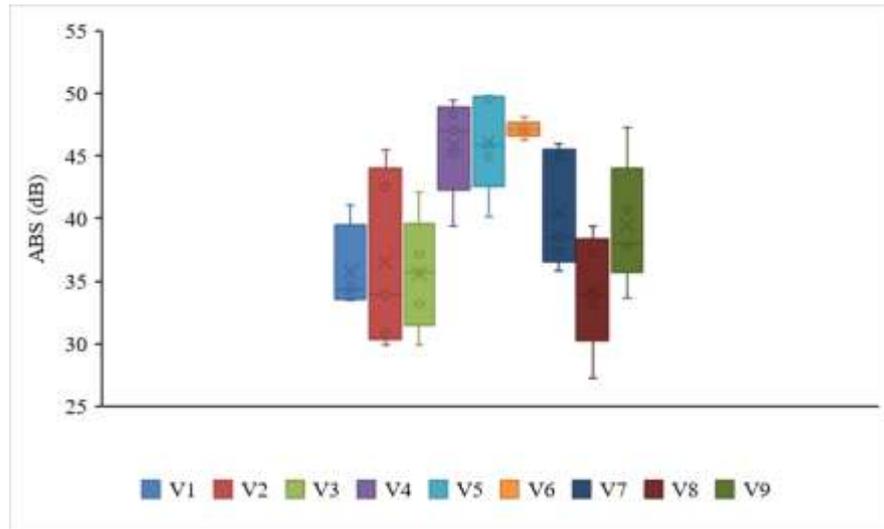
identf.	Nº Medição: 2		Vertical: V9		Profundidade da vertical: 13,2m			dB Médio	C (mg/L)
	Amostra (h)	% (h)	Beam 1 (dB)	Beam 2 (dB)	Beam 3 (dB)	Beam 4 (dB)			
V3 10	1,32	10%	37,9	38,3	38	36,8	37,75	55,00	
V3 30	3,96	30%	31,2	34,2	34,6	34,5	33,625	61,00	
V3 50	6,6	50%	36,3	40,4	39,7	35,3	37,925	90,00	
V3 70	9,24	71%	42,3	43,6	39,5	37,5	40,725	94,00	
V3 90	11,88	91%	47,8	47,7	47,1	46,6	47,3	167,00	

**Tabela 10 - Dados Médios das Verticais**

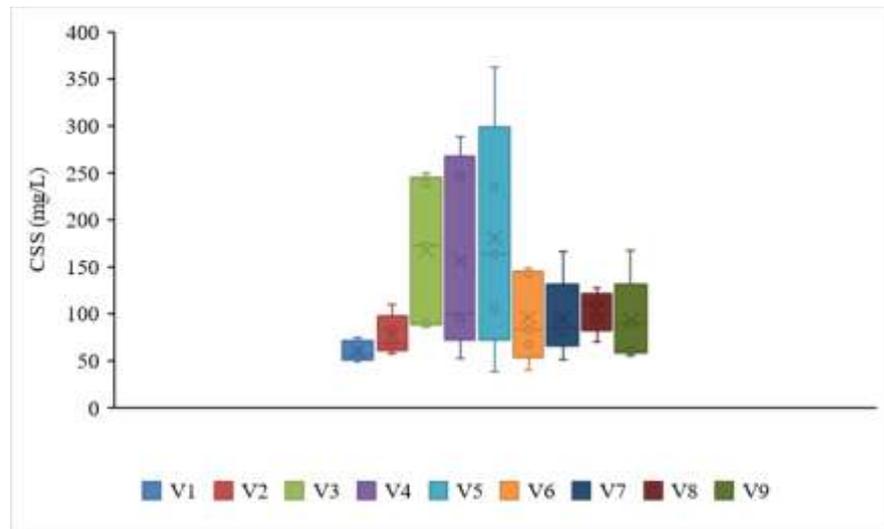
MEDIÇÃO	VERTICAIS	Prof. (db)	Médio	(CSS) Médio
MED 1	V1	14,4	35,76	59,25
MED 1	V2	13,0	36,54	76,40
MED 1	V3	12,6	35,59	167,20
MED 2	V4	12,8	45,85	155,80
MED 2	V5	13,4	46,05	180,80
MED 2	V6	12,9	47,10	95,80
MED 2	V7	13,9	40,51	95,40
MED 2	V8	13,1	34,22	103,20
MED 2	V9	13,2	39,47	93,40

Devido ao rio Guamá ser de grande extensão, com mais de 1 km de largura, verificou-se uma carga de sedimentos em suspensão média de 110 mg/L e com um padrão de variação semelhante na maioria das verticais coletadas. Segundo Pinheiro (1987), a CSS pontual fica em torno de 115 mg/l, com valor médio de aproximadamente 100 mg/l. Estes resultados corroboram com os obtidos neste trabalho, que também apresentaram grande quantidade e variação de sedimentos nas águas do rio Guamá influenciadas pelas marés.

Analisando os dados utilizados na calibração, podemos observar que os dados acústicos ABS apresentam uma variabilidade menor que os dados das CSS obtidas pelo MAP (Figura 35 e 36). Isso demonstra que os dados de CSS coletados, tem um grau de incertezas maior, justificado pela falta de precisão do MAP, ainda utilizado com equipamentos manuais de coleta.



**Figura 35** - Gráfico Box plot dos dados de Retroespalhamento utilizados na calibração.

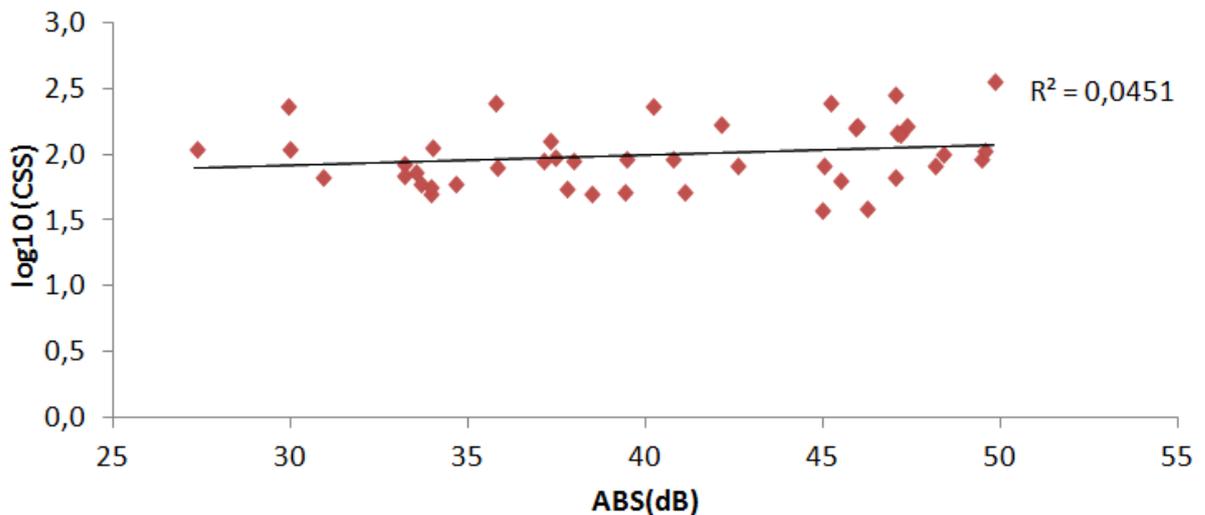


**Figura 36** - Gráfico Box plot dos dados de CSS obtidos das amostras coletadas.

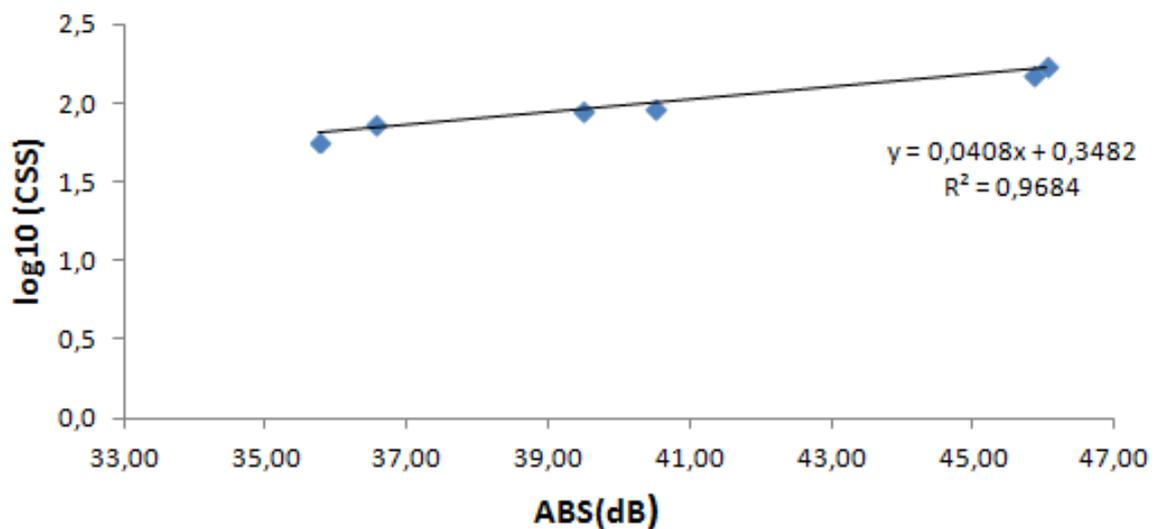
A seguir serão apresentados os resultados das estimativas de CSS realizadas com o método Gartner (2002). O uso deste método justifica-se pelos os melhores resultados para estimativa de sedimentos em suspensão observados por ÁVILA *et al.*, 2014; DORNELLES, 2009 e SCHUCK, 2013, em relação aos outros métodos comparado por esses autores.

Após a obtenção dos dados de ABS e de CSS coletados de cada célula, ocorreu a etapa posterior, a calibração, tendo como finalidade a correlação desses valores. Nessa primeira etapa, não houve um bom coeficiente de determinação, com

o valor de  $R^2$  igual a 0,04 (Figura 35). Para melhorar esse coeficiente, utilizaram-se os valores médios desses dados nas verticais coletadas e a retirada do outliers. Após esse ajuste, obteve-se um  $R^2$  igual a 0,96 (Figura 36), que representa uma calibração mais confiável. Assim, foram obtidos os coeficientes A e B a partir da reta de regressão, utilizado para obter a equação de estimativa de CSS.



**Figura 37** - Regressão dos dados brutos de CSS (mg/L) e ABS (dB).



**Figura 38** - Regressão entre os Dados Médios de ABS e CSS (mg/L).

Por meio da calibração, obtiveram-se os coeficientes A e B da reta de regressão, estes foram inseridos na equação 16, resultando na Equação 19, sendo esta utilizada para a estimativa de sedimentos em suspensão do rio Guamá. Portanto, a CSS em cada célula é estimada a partir do retroespalhamento do sinal

acústico do ADCP, e também em função dos coeficientes A e B, obtidos na calibração.

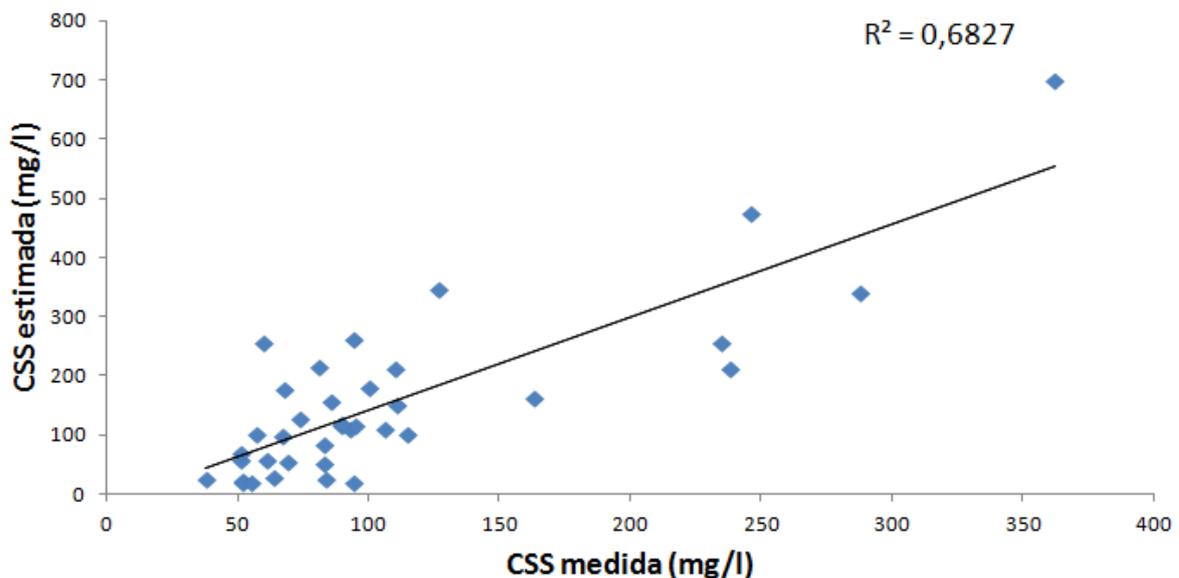
$$C_i = 10^{(E_{Ci} \cdot 0,0408 + 0,3482)} \quad (19)$$

Em que:

$C_i$  = Concentração de sedimento em suspensão ( $\text{mg.L}^{-1}$ );

$E_{Ci}$  = intensidade do eco correspondente à célula de número  $i$  (dB).

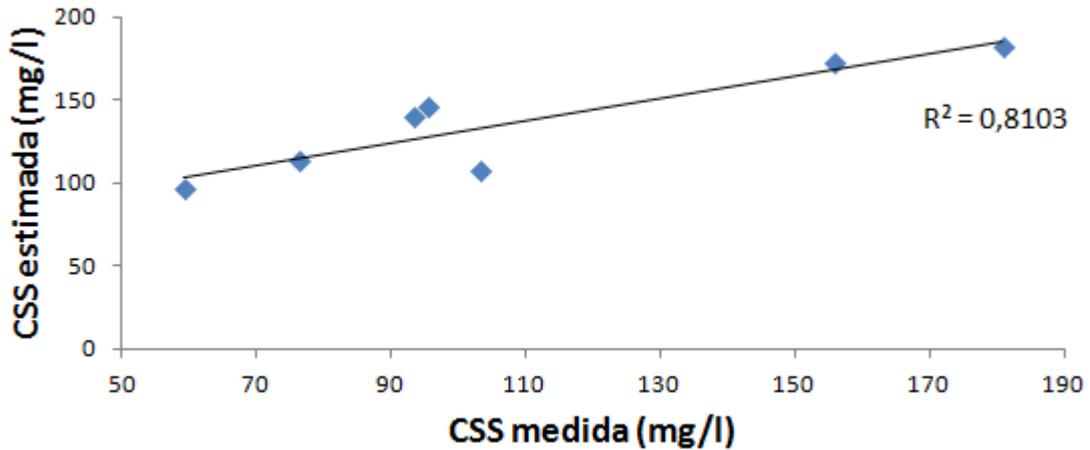
Com a Equação 19, os valores de retroespalhamentos foram convertidos em CSS. Deste modo, foi estimada a CSS do rio Guamá (Figura 20) e essas foram comparadas às concentrações obtidas pelas amostras coletadas em campo através do método de amostragem pontual (MAP) analisado anteriormente. Nesse caso, obteve-se um coeficiente de determinação  $r^2$  de 0,68 (Figura 37). Resultado semelhante foi obtido por Ávila (2014), Wang *et al.* (2000) e Xiufang *et al.* (2009).



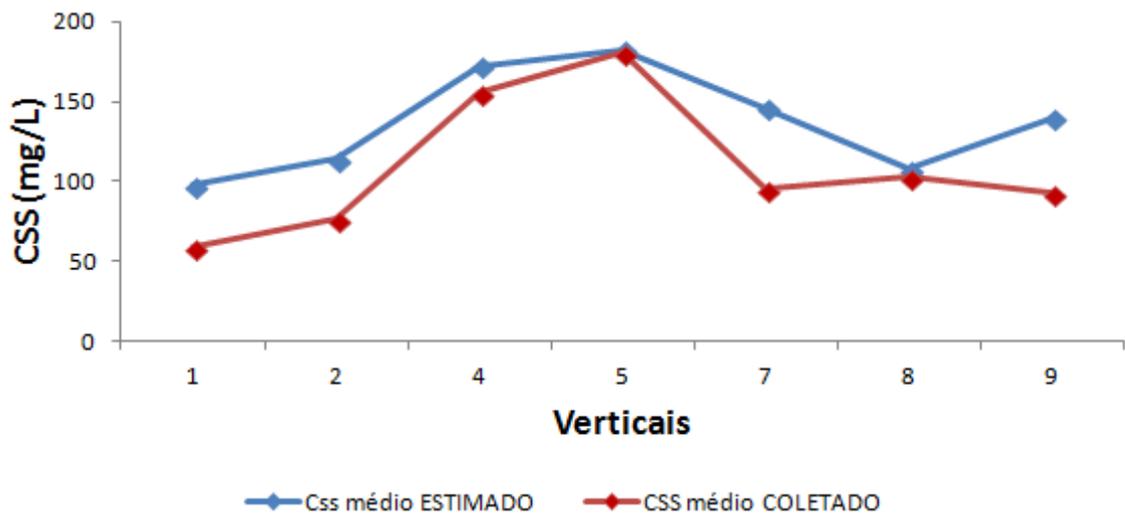
**Figura 39** - Regressão da CSS - MAPxADCP.

A Figura 39 mostra a CSS medida pelo MAP e estimada pela ADCP. Analisando a figura, é possível notar uma maior discrepância entre séries para as concentrações maiores. Esse aspecto pode ser visto também através da regressão linear entre concentrações com um  $R^2$  igual a 0,68, ou seja, a concentração de sedimentos estimada explica aproximadamente 70% das CSS medidas pelo método tradicional com melhores resultados para as baixas concentrações pontuais.

Assim como foi realizado na calibração, também se calculou a estimativa das concentrações médias nas verticais a partir dos valores médios de *ABS* nas verticais, gerando resultados satisfatórios com um  $R^2$  de 0,81 como mostra a Figura 38. Enquanto na Figura 39 é apresentada a comparação entre as concentrações médias nas verticais medidas através do MAP e estimadas através da ADCP. Nesse caso, pode-se constatar e reafirmar a razoável estimativa de CSS via ADCP.



**Figura 40** - Regressão das CSS Medida e CSS estimada média das verticais.



**Figura 41** - Gráfico comparativo CSS médio Estimado e Medido.

Assim, analisando-se as Figuras 37, 38 e 39, pode-se observar que a equação gerada para estimativa de sedimentos no rio Guamá (Equação 22), próximo a sua foz na baía do Guajará, apresentou bons resultados para concentrações pontuais e médias nas verticais, mesmo com as incertezas do método utilizado na coleta das amostras e nas medições com o ADCP.

## 6. CONCLUSÃO

O método utilizado estimou de maneira satisfatória as concentrações de sedimentos no rio Guamá. Contudo, é necessário fazer uma calibração da equação, pois cada estuário tem suas próprias características que influenciam nas concentrações de sedimentos.

O coeficiente de determinação  $R^2$  entre os valores estimados e os observados de CSS para concentrações pontuais foi de 0,68 e para as concentrações médias verticais foi de 0,81, confirmando assim, que a equação gerada consegue uma boa estimativa de CSS.

As limitações do trabalho são: a falta de precisão no método de coleta pontual, que gera uma incerteza da real localização dos pontos de coletas, isso dificulta localizar a célula de medição feita pelo ADCP para correlacionar os valores; e as interferências que por ventura podem ocorrer nas medições com o ADCP, causados por agentes biológicos ou bolhas de ar presentes no rio.

Em trabalhos futuros, recomenda-se realizar novas coletas de dados na mesma seção, a fim de melhorar a correlação, proporcionando uma melhor estimativa de sedimentos. Também, deve-se verificar se a equação de estimativa de sedimentos obtida nesse trabalho é capaz de estimar com a mesma precisão a CSS em outros rios da região com características semelhantes.

Além disso, pode ser analisado um novo método de conversão de dados acústicos para CSS que leve em consideração a velocidade da corrente, pois esta tem grande influência sobre a quantidade de sólidos em suspensão. Pois o transporte de sedimentos é proporcional à magnitude da velocidade do escoamento.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. (4 de 08 de 2017). *HIDROWEB*. Fonte: HIDROWEB: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>
- ANASTASIOU, S., Sylaios, G. K., & Tsihrintzis, V. A. (2015). Suspended particulate matter estimates using optical and acoustic sensors: application in Nestos River plume. *Environ Monit Assess*, 187-392.
- ÁVILA, R. A., Jr, O. O., & Andrade, M. M. (2014). Uso de um ADCP para Estimar Concentrações de Material Particulado em Suspensão para o Estuário da Lagoa dos Patos, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 299-309.
- BARANYA, S., & Józsa, J. (2013). Estimation of suspended sediment concentrations with ADCP in Danube River. *J. Hydrol. Hydromech*, 232-240.
- BARBOSA, J. F. (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). *Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 120.
- CARVALHO, N. D. (2008). *Hidrossedimentologia Prática*. Rio de Janeiro: Editora Interciência.
- DEINES, K. L. (1999). *Backscatter estimator using broadband Acoustic doppler current profilers*. San Diego, EUA: Proceedings Working Conference on Current Measurement.
- DINEHART, R., & Burau, J. R. (2005). Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river. *Journal of Hydrology*, 1-21.
- DORNELLES, A. M. (2009). Utilização de um perfilador acústico de correntes por efeito doppler (ADCP) para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS). *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 127.
- GAMARO, P. E. (2012). *Medidores Acústicos Doppler de Vazão*. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional.
- GARTNER, J. W. (2004). Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, 169-187.
- GOODING, D. J. (2001). Photo-optical sedimentation tube. *Proceeding of the 7th Federal Interagency Sedimentation Conference* (pp. 25-29). Nevada: Reno.

- GREGÓRIO, A. M., & Mendes, A. C. (2009). BATIMETRIA E SEDIMENTOLOGIA DA BAÍA DE GUAJARÁ, BELÉM, ESTADO DO PARÁ,. *Amazônia: Ci. & Desenv*, v.9, n.9.
- GUERRERO, M., Szupiany, R., & Amsler, M. (2011). Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation. *Flow Measurement and Instrumentation*, 392-401.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R., & WALKER, J. (2004). *Fundamentos da Física 2*. LTC.
- HOITINK, A., & Hoekstra, P. (2005). Observations of suspended sediment from ADCP and OBS measurements in a mud-dominated environment. *Coastal Engineering*, 103-118.
- HOLIDAWAY, 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*, 421-441.
- IBGE. (01 de 01 de 2014). *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Acesso em 07 de 07 de 2015, disponível em IBGE: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=150140&search=||in fogr%E1ficos:-informa%E7%F5es-completas>
- KOSTASCHUK, R., Best, J., Villard, P., Peakall, J., & Franklin, M. (2005). Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology*, 25-37.
- LEWIS, A. J., & RASMUSSEN, T. C. (1999). Determination of suspended sediment concentrations and. *Journal of Environmental Quality*, 1490-1496.
- MAYERLE, R., & POERBANDONO, W. C. (2002). Effectiveness of acoustical backscatter profiler in the estimation of suspended sediment concentration. *Coastal Engineering Laboratory, Institute of Geosciences, Cristian Albrechts University*, No. 16.
- MERCKELBACH, L. M., & Ridderinkhof, H. (2006). Estimating suspended sediment concentration using backscatterance from an acoustic Doppler profiling current meter at a site with strong tidal currents. *Ocean Dynamics*, 153-168.
- METEOROLOGIA, O. M. (1981). *Boletim de la OMM*. Genebra.
- PINHEIRO, R. V. (1987). Estudo hidrodinâmico e sedimentológico do Estuário Guajará-Belém/PA. Dissertação (Mestrado em Geologia), Belém, Pará: Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará.
- REICHEL, G. a. (1994). Suspended sediment monitoring in a fluvial environment. *Water Research*, 751-761.

- REICHEL, G., & NACHTNEBEL, H. P. (1994). Suspended Sedimento Monitoring in a Fluvial Environment: Advantages and Limitations Applying an Acoustic Doppler Current Profiler. *Water Research*, vol. 28 pp.751-761.
- SANTOS, I., FILL, H. D., SUGAI, M. R., BUBA, H., KISHI, R. T., & MARONE, E. (2001). *Hidrometria Aplicada*. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.
- SCHUCK, A. (2013). *Utilização do Acoustic Doppler Profiler (ADP) para estimativa da concentração de sedimento em suspensão (CSS) e Turbidez*. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria.
- SESMA. (2015). *Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade*. Fonte: <http://www.semas.pa.gov.br/diretorias/recursos-hidricos/gesir/>
- SIMPSON, M. R. (2001). *Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler*. SACRAMENTO, CALIFORNIA: United States Geological Survey.
- SONTEK. (2000). *Acoustic Doppler Profiler Principles of Operation*. Florida, USA: sontek.
- SONTEK, i. Y. (2009). *Manual do Sistema RiverSurveyor S5/M9*. San Diego: Sontek YSI.
- URICK, R. (1975). *Principles of Underwater sounds* (2a edição ed.). New York, United States of America: USGS Supply Paper 2395.
- WANG, Y.-p., shu, G., & kun-ye, L. (2000). A preliminary study on suspended sediment concentration measurements using an ADCP mounted on a moving vessel. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 183-189.
- XIUFANG, B., Siren, L., Dejun, G., Yougping, X., & Jingbo, J. (2009). Estimation of suspended sediment concentrations using Pulse-coherent Acoustic Doppler Profiler. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 260-265.