

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Curso de Graduação em Engenharia Hídrica



Trabalho de Conclusão de Curso

**Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão empregando
Perfiladores Acústicos Dinâmicos (ADCP) no Canal São Gonçalo - RS**

Gabriel Renz da Silva

Pelotas, 2021

Gabriel Renz da Silva

**Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão empregando
Perfiladores Acústicos Dinâmicos (ADCP) no Canal São Gonçalo - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Hídrica, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Hídrica.

Orientador: Professor Dr. Gilberto Loguercio Collares
Coorientador: MSc. George Marino Soares Gonçalves

Pelotas, 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

S586e Silva, Gabriel Renz da

Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão empregando perfiladores acústicos dinâmicos (adcp) no canal São Gonçalo - RS / Gabriel Renz da Silva ; Gilberto Loguercio Collares, orientador ; George Marino Soares Gonçalves, coorientador. — Pelotas, 2021.

93 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Hídrica) — Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2021.

1. Hidrologia. 2. Fluxos complexos. 3. Backscatter. 4. Descarga sólida. I. Collares, Gilberto Loguercio, orient. II. Gonçalves, George Marino Soares, coorient. III. Título.

CDD : 628

Gabriel Renz da Silva

**Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão empregando
Perfiladores Acústicos Dinâmicos (ADCP) no Canal São Gonçalo - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, como requisito parcial, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Hídrica, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 23 de novembro de 2021

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Orientador)

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria

MSc. Luciana Shigihara Lima

Mestre em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais -
INPE

Prof. MSc. Guilherme Krüger Bartels

Mestre em Recursos Hídricos na UFPel pela Universidade Federal de Pelotas -
UFPEL

Agradecimentos

Aos meus pais, Marlon e Cíntia pelo amor incondicional, pelos inúmeros conselhos, incentivos, suportes prestados, paciência e apoio em minhas decisões. Por me proporcionarem estar aqui vencendo uma das etapas para obtenção do diploma de bacharel. Com certeza, para eles, adjetivos faltam.

Às energias do além, Deus, Orixás e Buda, por ter me colocado no caminho de tanta gente especial e por cada oportunidade que me foi dada, pelo simples fato de viver.

A minha irmã, Maria Manuela, pelas risadas, carinho e amor. Aos meus avós Valdir, Dinorá, Teresinha e Renato, que sempre estiveram presentes, me amando, apoiando e vibrando com cada conquista. A minha namorada Mariana, pelas inúmeras horas de estudos, companheirismo, apreço e doçura com sua presença.

Aos amigos, Natan, Arthur, Eduardo, Matheus, Luiz e todos os outros que tiveram comigo durante esses anos de graduação, tornando os dias mais agradáveis.

A meus tios, Fábio, Tiago, Douglas, Viviane, Xirú, e padrinhos Cleusa e Osmar por todo o carinho, resiliência e compaixão em cada situação.

Ao meu estimado orientador professor Dr. Gilberto Loguercio Collares e ao querido coorientador MSc. George Marino Gonçalves, pela oportunidade de estar nas suas presenças e poder absorver um pouco de seus conhecimentos. A todo grupo NEPE HidroSedi, pelas experiências e saberes adquiridos, em especial ao professor Mestre Guilherme Kruger Bartels e ao Tecnólogo em Geoprocessamento e Técnico em Hidrologia Reginaldo Galski Bonczynski, ambos fundamentais para a compreensão de muitos os saberes alicerçados no presente trabalho.

Aos professores da Engenharia Hídrica por todos os ensinamentos, experiência, dedicação e motivação que me foi proporcionado, em especial para o professora Idel Milani, pela impecável maneira que ensina, dialoga e se preocupa com seus alunos.

À todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação, Obrigado.

"If you cause your ship to stop, and place the head of a long tube in the water and place the outer extremity to your ear, you will hear ships at a great distance from you"

Leonardo da Vinci (1490)

Resumo

SILVA, Gabriel Renz da. **Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão empregando Perfiladores Acústicos Dinâmicos (ADCP) no Canal São Gonçalo - RS.** 2021. 93f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Hídrica) – Curso de Graduação em Engenharia Hídrica, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

Quantificar a concentração de sedimentos em suspensão (CSS), embora difícil, é de fundamental importância para uma série de fatores relacionados ao meio ambiente e à hidrologia. Dessa forma, várias são as tecnologias estudadas visando o aperfeiçoamento da determinação desse material, como, por exemplo, o emprego de ADCPs (*Acoustic Doppler Current Profile*), que aplicam o efeito *Doppler* na interação da onda sonora com as partículas em suspensão para estimar a velocidade da água. Com os dados gerados pelos equipamentos é possível inferir sobre a CSS a partir da relação entre o ruído gerado pelo som ao colidir com as partículas e a relação sinal-ruído (*Signal to Noise Ratio* - SNR) medido pelo o equipamento. No entanto, autores da área defendem que tais dados de estimativa da CSS via ADCP ainda merecem ser melhor tratados e analisados, embora apresentem muitas relações plausíveis. Desse modo, visando contribuir para essa análise, este trabalho teve por objetivo avaliar as estimativas de CSS a partir da correção dos dados de SNR obtidos com um perfilador acústico dinâmico (ADCP) em duas seções no Canal São Gonçalo – RS, distantes 70km uma da outra. Totalizou-se 21 campanhas amostrais utilizando a técnica de amostragem por Integração da Vertical, junto a coleta de dados via ADCP, gerando um N amostral de 121 pares. A partir da construção do modelo de ajuste do SNR observou-se que em níveis maiores de CSS houve melhores correlações entre SNR corrigido e a CSS observada (por exemplo, R^2 da Seção 2 = 0,56). Por sua vez, quando menores os valores de CSS observada, verificou-se uma relação baixa ($R^2 = 0,10$ na Seção 1). Quando estimada a CSS composta para todos os perfis através do modelo construído, nota-se divergências relevantes entre o método tradicional e o aqui estudado. No entanto, entende-se que a ferramenta é possível de ser eficaz quando utilizadas equações melhores calibradas. Conclui-se então, que a utilização do ADCP para estimativa da CSS pode trazer contribuições significativas para o campo da hidrologia, especificamente no que tange a hidrossedimentologia.

Palavras-chave: Hidrologia. Fluxos complexos. *Backscatter*. Descarga sólida.

Abstract

SILVA, Gabriel Renz da. **Estimate of the Suspended Sediment Concentration from Dynamic Acoustic Profilers (ADCP) in the São Gonçalo Channel - RS.** 2021. 93f. Coursework (Undergraduate Course in Water Resources Engineering), Center of Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2021.

Quantifying the suspended sediment concentration (SSC), although difficult, there is a fundamental importance for a number of factors related to the environment and hydrology. Thus, there are several technologies studied aiming to improve the determination of this material, such as the use of ADCPs (Acoustic Doppler Current Profile), for example, which apply the Doppler effect in the interaction of the sound wave with suspended particles to estimate the water speed. Collected the data generated by the equipment, it is possible to infer the SSC from the relationship between the noise generated by the sound when colliding with the particles and the signal-to-noise ratio (Signal to Noise Ratio - SNR) measured by the equipment. However, authors in this field argue that such data for estimating SSC via ADCP still deserve to be better treated and analyzed, although there are many plausible relationships. Thus, aiming to contribute to this analysis, this work aimed to evaluate the SSC estimates from the correction of SNR data obtained with a dynamic acoustic profiler (ADCP) in two sections in the São Gonçalo Channel - RS, 70km away from one of the other. A total of 21 sampling campaigns was done by using the Vertical Integration sampling technique, together with data collection via ADCP, generating a sample N of 121 pairs. From the construction of the SNR adjustment model, it was observed that at higher levels of SSC there were better correlations between corrected SNR and observed SSC (for example, R^2 in Section 2 = 0.56). In turn, when the observed SSC values were lower, there was a low relationship ($R^2 = 0.10$ in Section 1). When estimating the composite SSC for all profiles through the constructed model, relevant divergences between the traditional method and the one studied here can be noted. However, it is understood that the tool is possible to be effective when using better-calibrated equations. It is therefore concluded that the use of ADCP to estimate SSC can bring significant contributions to the field of hydrology, specifically with regard to hydrosedimentology.

Keywords: Hydrology. Complex flows. Backscattering. Solid discharge

Lista de Figuras

Figura 1 - Composição e tipo das cargas sólidas transportadas em um curso d'água. Fonte: MARCONDES, 2011.....	19
Figura 2 - Distribuição dos sedimentos na coluna d'água. Fonte: Subcommittee on sedimentatio (1963), citado por Carvalho (2008).....	21
Figura 3 – Representação da velocidade de trânsito e volumes amostrados pelo método do Igual Incremento de Largura - IIL. Fonte: CARVALHO, 2000.	27
Figura 4 – Exemplo do gráfico de vazão acumulada, com as distâncias para posicionamento da amostragem e a seção batimétrica gerada pelo Software HidroSedimentos. Fonte: Próprio autor	28
Figura 5 – Frequência (a) constante quando não há movimento percebido entre emissor (fonte) e receptor, e (b) alterada quando há movimento, por exemplo, da esquerda para a direita por parte do emissor. Fonte: ANA, 2014.....	29
Figura 6 – Equipamento SonTek-IQ® (A), e o equipamento Argonaut Side-looker SL-500 (B), ambos da fabricante SonTek. Fonte: Próprio autor.....	31
Figura 7 – RiverSurveyor® M9 a) preparado para medição (acoplado a prancha e ao barco) e b) vemos os 9 transdutores do equipamento em detalhe e c) os feixes emitidos em direção ao leito pelo equipamento, angulados em 25°. Fonte: Próprio autor.....	32
Figura 8 – Medição da velocidade nas três direções. (a) Camada homogênea e (b) camada não homogênea. Fonte: Simpson, 2001.....	33
Figura 9 – Comparação ADCP e número de molinetes. Fonte: GAMARO, 2012.	33
Figura 10 – Áreas não medidas (blanking areas). Fonte: Adaptado de SIMPSON, 2021.	34
Figura 11 – Representação da área de interferência do feixe Side lobe. Fonte: Modificado de SIMPSON, 2001.....	35
Figura 12 – Mapas da região na qual se insere a bacia hidrográfica da Lagoa Mirim-São Gonçalo, o Canal São Gonçalo, e as seções de monitoramento utilizadas neste trabalho.....	45
Figura 13 – Fluxograma dos processos realizados durante o trabalho. Fonte: Próprio autor.....	46

Figura 15 – Destaque da tela do software RiverSurveyor Live® (SonTek) com informações disponibilizadas pelo ADCP, como: Número de Verticais (Verde), Duração da Medição (Amarelo), Vazão total (Vermelho). Fonte: Próprio Autor.	47
Figura 16 – Seção 1 (Campus Anglo), com a representação da velocidade absoluta (m/s) nas células, apresentado pelo software RiverSurveyor Live® (SonTek). Percebe-se também, as zonas brancas abaixo do perfil não medidas (blank areas). Fonte: Próprio autor.	48
Figura 17 – Visualização em zoom do SNR medido pelo ADCP. Fonte: Próprio autor.....	50
Figura 18 - Exemplo das 6 verticais definidas pelo método IID no perfil transversal de uma das seções amostradas. Fonte: Próprio autor.....	51
Figura 19 – Amostradores na vertical utilizados. A) D-49 e b) DH-59. Fonte: Próprio autor.....	51
Figura 20 – Fluxograma dos processos laboratoriais para determinação da CSS das amostras físicas água-sedimento. Fonte: Próprio autor.	52
Figura 21 – Sistema montado para execução do método de filtração das amostras. Fonte: Próprio autor.....	53
Figura 22 – Membranas filtrantes e as partículas sólidas retidas. Fonte: Próprio autor.....	53
Figura 23 - Exemplificação da escolha das verticais para o estudo nos 4,6 metros de profundidade, limitado pela distância da amostragem física. Fonte: Próprio autor.....	56
Figura 24 - Resumo da metodologia seguida para a construção da estimativa de CSS através de dados de SNR. Fonte: Próprio autor.	57
Figura 25 - Gráfico da regressão linear de todos os pontos da Seção 1 pela vertical da direita, com o coeficiente de determinação de 0,1124. Fonte: Próprio autor.	64
Figura 26 - Gráfico da regressão linear com a vertical principal e todos os pontos da Seção 2, com o coeficiente de determinação aproximado de 0,66. Fonte: Próprio autor.....	64

Figura 27 - Gráfico da regressão linear entre Log10(CSS) e SNRcorrigido para a Seção 2 , Santa Isabel do Sul. Apresenta-se os coeficientes A e B. Fonte: Próprio autor.....	66
Figura 28 - Gráfico da regressão linear entre Log10(CSS) e SNRcorrigido para a Seção 1, Campus Anglo - Pelotas. Apresenta-se os coeficientes A e B. Fonte: Próprio autor.....	67
Figura 29 - Gráfico da Seção 1 (A) - Anglo e 2 (B) - Santa Isabel do Sul da relação 1:1 entre a CSS observada e a estimada, com os valores de R ² , MAE, RMSE, Ea10, Ea50, Ea90, além do número de amostras. Fonte: Próprio autor.	69
Figura 31 - Gráfico da Seção 1 da relação entre a CSS estimada e os resíduos gerados. Fonte: Próprio autor.	69
Figura 32 - Gráfico da Seção 2 da relação entre a CSS estimada e os resíduos gerados. Fonte: Próprio autor.	70
Figura 33 - Perfis de CSS estimados via SNR das medições dos dias 08/10 (A), 14/10 (B) e 05/11 (C) de 2019 na Seção 1 (Pelotas). Fonte: Próprio autor. .	71
Figura 34 - Perfis de CSS estimados via SNR das medições dos dias 26/06 (A), 03/07 (B) e 09/07 (C) de 2019, medidos na Seção 2 (Santa Isabel do Sul). Fonte: Próprio autor.....	71

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Métodos de medição para descarga sólida em suspensão	22
Tabela 2 - Medidas de vazão realizadas na Seção 1 – Pelotas.....	48
Tabela 3 - Medidas de vazão realizadas na Seção 2 – Santa Isabel do Sul.	49
Tabela 4 - Tabela do valores da CSS (mg/l) resultantes de cada vertical amostrada em ambas as seções. Fonte: Gonçalves, 2020.....	54
Tabela 5 - Quadro resumo dos SNRs (dB) resultantes de cada vertical amostrada na Seção 1 - Anglo, Pelotas.....	59
Tabela 6 - Quadro resumo dos SNRs (dB) resultantes de cada vertical amostrada na Seção 2 – Santa Isabel do Sul.	61
Tabela 7 - Comparação das amplitudes cada relação estudada. Fonte: Próprio autor.....	65

SUMÁRIO

1. Introdução	14
2. Objetivo	16
2.1 Objetivos Específicos	16
3. Hipótese	16
4. Revisão de Literatura	17
4.1. Transporte Fluvial de Sedimentos.....	17
4.2 Medição do Transporte de Sedimento em Suspensão	21
4.2.1 Amostragem e Determinação da CSS pelo Método Convencional.....	25
4.3 ADCPs e Base Teórica	29
4.3.1 Perfiladores Acústicos	30
4.3.2 Equação do sonar e a correção do SNR medido.....	35
4.4 Contexto do Ambiente Pesquisado	42
5. Material e Métodos	44
5.1 Local de Estudo	44
5.2 Roteiro de Campo	45
5.3 Obtenção dos dados com ADCP dinâmico	47
5.4 Obtenção de dados da amostragem por Integração da Vertical	50
5.5 Determinação da CSS em Laboratório	52
5.6 Construção do modelo para estimativa da CSS via SNR	55
6. Resultados	59
6.1 SNRs selecionados	59
6.2 Escolha da vertical representativa	63
6.3 Construção do Modelo	65
6.3.1 Correção do SNR medido.....	66
6.3.2 Modelos de estimativa da CSS.....	67
6.4 Análise dos erros calculados.....	68
6.5 Plotagem dos Perfis a partir da CSS estimada	70
6.6 Discussões.....	72
7. Considerações Finais	78
8. Referências	79
APÊNDICE A – Valores obtidos de CSS estimada e os erros gerados (Resíduo, MAE e RSME) para as 2 seções.	86

APÊNDICE B – Valores de CSS estimada, comparação da CSS composta medida e valores da diferença entre ambas para cada seção.	91
---	-----------

1. Introdução

O transporte de sedimentos nos cursos d'água é fundamental para uma variedade de tópicos devido ao impacto físico e/ou químico dessa variável nos ecossistemas aquáticos e ribeirinhos (RUBEN, 2020). A quantificação é exigida em estudos, planejamentos, projetos e operações de obras, como por exemplo, a geração de energia, abastecimento d'água, navegação, assim como, na previsão, alerta e controle de cheias (CARVALHO, 2008).

Os cálculos da descarga de sedimentos também estão associados ao assoreamento de reservatórios, perdas e ganhos de faixas de areias em praias doces e salgadas, além de estudos envolvendo impactos ambientais associados a poluentes (BURKHAM, 1985; SANTOS, 2001; GAMARO, 2012; CARVALHO, 2014). Nesse contexto complexo, entender a dinâmica fluvial dos sedimentos se torna fundamental para melhor aplicação e geração de resultados eficientes na gestão dos recursos hídricos.

Apesar da importância do transporte de sedimentos nos sistemas naturais, esse é um dos elementos menos quantificados dentro da hidrometria (RUBEN, 2020). Isso ocorre porque os métodos de quantificação tradicionais do transporte de sedimentos em rios ainda envolvem procedimentos laboratoriais com alto custo, além de medições confiáveis e previsões quantitativas serem complexas (GUERRERO, 2011). Em alguns casos, as campanhas para amostragens se tornam melindrosas, fisicamente impossíveis ou inseguras para os técnicos de campo (GRAY et al., 2010).

Uma das formas para quantificar e estimar a descarga sólida de um corpo hídrico é pela amostragem de sedimentos em suspensão (partículas presentes na coluna d'água). Para Carvalho (2008), a descarga sólida em suspensão representa a maior quantidade de carga sólida transportada no curso d'água, sendo mais fácil de ser medida, de ser analisada e de ser calculada. O autor afirma também que, a taxa de descarga sólida em suspensão presentes na coluna d'água corresponde normalmente de 80% a 95% da descarga total de sedimentos e varia de acordo com as condições geográficas do canal.

A metodologia tradicional para a coleta de dados de sedimentos em suspensão, realizada regularmente a mais de 100 anos, é por meio de amostragens em verticais pré-estabelecidas na seção transversal do curso d'água de interesse e quantificação

posterior em laboratório (GRAY e LANDERS, 2014). Essa coleta resulta em dados de concentração de sedimentos em suspensão (CSS) em uma posição específica (pontual) ou de um segmento (vertical) numa seção de rio, que posteriormente através de equações serão extrapolados para todo o perfil (SANTOS, 2001).

No entanto, a técnica convencional de amostragem tem se mostrado menos vantajosa quando comparada às técnicas recentes em desenvolvimento. Como explicado na literatura, as principais desvantagens da técnica convencional estão relacionadas à necessidade do uso de equipamentos pesados, como o conjunto guincho e amostrador, à exigência de um longo tempo embarcado, e ao alto grau de perigo quando realizadas durante eventos hidrológicos extremos (SANTOS, 2001; CARVALHO, 2008). Em relação aos dados gerados, segundo os autores, pode-se entender que esses possuem um valor elevado de incertezas, já que são oriundos de algumas coletas pontuais e extrapolados para toda a seção.

Muitas são as pesquisas que se esforçam em apresentar alternativas para a substituição do método convencional. Uma das metodologias promissoras é a quantificação da carga sólida em suspensão com o auxílio de equipamentos perfiladores acústicos, também conhecidos como ADCPs (*Acoustic Doppler Current Profilers*). Os equipamentos ADCPs já vem sendo utilizados para realização de medidas de vazão e de correntes bidirecionais, sendo sua aplicabilidade para medição da velocidade de fluxo tratada por autores como SIMPSON (2001), GAMARO (2012), MUELLER, (2013), entre outros. No entanto, alguns outros estudos também têm encorajado o seu uso na quantificação dos sedimentos em suspensão (THORNE, 1991, 1993, 1994; HOLDWAY, 1999; DEINES, 1999; GARTNER, 2002, 2004; DEFENDI, 2010; HAUN, 2018; SAKHO, 2019; WOOD ET AL., 2019; MANIK, 2020; WOSIACKI, 2020, 2021), entre outros.

Para a quantificação dos sedimentos em suspensão, entende-se que através da intensidade de retorno do sinal acústico medida pelos ADCPs, também chamado de *backscatter* ou taxa do ruído do sinal (SNR), aliada às características do meio, é possível compreender a distribuição do sedimento na coluna d'água e, dessa forma, inferir sobre o fluxo de sedimento no corpo hídrico (HAUN, 2018). Ou seja, a partir da intensidade do eco de retorno, um subproduto gerado pelas medições de velocidade, estima-se quantitativamente a CSS (GARTNER, 2002).

Dada a possibilidade de utilização dos ADCPs e comparando-os aos métodos tradicionais, se viabilizaria um maior arranjo espacial de dados resultando em inferências de descarga sólida mais detalhadas, reduziria o tempo de operação e conseqüentemente os custos envolvidos, e além disso, se ofereceria simultaneamente o perfil de velocidade e características de turbulência (WOSIACKI, 2020). Dessa forma, sua aplicação teria potencial prático no gerenciamento de obras hídricas, estudos de bacias hidrográficas e cálculo da vida útil de reservatórios (SCHUCK 2013).

Tendo em vista a necessidade de aprimorar os métodos de quantificação de sedimentos em suspensão e contribuindo com os avanços da técnica, este estudo visa aplicar a equação do SNR corrigido com uso do ADCP dinâmico (em movimento e na posição vertical) para estimar a CSS em duas seções monitoradas do Canal São Gonçalo, Rio de Grande de Sul (RS).

2. Objetivo

Avaliar as estimativas de concentração de sedimento em suspensão (CSS) a partir da correção dos dados de SNR obtidos com um perfilador acústico dinâmico em duas seções do Canal São Gonçalo.

2.1 Objetivos Específicos

- Corrigir o SNR medido (indicador do ruído do sinal, ou também a intensidade do eco refletido);
- Desenvolver dois modelos capazes de estimar a CSS a partir do SNR nas duas seções em estudo;
- Estimar a CSS de forma discretizada nas seções estudadas.

3. Hipótese

A relação entre CSS e SNR corrigido obtido por equipamentos perfiladores acústicos dinâmicos é uma metodologia adequada para estimar a concentração de sedimento em suspensão de forma discretizada no Canal São Gonçalo.

4. Revisão de Literatura

Para a completa abordagem da possível estimativa da CSS empregando equipamentos acústicos decidiu-se por contextualizar o transporte de sedimento em meio aquoso assim como as técnicas tradicionais para quantificação do sedimento em suspensão, bem como suas características e usos. Por fim, descreve-se os fundamentos e funcionalidades dos ADCPs e também as equações basilares para a relação da CSS com o SNR observado e corrigido.

4.1. Transporte Fluvial de Sedimentos

O fluxo do escoamento, gerado após a interceptação da precipitação na bacia hidrográfica, flui em seu movimento natural ao ponto de menor altitude da bacia (exutório) (TUCCI, 1993). De acordo com Bordas e Semmelmann (1993), os obstáculos que a água encontra limitam os caminhos que ela vai percorrer e a velocidade com que se deslocará, além de dissipar boa parte de sua energia na colisão com obstáculos, ocasionando, muitas vezes, a remoção e transporte dos fragmentos sólidos rio abaixo.

Dessa forma, o sedimento é entendido como um material fragmentar transportado, suspenso na água ou ar, ou acumulado em leitos de rios por agentes naturais (EDWARDS e GLAYSSON, 1988). No ciclo hidrológico, os sedimentos são transportados para cursos d'água pelo escoamento das águas pluviais, podendo também, ter origem erosiva do próprio corpo hídrico e pelos impactos gerados pelo fluxo nas margens e no leito (CARVALHO, 2014). Além disso, Santos (2001) acrescenta que a maior parcela de sedimentos presentes nos cursos de água é proveniente da remoção detrítica das vertentes, nome dado às regiões das cabeceiras da bacia.

Entende-se que para as partículas serem transportadas a energia do fluxo necessita ser suficiente para forçá-las a saírem do momento de inércia (GARCIA, 2008). Dessa maneira, o ciclo sedimentológico é acionado pela energia de que dispõe a água em movimento (TUCCI, 2000). Assim, quanto mais densa a partícula, mais energia necessita para o seu transporte. Existindo um fluxo variável e dependendo das características da partícula de sedimento, como forma e densidade, as partículas

sólidas podem ser transportadas ou depositadas, estabelecendo assim, diferentes formas de transporte (CHRISTOFOLETTI, 1977).

Quando realizado o estudo dos sedimentos em uma bacia natural, o entendimento do transporte de sedimento é fundamental para compreendermos tanto a mecânica do escoamento e a produção de sedimentos, quanto para explicar as essências dos processos físicos de vários fatores envolvidos, e desenvolver assim modelos matemáticos de produção de sedimentos (XIAOQING, 2003). A capacidade de compreensão de como os processos hidrossedimentológicos de uma bacia hidrográfica respondem aos efeitos do uso e manejo do solo depende, fundamentalmente, do monitoramento adequado de variáveis que estão envolvidas no processo (MINELLA, 2011).

Para estudar os problemas de sedimentação presentes em um sistema fluvial, levantamentos hidrossedimentológicos em trechos de rios, reservatórios e em áreas estuarinas são indispensáveis (XIAOQING, 2003). O monitoramento hidrossedimentométrico, aplicando uma metodologia convencional, baseia-se na obtenção de uma série temporal de dados de precipitação, vazão e concentração de sedimentos, que possibilitam dessa forma, o cálculo do transporte de sedimentos (MINELLA, 2011). O fluxo de sedimentos pode ser caracterizado pela descarga sólida em suspensão, que será aprofundado a seguir, e a sua produção de sedimentos, que é a integração do fluxo no tempo (VANONI, 1975).

Nesse sentido, a medição do transporte de sedimentos tem o propósito de revelar, para o corpo hídrico de interesse, a quantidade de sedimentos que passa em uma seção transversal por unidade de tempo (SANTOS, 2001). As faixas ou seções transversais são espaçadas em intervalos apropriados em um canal e geralmente configuradas para servir também como uma parte da rede de monitoramento do transporte de sedimentos (XIAOQING, 2003).

Assim sendo, o processo de transporte fluvial de sedimentos pode distinguir-se em três tipos de cargas: dissolvida, em suspensão e do leito (Figura 1). Conforme Santos (2001), a carga dissolvida é composta pelos constituintes intemperizados das rochas, transportados em solução química principalmente pelo escoamento subterrâneo. Já a carga de leito, segundo o autor, é composta por partículas de granulometria maior, como as areias e cascalhos, que permanecem junto ao fundo do canal e são transportadas por meio da saltação e do arraste (deslizamento ou

rolamento na superfície do leito). Por fim, tem-se a carga em suspensão caracterizada pelas partículas presentes na coluna d'água e inerentes ao fluxo. Já para Xiaoqing (2003), de acordo com o modo de movimento dos sedimentos no rio, a carga de sedimentos pode ser classificada apenas de duas maneiras, carga suspensa ou carga de fundo, excluindo assim a forma dissolvida.

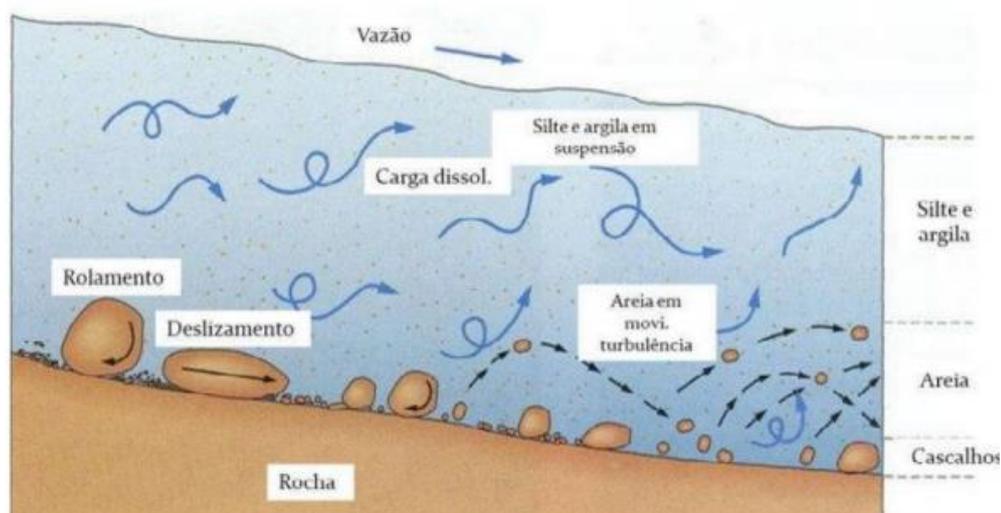


Figura 1 - Composição e tipo das cargas sólidas transportadas em um curso d'água. Fonte: MARCONDES, 2011.

Conceitualmente, o termo “descarga sólida” é definido como a massa total de sedimentos que passa em uma seção transversal do rio por unidade de tempo, geralmente expressa em toneladas por dia, diferentemente do termo “carga de sedimentos”, que diz respeito ao tipo de material transportado (VANONI, 2006).

A medição da descarga sólida em suspensão destaca-se e é a mais encontrada dentro de estudos científicos. A razão é que a descarga sólida em suspensão representa a maior quantidade de carga sólida do curso d'água, geralmente varia entre 80 a 95% da descarga total, variando de acordo com as características do curso d'água e da posição da seção estudada, além de ter relação com a velocidade do fluxo, do tipo de escoamento, da profundidade, da granulometria e de outros fatores (Carvalho, 1994; Carvalho et al., 2000; Carvalho, 2014). Ainda conforme essa literatura, a descarga sólida em suspensão é mais fácil de ser medida, de ser analisada e de ser calculada, e é requerida na maioria dos serviços hidrossedimentológicos (reservatórios para abastecimento de água, hidrelétricas, entre outros). Além disso, Santos (2001) salienta que há boa correlação direta entre a

concentração do material em suspensão e o valor da vazão para uma mesma seção transversal.

Dessa maneira, o objeto de estudo do presente trabalho será o material em suspensão, e a sua relação com o sinal acústico. O sedimento em suspensão é definido como sendo a fração mais fina do material (silte e argila, por exemplo) conduzido no fluxo em que as forças provocadas pela ação da turbulência do fluido superam a ação da gravidade, impedindo a deposição das partículas (GARCÍA, 2008). Assim, considera-se, praticamente, que as partículas fluem na mesma velocidade do fluxo (SANTOS, 2001). A descarga sólida em suspensão unitária (q_{ss}) pode ser obtida pela integração do produto da velocidade do fluido (u), pela concentração média entre os limites superior (nível da água) e inferior (y_0) do transporte em suspensão, expressa da seguinte forma (TUCCI, 2000):

$$q_{ss} = \int_{y_0}^d u c dy$$

Simplificando, pode-se definir a descarga sólida média em suspensão (q_{ss}) por unidade de largura de uma seção como sendo:

$$q_{ss} = c * q$$

onde:

q = vazão por unidade de largura da seção transversal de um rio ($m^3/s.m$);

c = concentração média da suspensão por unidade de largura ($t/s.m$).

Outra constatação importante é que as partículas em suspensão, quando analisadas em uma seção transversal, variam tanto verticalmente quanto horizontalmente. As partículas maiores têm uma distribuição na vertical que cresce da superfície para o leito, enquanto os sedimentos finos, como silte e argila, apresentam uma distribuição praticamente uniforme ao longo da vertical (Figura 2) (SANTOS, 2001).

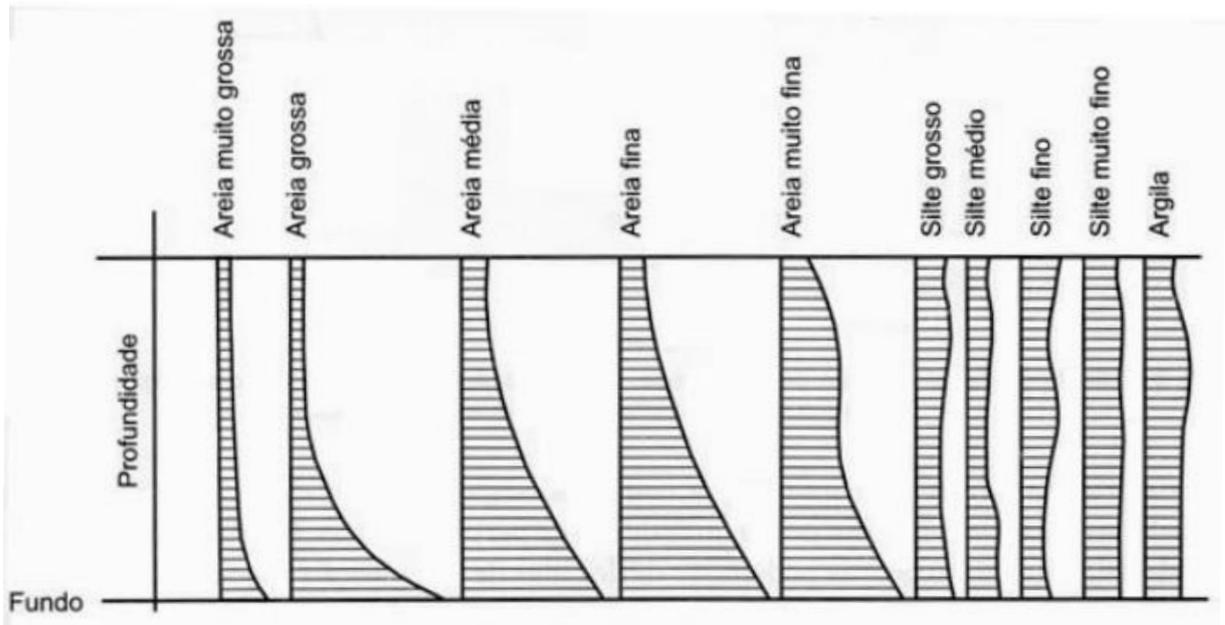


Figura 2 - Distribuição dos sedimentos na coluna d'água. Fonte: Subcommittee on sedimentatio (1963), citado por Carvalho (2008).

4.2 Medição do Transporte de Sedimento em Suspensão

A medida do transporte de sedimento em suspensão pode ser feita de várias maneiras e metodologias. Para águas paradas ou escoamentos com baixas velocidades podem ser usados instrumentos desenvolvidos para coleta de qualidade de água, como por exemplo os amostradores Kemmerer e Ambuehl, já para águas fluviais, que escoam com maior velocidade ($>0,1$ m/s) necessita-se utilizar equipamentos que assegurem que as velocidades de escoamento do rio e de ingresso da amostra no coletor se assemelham (TUCCI, 2000). Ainda segundo o autor, as diferenças entre as duas velocidades (aceleração ou retardo) podem gerar uma divisão parcial das duas fases do escoamento e, conseqüentemente, uma alteração da concentração da mistura água-sedimento.

Como o presente trabalho é direcionado ao canal São Gonçalo - RS, que apresenta fluxos na maior parte do tempo maiores que $0,1$ m/s, uma das formas de tratar da medição do transporte de sedimento no meio pode ser por métodos diretos e indiretos (CARVALHO, 1994). Segundo o autor, os métodos diretos caracterizam-se pela simplicidade, pois realizam a medida da variável de interesse *in loco*, em tempo real e os cálculos são elementares. No entanto, são considerados imprecisos

e menos confiáveis quando comparados aos métodos indiretos. Os indiretos, por sua vez, dependem mais tempo e exigem cálculos mais sofisticados. A medição indireta relaciona a variável resposta (amostra de solução água-sedimentos) com dados coletados a partir da medida de grandezas secundárias (por exemplo, cota ou vazão). A Tabela 1 apresenta as metodologias mais comuns da literatura de quantificação de sedimentos em suspensão.

Tabela 1 - Métodos de medição para descarga sólida em suspensão.

Descarga Sólida	Medição	Descrição	Equipamento ou metodologia de medida
Descarga sólida em suspensão	Indireta	Coleta de sedimento por amostragem da mistura água-sedimento, análise de concentração e granulometria e cálculos posteriores da descarga sólida.	Diversos tipos de equipamentos: – de bombeamento, equipamentos que usam garrafas ou sacas, sendo pontuais instantâneos, pontuais por integração e integradores na vertical (no Brasil usa-se principalmente a série norte-americana – U-59, DH-48, DH-59, D-49, P-61 e amostrador de saca).
		Uso de fotos de satélite e comparação com medidas simultâneas de campo para calibragem, em grandes rios.	São estabelecidas equações que correlacionam as grandezas de observação das fotos com as concentrações medidas.
	Direta	Usa equipamentos que medem diretamente no curso d'água a concentração ou outra grandeza como a turbidez ou ultra-som.	Medidor nuclear (portátil ou fixo), Ultra-sônico ótico, Ultra-sônico Doppler de dispersão, turbidímetro, ADCP (Doppler).
		Por acumulação do sedimento num medidor (proveta graduada).	Garrafa Delf (medição Pontual e Concentração alta).

A medição indireta pela coleta de sedimento por amostragem da mistura água-sedimento com a análise de concentração e granulometria em laboratório é o método mais utilizado. Nessa abordagem, se usa equipamentos que, quando mergulhados na coluna d'água, permitem a entrada e o armazenamento da solução água-sedimento no seu interior de acordo com a velocidade do fluxo pré-calculado. O recipiente é encaminhado ao laboratório onde, após processos de filtragem e secagem, chega-se ao valor da concentração de sedimentos por volume de solução, geralmente em gramas por litro. Wosiacki (2020), no entanto, afirma que também há grandes incertezas no emprego dessas técnicas. Além disso, quando comparada com novas tecnologias alternativas, como explicado anteriormente, tornam-se desvantajosas (SANTOS, 2001; CARVALHO, 2008). Outra situação, é que devido ao caráter mutável dos materiais suspensos em alguns ambientes com condições hidrodinâmicas complexas, mesmo com coleta de amostras frequentes, essa não é capaz de definir com precisão uma série temporal de material suspenso, pois é altamente variável (espacial e temporalmente) pelas correntes de marés, profundidade da água e efeitos do vento (GARTNER, 2004).

Uma abordagem muito promissora para lidar com as desvantagens do método convencional é o uso de tecnologias substitutas com enfoque em métodos alternativos *in situ* para medir a dinâmica de transporte de sólidos (WOSIACKI, 2020). Uma dessas tecnologias é o uso do sensoriamento remoto através de imagens de satélites (RONG-RONG LI, 2003; UMAR, 2018; CREMON, SILVA, MONTANHER, 2019) e de VANTs - Veículos Aéreos Não Tripulados - (LARSON, 2018) para medidas de concentração de sedimentos através dos espectros de luz. No entanto, os resultados apresentados conseguem apenas avaliar a concentração com certo grau de acurácia próximo a superfície e ainda não são conclusivos para maiores profundidades.

Os equipamentos de amostragem de sedimento em suspensão do tipo direto (medição *in situ* da CSS) têm sido desenvolvidos ultimamente e tem permitido números mais precisos e práticos. Dessa maneira, os equipamentos medem diretamente no curso d'água a concentração ou outra grandeza para criar relações diretas para a CSS. O turbidímetro, equipamento que realiza a medição da turbidez em um ponto fixo, é um exemplo. Conceitualmente, a turbidez pode ser explicada como uma manifestação das características ópticas da coluna d'água, que faz com que os raios de luz sejam espalhados e absorvidos em vez de transmitidos em linhas

retas através da água (ZIEGLER, 2003). Esses equipamentos são alternativas consideráveis para coleta de dados de CSS, pois superam a limitação da profundidade e tem bons resultados para CSS na literatura, no entanto, são limitados a medições pontuais e não são facilmente aplicáveis para aplicações de mapeamento (WOSIACKI, 2020). Para uma possível utilização do instrumento é necessário calibrá-lo, convertendo o sinal medido em valores de CSS (GRAY e GARTNER, 2009). No entanto, citando Downing (1996), os autores explicam que a calibração desses instrumentos é complexa, porque a função de resposta do sensor OBS (sinal do *backscatter* ótico) depende do tamanho do grão e não é linear com a concentração. Além disso, os sensores ópticos são seriamente suscetíveis a problemas de incrustação biológica, que resulta em uma tendência de deslocamento da curva de calibração para valores maiores ao longo do tempo, em escalas de dias ou mais, particularmente em águas mais quentes e microbiologicamente ativas (GRAY e GARTNER, 2009). Por isso, apenas alguns dias de dados podem ser coletados em corpos hídricos altamente produtivos, a menos que os sensores ópticos sejam limpos com frequência (GARTNER, 2004).

Dentre os medidores diretos, existem ainda equipamentos de fabricação francesa e holandesa, como o amostrador Neyrpic e a garrafa Delft para sedimento em suspensão. Nesses equipamentos há acumulação do sedimento no medidor (CARVALHO, 2008). Segundo o autor, a determinação da concentração de sedimentos pela garrafa Delft é feita em uma proveta graduada onde a amostra é colocada com uso de funil e, após um período há decantação do material particulado mais pesado e faz-se a leitura na separação da água turva e da água límpida.

Os equipamentos acústicos que utilizam o efeito Doppler, que mesmo embora existam outras nomenclaturas específicas, são comumente chamados de ADCPs. Esses equipamentos já são utilizados de maneira consolidada e ampla na medição da vazão instantânea dos rios, existindo desse tipo no país (GAMARO, 2012). Baseado em procedimentos de calibração junto ao meio em análise, estudos acústicos usando intensidade de eco de retorno provindo do uso dos ADCPs também são capazes de fornecer informações temporais e espaciais da CSS, que antes eram difíceis, senão impossíveis de se obter (DEINES, 1999). Além disso, esses equipamentos são muito menos suscetíveis a aglutinação de material biológico e provêm uma estimativa de

CSS não intrusiva, além de medirem a velocidade do fluxo no mesmo momento que coleta dados de CSS (GARTNER, 2004).

A CSS diz respeito à concentração de sedimentos em suspensão em uma seção transversal do curso d'água, sendo essa concentração uma grandeza fundamental para inferirmos sobre o valor de descarga sólida após aplicação de equações disponíveis na literatura. Segundo Xavier et al. (2012), estimar a CSS é fator essencial no entendimento do comportamento dos sedimentos em cursos d'água, assim como, representa um dos principais fatores na estimativa e determinação de taxas de sedimentação, e ou, dinâmicas de fluxo.

4.2.1 Amostragem e Determinação da CSS pelo Método Convencional

A amostragem de sedimento em suspensão pode ser feita por diversos métodos, dependendo do tipo de equipamento disponível (SANTOS, 2001). Geralmente a descarga de sedimentos é feita dividindo-se uma seção transversal em várias seções menores e realizando amostragem de sedimentos na vertical dentro da seção que ela representa (XIAOQING, 2003). Como a concentração de sedimento é variável ao longo da seção (NORDIN, 1981) e ao longo da coluna d'água (CARVALHO, 2014), a seção necessita ser dividida nessas subverticais para nelas aplicarmos técnicas de amostragem, assim representado da melhor maneira possível a seção em estudo.

Dentre os métodos indiretos, sendo estes considerados como a metodologia convencional para determinação da descarga sólidas em suspensão ou da CSS, os mais comuns são: amostragem pontual (instantâneo ou por integração) ou de amostragem por integração da vertical (CARVALHO, 2014). As amostragens pontuais são mais utilizadas em trabalhos específicos ou científicos, sendo a mais rotineira a integração na vertical, porque permite a obtenção da concentração e da granulometria média na vertical (CARVALHO, 2000).

Na amostragem por integração na vertical, a coleta de sedimento é dada pela amostragem da mistura que entra por um orifício (bico) e é armazenada em um recipiente (CARVALHO, 2014). O amostrador é deslocado ao longo da vertical de amostragem com velocidade de máxima constância possível e próxima a um valor previamente calculado, tanto na descida quanto na subida, chamada de taxa de

trânsito (SANTOS 2001). Dessa forma, a mistura é coletada continuamente enquanto o amostrador se move a uma taxa de trânsito constante ao longo da vertical (XIAOQING, 2003). Esse procedimento é realizado para que a velocidade de entrada da amostra seja igual ou quase igual à velocidade instantânea da corrente, necessitando assim, que o bico fique na horizontal, isto é, o amostrador deve se movimentar sem haver inclinação (CARVALHO, 2000). Ressalta-se que a amostragem pode ser feita nos dois sentidos, subida e descida, ou em apenas um desses sentidos.

A concentração de sedimentos da amostra definida pelo método é a concentração média ponderada de descarga de sedimentos na vertical. Já a taxa de trânsito do método é calculada pela relação entre a velocidade de entrada de água no coletor e a velocidade local do fluxo, que deve ser igual ou próxima a 1, e não deve exceder quatro décimos da velocidade média na vertical (XIAOQING, 2003). Pela amostragem ser realizada dentro de um período geralmente maior que 10 segundos considera-se representar bem o fluxo de sedimentos naquela posição, que além de que pode-se conhecer a granulometria na vertical (CARVALHO 2000; SANTOS 2001). A velocidade de trânsito, também conhecida como IVT, Igual Velocidade de Trânsito (do inglês, ETR, *equal transit rate*), é calculada de acordo com o tipo do bico utilizado no equipamento, que pode apresentar diferentes constantes de proporcionalidade (CARVALHO, 2000).

Outras técnicas são ilustradas na literatura. Uma é a possibilidade de instalar dispositivos eletromagnéticos nos amostradores para abrir e fechar a entrada durante o seu uso, e outra, por exemplo, é o fato de que para obter uma amostra representativa, o recipiente não deve ser totalmente enchido durante a amostragem, mantendo a entrada isocinética e evitando danos ao material pela inclinação da garrafa e agitação da água (XIAOQING, 2003).

Ainda dentro da técnica de amostragem por integração da vertical, há a necessidade de definir o número de verticais de coleta, de modo a representar a distribuição do sedimento em suspensão ao longo da seção. Para isso o Subcomitê de Sedimentação, através da Conferência Federal Interinstitucional de Sedimentação do Estados Unidos (1963), desenvolveu dois métodos em que as coletas podem ser reunidas em uma só amostra. Isso permite a obtenção da concentração média (CARVALHO, 2014). Estes métodos são reconhecidos como Igual Incremento de

Largura (IIL) e Igual Incremento de Descarga (IID). Conforme Santos (2001), o método de amostragem IIL, a seção transversal é dividida numa série de segmentos de igual largura, para a obtenção de uma série de sub-amostras com velocidade de trânsito idêntica em cada vertical, sendo, portanto, as sub-amostras compostas de volumes diferentes (Figura 3). Sendo esse o método mais usual nas campanhas hidrossedimentológicas. Com esse procedimento, a amostra coletada na vertical tem um volume proporcional à vazão na zona amostrada. Para a representação média da concentração na seção transversal, as subamostras podem ser misturadas para uma só análise (CARVALHO, 2000).

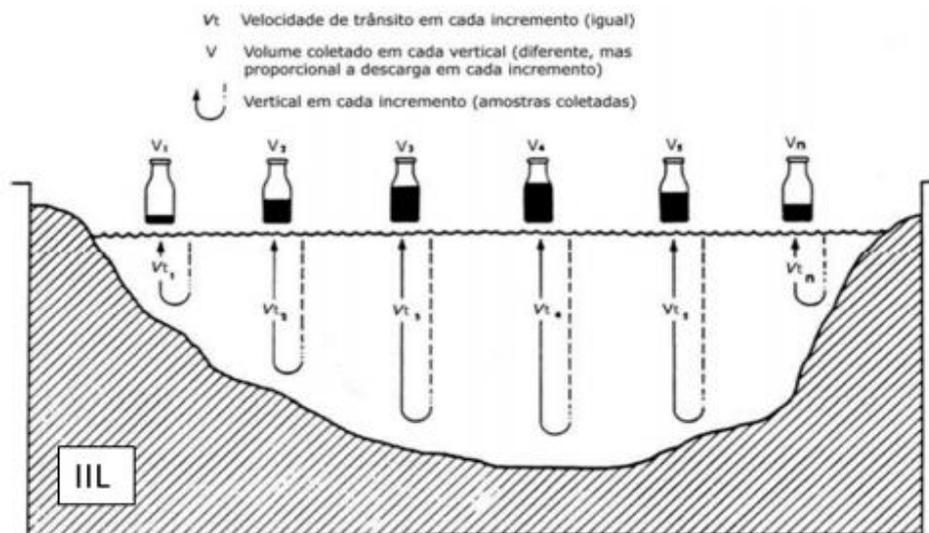


Figura 3 – Representação da velocidade de trânsito e volumes amostrados pelo método do Igual Incremento de Largura - IIL. Fonte: CARVALHO, 2000.

Para a realização da amostragem por IID, assim como no IIL, é necessário o conhecimento prévio da distribuição da vazão ao longo da seção de interesse. O método consiste em fracionar o valor total da vazão de acordo com o número de verticais que se pretende amostrar, posteriormente localiza-se onde as verticais serão posicionadas de modo que representem as mesmas vazões por área amostrada. Isso é dado em função da vazão acumulada para cada uma das verticais, onde coleta-se as amostras por integração vertical de forma que também se divida estas subseções em duas partes iguais de vazão (SANTOS, 2001). Carvalho (2000) exemplifica o processo da seguinte maneira: Em uma seção com vazão total de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, em que se objetiva amostrar 10 verticais, essa resultará em incrementos de descarga de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo que em todas as verticais serão amostradas no meio da subseção,

resultando na primeira vertical em 5 m³/s, a segunda 15 m³/s e assim por diante, sendo que na última será de 95 m³/s.

Para uma melhor compreensão do método, também podemos imaginar a seção transversal estudada e suas velocidades médias como um plano cartesiano onde se utiliza um gráfico com as porcentagens acumuladas de vazão (eixo y) e a distâncias em relação ao ponto inicial das medições (eixo X). No eixo das ordenadas (y) obtêm-se as porcentagens iguais ao número de amostras desejadas, após, se obtém no gráfico das abscissas (x) as distâncias desejadas para o posicionamento das coletas (Figura 4).

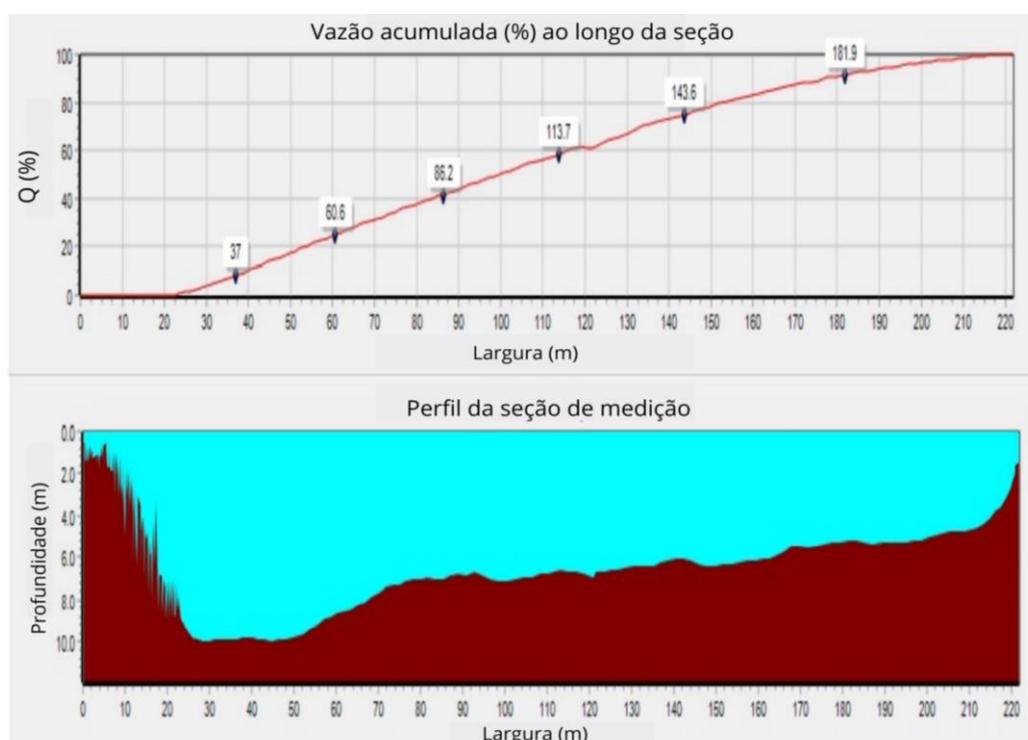


Figura 4 – Exemplo do gráfico de vazão acumulada, com as distâncias para posicionamento da amostragem e a seção batimétrica gerada pelo Software HidroSedimentos. Fonte: Próprio autor

Santos (2001) ressalta que, para que as amostras possam ser misturadas e possam resultar uma única análise em laboratório, cada subamostra deverá representar uma parte igual de vazão, assim como o volume amostrado, devendo-se ajustar a razão de trânsito em função da velocidade na vertical amostrada. Ou seja, para que os volumes amostrados sejam iguais, os tempos de amostragem em cada uma das verticais devem variar, sendo essa a diferença do método IID para o método IIL. Ambas as amostragens, pontual ou integração na vertical, o bico do amostrador utilizado para amostragem deve ser isocinético, ou seja, deve possibilitar que a

velocidade da água na sua entrada seja igual ou muito próxima à velocidade ambiente (XIAOQING, 2003).

4.3 ADCPs e Base Teórica

Os ADCPs são equipamentos acústicos que se utilizam do efeito Doppler (GAMARO, 2012) para medir a taxa de descarga líquida e a velocidade do fluxo de corpos hídricos (HUAN, 2018). O efeito Doppler é conceituado como sendo a mudança de frequência percebida em uma onda sonora quando a fonte (emissor) está se movendo em relação ao receptor (objeto observado), ou vice-versa, ou ambos (Figura 5). Essa mudança de frequência é proporcional à velocidade na qual a distância entre os dois vai aumentando ou diminuindo (GAMARO, 2012).

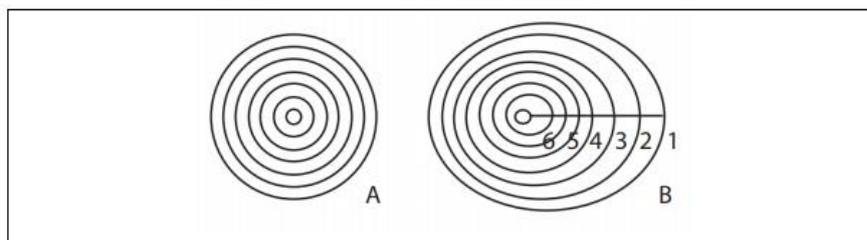


Figura 5 – Frequência (a) constante quando não há movimento percebido entre emissor (fonte) e receptor, e (b) alterada quando há movimento, por exemplo, da esquerda para a direita por parte do emissor. Fonte: ANA, 2014.

Os ADCPs aplicam o princípio Doppler através do reflexo, ou retorno, do sinal acústico provindo do choque com as partículas de sedimentos e outros materiais existentes na d'água (MUELLER, 2013). De forma geral, o ADCP transmite um pulso acústico na coluna d'água e, em seguida, ouve o eco de retorno dos retroespalhadores acústicos (partículas de sedimento) na coluna d'água (SIMPSON, 2001). Dessa forma, é possível medir a quantidade e a força do reflexo sonoro retroespalhado e converter em componentes de velocidade do feixe acústico, que no final são dados como velocidades x, y e z (HAUN, 2018). Ou seja, sabendo as direções dos pulsos emitidos, os ADCPs calculam a velocidade das partículas considerando a duração do retorno acústico, determinando a posição das partículas através do efeito Doppler. Desse

modo, como entendido que as partículas presentes na coluna d'água fluem na mesma velocidade do fluxo (SANTOS et al, 2001), os ADCPs, identificando a velocidade de deslocamento das partículas são capazes de estimar a velocidade d'água.

Além disso, os dados da força do reflexo sonoro retroespalhado podem ser entendidos como um subproduto gerado pelos equipamentos. Esses dados são conceituados como indicadores da força do sinal refletido e são chamados de RSSI (*Reflected Signal Strength Indicator*), ou taxa de ruído do sinal (SNR), ou ainda, intensidade do eco refletido (*backscatter*). Nesse sentido, o valor de SNR é influenciado pela presença de partículas na coluna d'água e pode ser usada para indicar as características dos sedimentos na água, podendo essa ser uma opção adicional dos ADCPs (BARANYA, 2013). Por exemplo, a partir da correção dessa força do sinal do retorno acústico é possível usar essa informação para estimar a CSS (HUAN, 2018).

No entanto, retirar de uma leitura de SNR um valor para sedimento em suspensão requer um aprofundamento sobre o funcionamento do aparelho, sobre a física hidroacústica, sobre o comportamento do sedimento na seção a ser medida, bem como entender como a energia acústica é afetada conforme vai atravessando a água (GAMARO, 2014). Sendo esse um dos objetivos do presente estudo, os próximos itens discorrerão mais sobre o tema.

4.3.1 Perfisadores Acústicos

Os ADCPs são equipamentos elétricos compostos por transdutores capazes de converter energia elétrica em energia acústica equivalente emitindo assim, pulsos sonoros na coluna d'água, e posteriormente convertendo a energia acústica em energia elétrica novamente, para quantificar o sinal refletido. Como curiosidade, os humanos distinguem sons na faixa de 40 a 24.000 Hz, já os ADCPs trabalham na faixa de 300.000 a 3.000.00 Hz (MUELLER, 2013), podendo haver também, equipamentos acústicos com frequências menores para realização, principalmente, de batimetria. Dessa forma, os equipamentos emitem ondas sonoras através de cerâmicas piezoelétricas (Figura 6), que ao passar uma corrente elétrica sobre estas, elas vibram, emitindo ondas sonoras (GAMARO, 2012).

Como não existe uma classificação formal, os ADCPs podem ser divididos de acordo com a aplicação requerida ou de acordo com o objetivo do estudo. Para Gamaro (2012) as divisões mais usuais são referentes à frequência (alguns inclusive podem ser multifrequência), à orientação (vertical, horizontal ou inclinado), ao tipo de processamento (pulso incoerente, coerente pulso a pulso e *broadband*), à aplicabilidade (velocímetros, correntômetros e perfiladores), e ao modo de instalação e operação do equipamento (estático, dinâmico e/ou pontual). Para uma melhor explicação sobre os equipamentos, no presente trabalho decidiu-se tratá-los conforme o modo de instalação e operação, dividido entre estáticos e dinâmicos.

De acordo com o modo de operação, os estáticos são equipamentos fixados em margens ou no leito em estruturas construídas, e operam discretizando o perfil na qual estão instalados, ou seja, realizam a medição em um plano ou em um ponto específico, e perfilam a seção, também chamados de *side-looking*. Alguns exemplos de ADCP estáticos da fabricante SonTek utilizados pelo grupo HidroSedi são: SonTek-IQ[®] fixo ao leito (Figura 6a); SL-500 (Side-Looker 500[®]), fixo à margem (Figura 6b).



Figura 6 – Equipamento SonTek-IQ[®] (A), e o equipamento Argonaut Side-looker SL-500 (B), ambos da fabricante SonTek. Fonte: Próprio autor.

Já os dinâmicos ou pontuais, trabalham com o equipamento em movimento. Nessa técnica o perfilamento é feito na seção transversal escolhida e com os feixes direcionados ao leito (*down-looking*). O ADCP do tipo dinâmico da marca SonTek, *RiverSurveyor M9[®]* (Figura 7A), usado nesse trabalho, é um exemplo. Esse equipamento possui 9 transdutores do tipo *piston*, onde: 1 de 500 kHz; 4 de 3 MHz; 4 de 1 MHz. Os feixes são emitidos em direção ao leito (Figura 7C), sendo que os 8

feixes (4 de 3 MHz e 4 de 1MHz) estão espaçados em ângulos de 25°, e o feixe de 500 kHz, localizado no centro, é emitido verticalmente e mede apenas a profundidade (Figura 7B). Os transdutores do tipo *piston* projetam o som em uma direção que depende de seu tamanho em comparação com o comprimento de onda.

O equipamento opera com uma frequência por vez, sendo assim, apenas 4 transdutores são utilizados. A alternância das frequências ocorre automaticamente, pois o equipamento *M9*[®] possui a tecnologia “*Smart Pulse*”, a qual é capaz de perceber a mudança de profundidade e ajustar a melhor frequência. Dessa forma, possuindo 2 faixas de frequências para medição (1 ou 3 MHz), oferece a possibilidade da coleta de dados em ambientes profundos e rasos ao mesmo tempo (MUELLER, 2013). Ressalta-se que, a partir da combinação de no mínimo 3 transdutores, já é possível perfilar a seção com triangulação, medindo as velocidades nas três direções. Um 4º feixe é utilizado, no equipamento citado, para o cálculo do chamado “erro de velocidade” (Figura 8). Esse erro é uma componente da decomposição dos vetores da velocidade na vertical, que verifica se o fluxo está homogêneo (velocidade não muda em magnitude ou direção no plano) ou não (GAMARO, 2012).

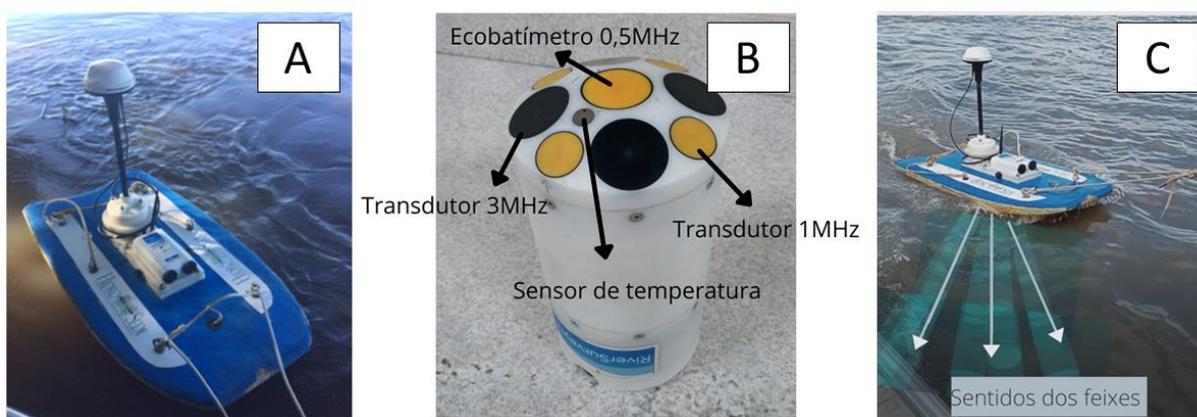


Figura 7 – RiverSurveyor[®] M9 a) preparado para medição (acoplado a prancha e ao barco) e b) vemos os 9 transdutores do equipamento em detalhe e c) os feixes emitidos em direção ao leito pelo equipamento, angulados em 25°. Fonte: Próprio autor.

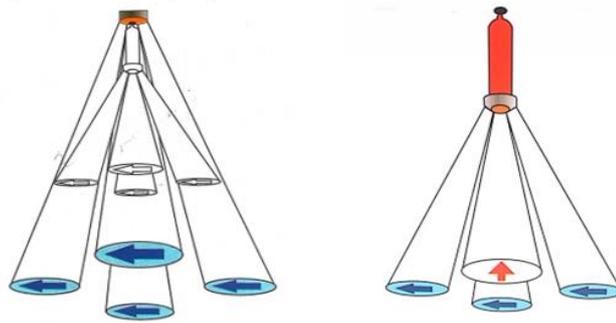


Figura 8 – Medição da velocidade nas três direções. (a) Camada homogênea e (b) camada não homogênea. Fonte: Simpson, 2001.

Além disso, o equipamento tem um alcance de perfilamento que varia de 0,06 m até 40 m de profundidade, uma velocidade de faixa de perfil de cerca de 20 m/s e uma resolução vertical que pode chegar a 128 células, de 0,02 m a 4 m de tamanho (SONTEK, 2017). Dessa forma, permite-se imaginar que com o uso dos ADCPs dinâmicos seria como realizássemos a submersão de uma grande quantidade de molinetes hidrométricos (equipamento que mede a velocidade da água pelo número de rotações de sua hélice) uns sobre os outros, organizados em verticais (*ensembles*), que cobrem toda a área da seção medida. Essa área pode ser relacionada com as células de medida da velocidade, chamadas de *bins*, com a diferença de que, com a tecnologia Doppler, a velocidade de cada *bin* será a média de infinitas velocidades medidas naquele *bin* (Figura 9).

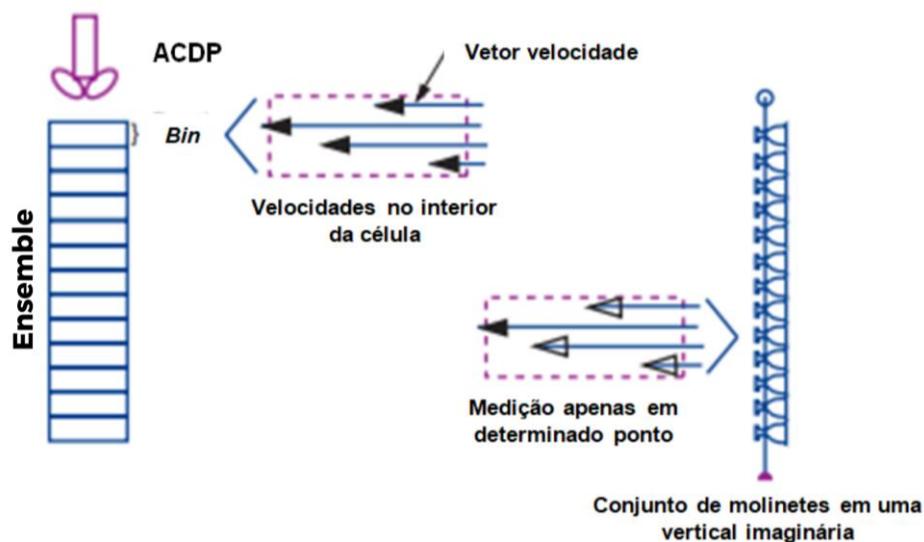


Figura 9 – Comparação ADCP e número de molinetes. Fonte: GAMARO, 2012.

As duas variações, tanto estática quanto dinâmica, possuem seus pontos positivos e negativos, e vão depender da proposta do requerente para com o estudo. Pode-se dizer que os ADCPs dinâmicos alcançam maior discretização da seção, pois são capazes de perfilar a maior parte, apresentando algumas “áreas em branco” (blanking areas, Figura 10), próximo ao leito e à superfície, em que o sensor não é capaz de estimar (GAMARO, 2014). Por outro lado, os ADCPs estáticos conseguem realizar medições continuamente por maiores períodos.

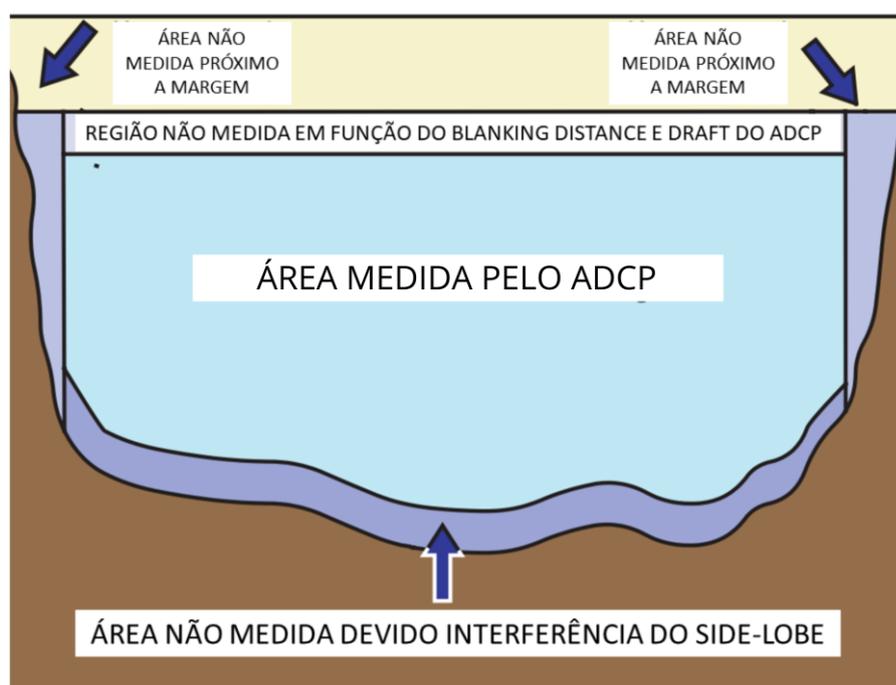


Figura 10 – Áreas não medidas (*blanking areas*). Fonte: Adaptado de SIMPSON, 2021.

Os ADCPs dinâmicos também possuem outras limitações, além das *blank areas*. Por conta da profundidade de inserção dos transdutores na água, são incapazes de coletar dados da superfície da água, chamado também de área submersa (YORKE e OBERG, 2002; SIMPSON, 2001). Outra situação é a influência do *side lobe* (Figura 11) ou lóbulo lateral (onda sonora lateral emitida pelo ADCP que não pertence ao feixe acústico principal, pode ser considerado uma interferência do eco), que acaba por impossibilitar a medição da camada próxima ao fundo. Isso se deve ao fato de que o *side lobe* é uma energia muito fraca e acaba por chegar ao fundo primeiro devido ao ângulo de emissão do equipamento. Como o sedimento de fundo é denso e sólido, torna-se uma boa superfície refletora mesmo com uma baixa

energia do feixe, produzindo assim um reflexo forte afetando acusticamente o espaço próximo ao leito (MUELLER, 2013). Ainda segundo o autor, a coluna de água afetada por esta interferência do lóbulo lateral varia de 6% para um sistema de 20 graus a 13% para um sistema de 30 graus de espaçamento entre os transdutores. Outra limitação é o fato do ADCP dinâmico, geralmente montado em barcos, ter maior dificuldade com as bordas da seção devido a profundidade ser um limitante. Uma descrição detalhada das fórmulas de extrapolação usadas para a estimativa da contribuição de zonas não medidas é relatada em Gamaro (2012).

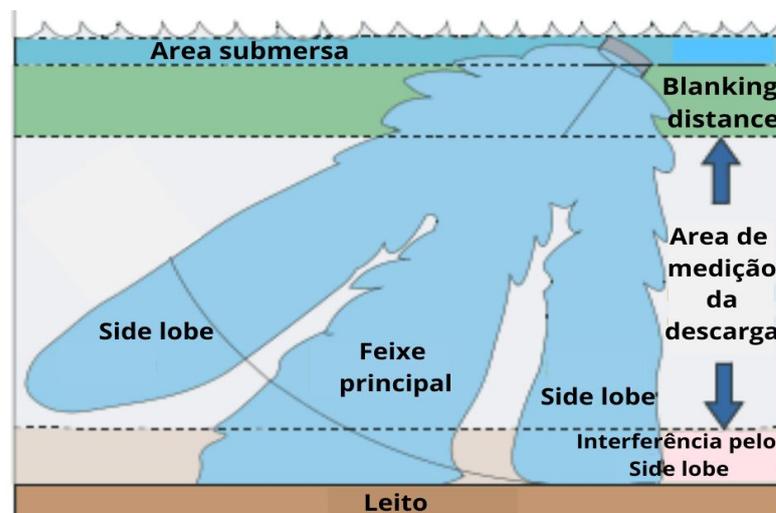


Figura 11 – Representação da área de interferência do feixe Side lobe. Fonte: Modificado de SIMPSON, 2001.

4.3.2 Equação do sonar e a correção do SNR medido

O processo de converter a intensidade do SNR (ou do RSSI ou do *backscatter*) em informação sobre os sedimentos presentes na coluna d'água não é simples. Os pulsos emitidos pelo equipamento percorrem na coluna d'água na velocidade do som perdendo energia devido a dispersão, absorção e reflexão até o sinal desaparecer ou ficar mais fraco que o ruído gerado pelo som (GAMARO, 2014). Dessa forma, a intensidade do eco de retorno depende de fatores provindo das características do meio, como material suspenso, salinidade, temperatura e pressão d'água, e das características do instrumento, como a energia transmitida, tamanho do transdutor e frequência (DEINES, 1999; GARTNER, 2004).

Portanto, a energia do som que retorna, SNR, é apenas uma pequena parcela da que foi emitida, e quando retorna necessita passar por um amplificador até o nível necessário para que os circuitos de medição de frequência do ADCP possam ler, em outras palavras, quanto maior a perda ocorrida, maior o grau de amplificação necessária (GAMARO, 2014).

Os estudos analisados para a correlação do SNR com a CSS utilizam-se da equação modificada do sonar, descrita por Urick (1983), e se concentram na análise do eco reverberado (refletido) e a relação com os efeitos do meio, do alvo e do equipamento. As equações do sonar são fundamentadas na igualdade básica entre as porções desejadas e indesejadas do sinal recebido no instante em que o conjunto de sonar exercem a medição (URICK, 1983). Tendo como base esse conceito e essa equação, muitos autores desenvolveram modelos para correção a partir do espalhamento acústico produzido pelas partículas em suspensão (DEINES, 1999; THORNE et al. 2002; GARTNER, 2004; WOOD e TEASDALE, 2013; GUERREIRO, 2016).

Para Gartner (2004), baseado na equação do sonar para reverberação de pequenas partículas, o método para estimar a CSS provindo da taxa de ruído do sinal (SNR), pode ser explicitado na forma exponencial como:

$$CSS = 10^{(A + B * RB)} \quad (3)$$

Onde:

RB = Retroespalhamento acústico relativo (dB);

A e B = Termos para Interceptação (A) e Inclinação (B);

Os termos interceptação, A , e inclinação, B , são parâmetros empíricos que podem ser derivados da reta entre CSS na fórmula logarítmica ($\text{Log}_{10}(\text{SCC})$) e RB usando o ajuste de mínimos quadrados. Já o retroespalhamento relativo, conforme literatura, também pode ser entendido como a taxa de ruído do pulso corrigido ($\text{SNR}_{\text{corrigido}}$). O termo RB corresponde a soma do nível de eco medido no transdutor mais as perdas de transmissão bidirecional conforme definido abaixo (BARAYANA, 2013):

$$RB = RL + 2TL \quad (4)$$

RL = Nível de reverberação (dB)

TL = Perda de transmissão bidirecional (dB).

- **Nível de Reverberação (RL)**

O nível de reverberação (*RL em dB*), baseado na equação do sonar simplificada (URICK, 1983), pode ser expressa da seguinte forma:

$$RL = SL - 2TL + TS \quad (5)$$

Onde:

SL = Nível da Fonte do transdutor (dB);

2TL = Perda de transmissão nos 2 sentidos (dB);

TS = Força do eco no local analisado (Célula) (dB);

O *SL* é o nível da fonte, ou seja, a força inicial com que o sonar transmite seu sinal. O termo *TS* é a força alvo, provinda do sedimento em suspensão, que é uma função da forma, tamanho, rigidez e comprimento de onda acústica da partícula. O termo 'perda de transmissão' será analisado no próximo item.

Assim, o nível de reverberação (*RL*) é também referido na literatura como *MB* (*backscatter* medido), ou diretamente como *SNR* (GAMARO, 2012; GONÇALVES, 2020; WOSIACKI, 2021) e pode ser revelado de diferentes maneiras pelos equipamentos acústicos: Amplitude (Amp), Indicador de Força do Sinal Recebido (RSSI), ou Razão Sinal-Ruído (SNR) (LANDERS et al., 2016). Quando apresentados em Amp e RSSI (ou apenas Força do Sinal) devem ser corrigidos conforme Eq. 6 apresentada abaixo, pois esses estão na unidade adimensional *counts*. Quando apresentados em SNR ou ABS (sinal acústico do *backscatter*) os mesmos podem ser utilizados diretamente, pois já estão na unidade de decibéis (dB).

$$RL = K_c (E - E_r) \quad (6)$$

Onde:

E = Intensidade do eco medido pelo ADCP (em *counts*),

E_r = número do RSSI (em *counts*);

K_c = fator de escala de *counts* para dB.

O termo E é a força do sinal medido pelo ADCP, ou seja, o valor do SNR. O termo E_r é o nível de referência do RSSI (indicador da intensidade do sinal recebido) ou o eco medido na ausência de pulsos, ou seja, é a linha de base do eco quando nenhum sinal está presente. Barayana (2013) explica que o nível de referência E_r do ADCP pode ser medido a campo, e reflete o ruído térmico dos amplificadores acústicos, específico para cada transdutor, além de também ser sensível à temperatura. Já o termo K_c , descrito por Deines (1999), é usado para converter a unidade *counts* (unidade de medição dos ADCPs adimensional) para dB e varia entre instrumentos e transdutores, geralmente na ordem de 0,35 a 0,55. Ainda, o autor ressalta que o fator K_c pode ser medido pela própria fabricante e fornecido ao usuário, ou em campo pelo próprio cliente.

Ressalta-se que, deve se utilizar o termo MB e/ou o termo SNR de forma direta nas equações quando empregado equipamentos que já realizam de forma automática a medida do termo E_r da equação 6. Nesses equipamento, além das unidades já serem expressas em decibéis (dB), também já são identificados o fator E provindo de suas características próprias, compreendendo assim, os três termos em um só, como por exemplo o equipamento *SonTek™/YSI ADVM* (WOOD e TEASDALE, 2013) e o *SonTek™/RiverSurveyor® M9* (MUELLER, 2013) que já apresentam o termo SNR com essas correções.

- **Perdas de Transmissão Bidirecional (2*TL)**

O termo “perdas de transmissão”, tanto no sentido Transdutor-Partículas quanto no sentido Partículas-Transdutor, considera as perdas influenciadas por duas análises: uma é o espalhamento esférico do feixe, e a outra são as perdas devido à absorção, tanto da água quanto da atenuação do sedimento. A perda de transmissão, segundo Gartner (2004) pode ser definida como:

$$2TL = 20 \cdot \log_{10} R \cdot \psi + (2 \cdot \alpha \cdot R) \quad (7)$$

Onde:

R = Faixa do volume ensonificado (metros);

α = Coeficiente de absorção total (dB/m).

ψ = Fator de correção para o campo próximo

$20\log_{10}(R)$ = Termo para perda por espreadimento

$2\alpha R$ = Termo para perda por absorção.

O termo (R), em outras palavras, é a distância inclinada ao longo do feixe acústico até o local de medição levando em consideração o ângulo do feixe emitido pelo ADCP (WOOD e TEASDALE, 2013).

O termo de correção para o campo próximo (ψ), é um fator acústico relacionado à geometria esférica da emissão, fazendo com que a absorção da água não seja uniforme ao longo do trajeto (GAMARO, 2014). Isso ocorre devido às perdas de propagação serem diferentes nos dados coletados próximos ao transdutor ou fora desta zona chamada “campo próximo” (WOOD e TEASDALE, 2013). Dessa forma, a transição entre os campos do transdutor próximo e a camada mais afastada é chamada de faixa crítica, onde $R_{critical}$ pode ser escrita como:

$$R_{critical} = \pi a_t^2 / \lambda \quad (8)$$

Onde:

a_t = Raio do transdutor, em cm;

λ = Comprimento de onda acústica;

Logo, quando houver campo próximo, ou seja, em distâncias menores que $R_{critical}$, a correção de campo próximo é necessária, caso contrário o termo pode ser retirado da soma (WOOD e TEASDALE, 2013). A correção para o campo próximo devido à perda de espalhamento pode ser definida, conforme Downing et al (1995), como:

$$\psi = [1 + 1,35Z + (2,5Z)^{3,2}] / [1,35Z + (2,5Z)^{3,2}] \quad (9)$$

Onde:

$$Z = R / R_{critical}$$

Ressalta-se também, que para o equipamento utilizado no presente trabalho (ADCP *RiverSurveyor M9*), a correção para o campo próximo não se faz necessária. A tecnologia *SmartPulse* presente no equipamento já corrige esse parâmetro.

Já o coeficiente de absorção total (α) é a soma dos coeficientes de absorção da água (α_w) com o coeficiente de atenuação das partículas (α_s). Podendo então, o termo $2*\alpha*R$ ser aberto de forma a ficar:

$$2*\alpha*R = 2*\alpha_w*R + 2*\alpha_s*R \quad (10)$$

O coeficiente de absorção da água (α_w) retrata a porção do som transmitido que foi dissipado em função da frequência acústica (instrumento), salinidade, temperatura e pressão da água (WOOD e TEASDALE, 2013). A atenuação dos sedimentos (α_s) ocorre por conta da viscosidade do meio e da reflexão das ondas nas partículas (THORNE, 2002).

O termo de absorção pela água (α_w) é de grande importância no cálculo da CSS, e que podem acarretar grandes erros de estimativas caso seja feita uma medição errônea da temperatura, principalmente (GAMARO, 2014). A equação, desenvolvida por Schulkin e Marsch (1962), pode ser expressa como:

$$\alpha_w = \{SAf_T f^2 / [(f_T^2 + f^2) + Bf^2/f_T]\} * [1 - (6,54 * 10^{-4}) * (P)] * 8,686 \quad (11)$$

Sendo:

α_w = Coef. Absorção da água (Nepers/m);

f = Freq. do ADCP (Hz);

S = Salinidade em ppt;

P = Pressão (atm);

B = Constante de mecanismo de viscosidade da água pura ($3,38 * 10^{-6}$);

f_T = É chamada frequência de relaxamento e pode ser escrito como:

$$f_T = 21,9 * 10^{[6 - (1520 / 273 + T)]} \quad (12)$$

T = Temperatura da água (°C).

Valendo-se da ideia de que o presente estudo é aplicado em um canal fluvial de água doce, oportuniza-se a utilização da equação apresentada por Guerreiro (2011), em que leva em consideração apenas a frequência do transdutor e a frequência de relaxamento. Dessa forma, α_w é expresso da seguinte maneira:

$$\alpha_w = 8,687 * [(3,38 * 10^{-6} F^2) / (21,9 * 10^{[6 - (1520 / 273 + T)]})] \quad (13)$$

Onde:

F = Frequência (kHz);

T_w = Temperatura da água (°C).

O termo de atenuação por conta dos sedimentos (α_s) é o mais complexo, e muitas vezes ele é simplificado. A atenuação dos sedimentos pode ser pensada e realizada de duas maneiras para a determinação da CSS pelo SNR. O primeiro, citado acima como “simplificado”, entende que a principal fonte do eco é a CSS, e assim pode-se omitir a relação da onda acústica com o diâmetro da partícula (GAMARO, 2014). A atenuação pelo sedimento pode ser calculada baseando-se nos perfis de SNR corrigidos para campo próximo e para a atenuação da água (WOOD e TEASDALE, 2013), utilizando-se assim, das equações 11 de Schulkin e Marsch (1962) ou 13 de Guerreiro (2011), citadas acima.

O segundo aspecto, mais refinado e acurado, é a modelagem das perdas devido a atenuação do sedimento propriamente dito. A atenuação devido ao sedimento pode ser dividida em partes: absorção (viscosidade) e espalhamento (BARAYANA, 2013). Essa teoria pode ser calculada com base na equação provinda de Urick (1983):

$$2\alpha_s = K (\gamma - 1)^2 \left\{ S / [S^2 + (\gamma + \tau)^2] \right\} + [(K^4 a_p^3) / 6] * 8,686 * CSS \quad (14)$$

$\underbrace{\hspace{15em}}$

VISCOSIDADE

$\underbrace{\hspace{15em}}$

ESPALHAMENTO

Onde:

K = Sensibilidade acústica, dada por: $2\pi/\lambda$. Onde λ é o comprimento da onda acústica ou a velocidade do som na água (cm/s) dividido pela frequência acústica (Hz). Obs: Não confundir com o K da equação 6, que se refere ao coeficiente de ajuste de escala.

γ = Desinsidade da partícula molhada dividido pela densidade do fluído;

τ = É dado por $0,5 + 9/(4\beta a_p)$;

a_p = Raio da partícula (cm);

CSS = Concentração de Sedimentos em Suspensão (mg/l);

S = É dado por $[9/(4\beta a_p)] * [1 + 1/(\beta a_p)]$, onde $\beta = (\omega/2\nu)^{0,5}$, e em que $\omega = 2\pi f$

Onde:

f = Frequência acústica (Hz)

ν = Viscosidade cinemática da água (Stokes);

Ressalta-se que a multiplicação da equação pela constante 8,686 acontece devido à necessidade de conversão de unidades de media (*nepers* para dB) (GARTER, 2004). Um terceiro aspecto, chamado de perdas por difração, é relatado em alguns trabalhos, no entanto na maioria dos ADCPs ele não precisa ser levado em consideração por conta das frequências utilizadas (REICHEL e NACHTNEBEL, 1994).

Por fim, a equação expandida e mais comumente apresentada, pode ser expressa como (WOOD e TEASDALE, 2013):

$$RB = K_c (E - Er) + 20 \cdot \log_{10} R^{\psi} + 2 \cdot \alpha_w \cdot R + 2 \cdot \alpha_s \cdot R \quad (15)$$

De maneira rearranjada e utilizada no presente trabalho, o método simplificado pode ser descrito como:

$$SNR_{\text{corrigido}} = SNR_{\text{medido}} + 20 \cdot \log_{10} R + 2 \cdot \alpha \cdot R \quad (16)$$

4.4 Contexto do Ambiente Pesquisado

O presente trabalho foi realizado no canal São Gonçalo, o qual está inserido na bacia hidrográfica transfronteiriça Mirim – São Gonçalo (BHMSG), que margeia os municípios de Pelotas, Rio Grande, Capão do Leão e Arroio Grande, região sudeste do estado do Rio Grande do Sul. A BHMSG é de grande relevância e complexidade, pois além de importâncias ambientais, têm papel fundamental na economia, na sociedade e na cultura da região. O canal é peça fundamental da Hidrovia do Mercosul que conecta os países Brasil e Uruguai (GONÇALVES, 2021). Dentro do setor econômico, a hidrovia é responsável pelo transporte de cerca de 4,5 milhões de toneladas de carga por ano, sendo as principais: fertilizantes e adubos, combustíveis, óleos minerais, produtos químicos orgânicos, soja, trigo, celulose e carvão mineral (ALBERTI, 2016).

Nesse contexto, o canal São Gonçalo apresenta 76 km de extensão e é responsável por conectar a lagoa Mirim com a Laguna dos Patos, a qual mantém ligação indireta com o oceano Atlântico (HARTMANN e HARKOT, 1998). Ou seja, é uma região de interface entre zonas costeiras, águas interiores e águas costeiras

marinhas. O canal tem largura média de 250 metros, com profundidades podendo chegar a 15 metros, já a cota altimétrica mínima chega a -14,37 metros em relação ao nível médio do mar (BONCZYNSKI, 2018). Por estar situado em uma região da planície costeira, o canal apresenta baixa declividade e uma variação do nível da lâmina d'água relativamente pequena (0,47m em média por ano) (HARTMANN e SCHETTINI, 1991). O fluxo de escoamento do canal é normalmente no sentido da Lagoa Mirim para a Lagoa dos Patos, podendo inverter em períodos de estiagem (HARTMANN e HARKOT, 1990). O canal também é diretamente influenciado pelo vento, que conforme Karsburg (2016), as direções de ventos são mais influentes na previsão dos valores de nível do canal. Assim, ainda conforme a autora, muitas vezes a área em estudo altera sua direção do fluxo ficando em condições transitórias entre enchimento e esvaziamento, alterando também a morfologia do transporte de sedimentos no canal. Além disso, por conectar diferentes estruturas hídricas, o canal está sujeito a alterações significativas de parâmetros como a densidade, a temperatura, a pressão, os quais também têm influência sobre a descarga sólida.

5. Material e Métodos

Além dos aspectos regionais, neste tópico são relatados os principais equipamentos operados, suas respectivas funções e os métodos utilizados. Assim como são explicados os passos para a realização do estudo e obtenção dos dados. Pela complexidade do ambiente estudado, neste tópico será apresentada também, uma contextualização geral do local, além de uma breve caracterização do ambiente.

Ressalta-se que o presente estudo é uma complementação do trabalho desenvolvido por Gonçalves (2020), o qual buscou estimar a CSS no Canal São Gonçalo a partir de equipamentos acústicos. O autor estudou a aplicação de métodos para a correção de dados de SNR provindos de ADCP estáticos na posição horizontal nas mesmas duas seções analisadas. Além disso, o atual trabalho é uma contribuição para investigações em andamento produzidos pelo grupo HidroSedi sobre temas correlatos no Canal São Gonçalo.

5.1 Local de Estudo

As amostragens de sedimentos foram realizadas em duas seções: Seção 1 localizada no Campus Anglo da Universidade Federal de Pelotas (coordenadas 32° 46' 57" Sul e 52° 19' 25" Oeste), aproximadamente 10,5 km do exutório do canal na Laguna dos Patos, e Seção 2 localizada em Santa Isabel do Sul – RS (coordenadas 32° 07' 07" Sul e 52° 35' 35.3" Oeste), conforme apresentado na Figura 12. Estas estações pertencem ao Núcleo de Ensino, Pesquisa e Extensão em Hidrometria e Sedimentos para Manejo de Bacias Hidrográficas (NEPE – HidroSedi), e são operadas em conjunto com a Agência para o Desenvolvimento da Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim (ALM). Nesses dois pontos, também estão instalados sensores de precipitação, de nível e velocidade de escoamento.

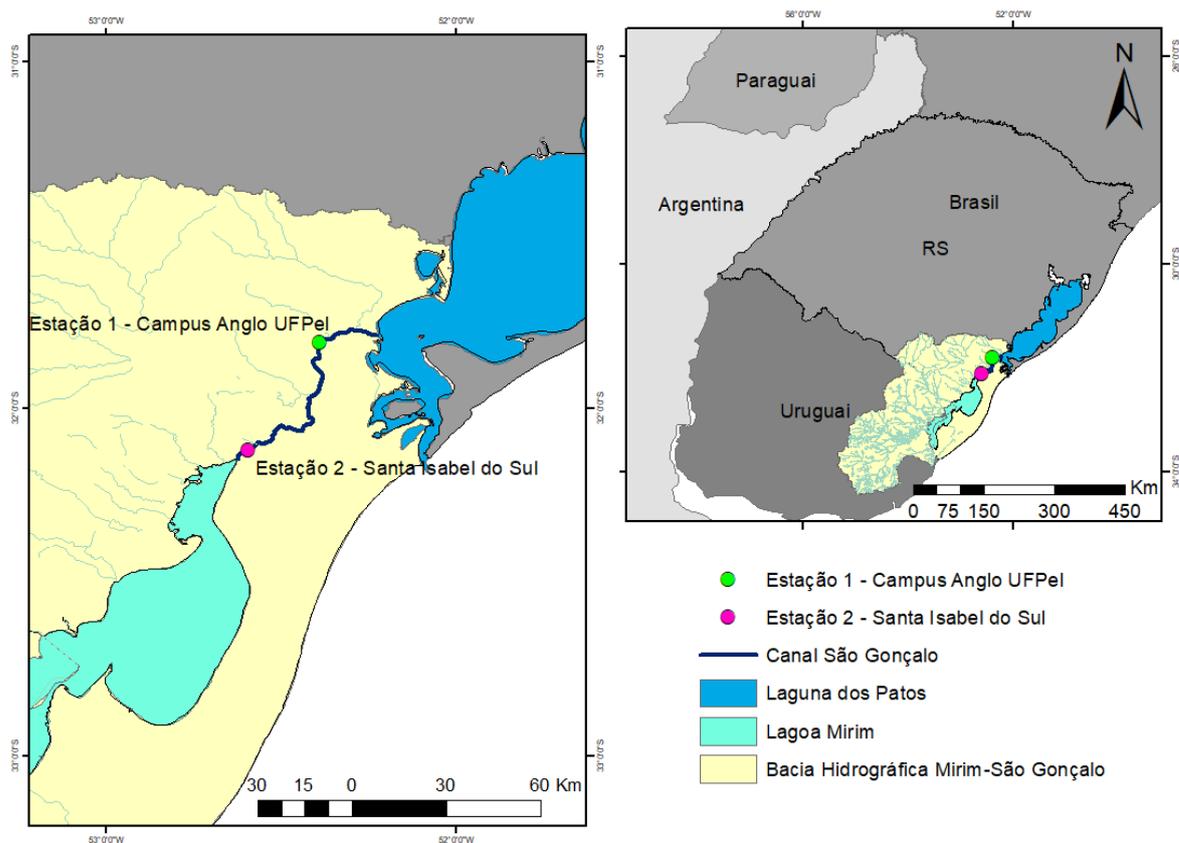


Figura 12 – Mapas da região na qual se insere a bacia hidrográfica da Lagoa Mirim-São Gonçalo, o Canal São Gonçalo, e as seções de monitoramento utilizadas neste trabalho.

5.2 Roteiro de Campo

Foram efetuadas 21 campanhas de amostragem de sedimentos em suspensão e medições de vazão. O período de coleta, em ambas as seções, variou de 13/03/2019 até 20/11/2019.

Nas campanhas empreendidas, foram conduzidas 5 principais metodologias:

i - medição de vazão da seção de interesse, utilizando o equipamento ADCP *RiverSurveyor M9*. As medições foram conduzidas conforme indicações de boas práticas descritas por Mueller et al. (2013), o qual descreve etapas de pré e pós processamento, e cuidados a serem seguidos para obtermos boas medidas de vazão com ADCPs do tipo dinâmico;

ii - Amostragem de sedimento em suspensão através de metodologias tradicionais, como o caso da amostragem indireta utilizando subdivisão da seção por IID, com amostragem por integração da vertical através do amostrador DH-59 ou D-49, conforme condições do fluxo;

iii - Processamento em laboratório das amostras de sedimento coletadas em campo, a fim de obter para cada uma das verticais e para a toda a seção, valores de concentração de sedimento em suspensão (CSS) em mg/l.

iv - Filtragem e extração dos valores de SNR (adquiridos com o ADCP) referentes às verticais onde houve amostragem de sedimentos em suspensão pelo método de integração da vertical.

v - Relação direta entre as variáveis SNR e CSS obtidas nas verticais, para as 21 campanhas realizadas, a fim de construir uma relação que permita estimar a CSS nessas seções, a partir do SNR observado.

Abaixo é apresentado um fluxograma para melhor compreensão dos processos seguidas durante o trabalho.

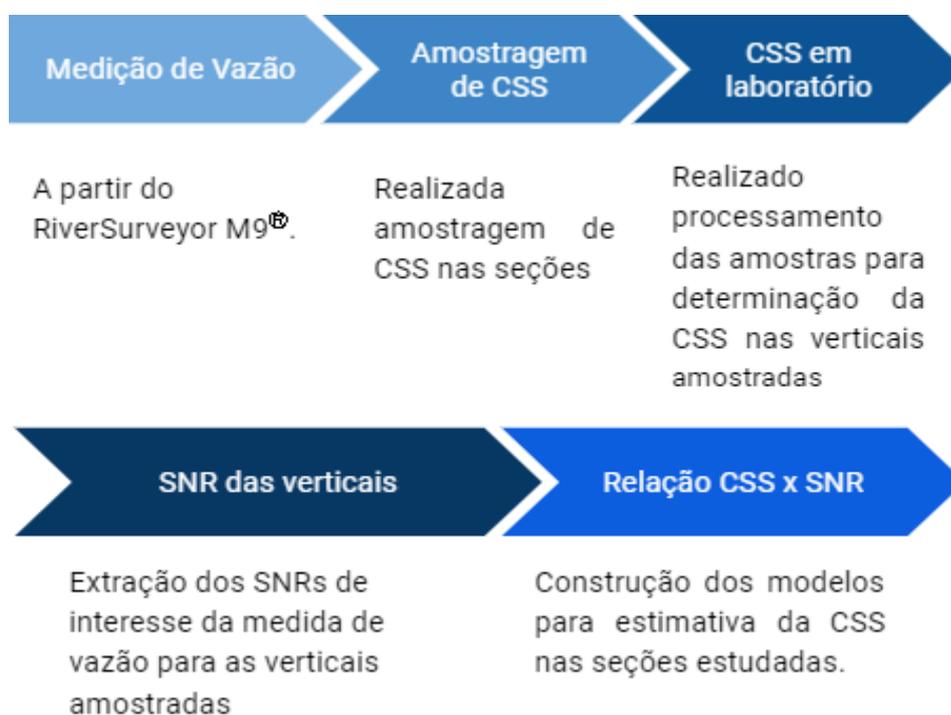


Figura 13 – Fluxograma dos processos realizados durante o trabalho. Fonte: Próprio autor.

Desta maneira, a seguir serão descritos em detalhes, cada uma das etapas supracitadas.

5.3 Obtenção dos dados com ADCP dinâmico

A operação e a coleta de dados de vazão foram realizadas com o ADCP *RiverSurveyor M9*[®]. Os procedimentos para medição, configuração do equipamento, e avaliação das medidas seguiram as instruções descritas por Mueller et al. (2013) presente no guia da USGS, das quais algumas são citadas abaixo.

O software utilizado para a tomada das medidas com o ADCP foi o *RiverSurveyor Live*[®] (SonTek). Ele possibilita a visualização do processamento das variáveis em tempo real, possibilitando ao profissional tomar decisões mais claras e rápidas. As Figuras 15 e 16, demonstram com detalhes a tela do software e os dados coletados, como por exemplo a vazão total, o número de verticais, a duração e o número de células por vertical.

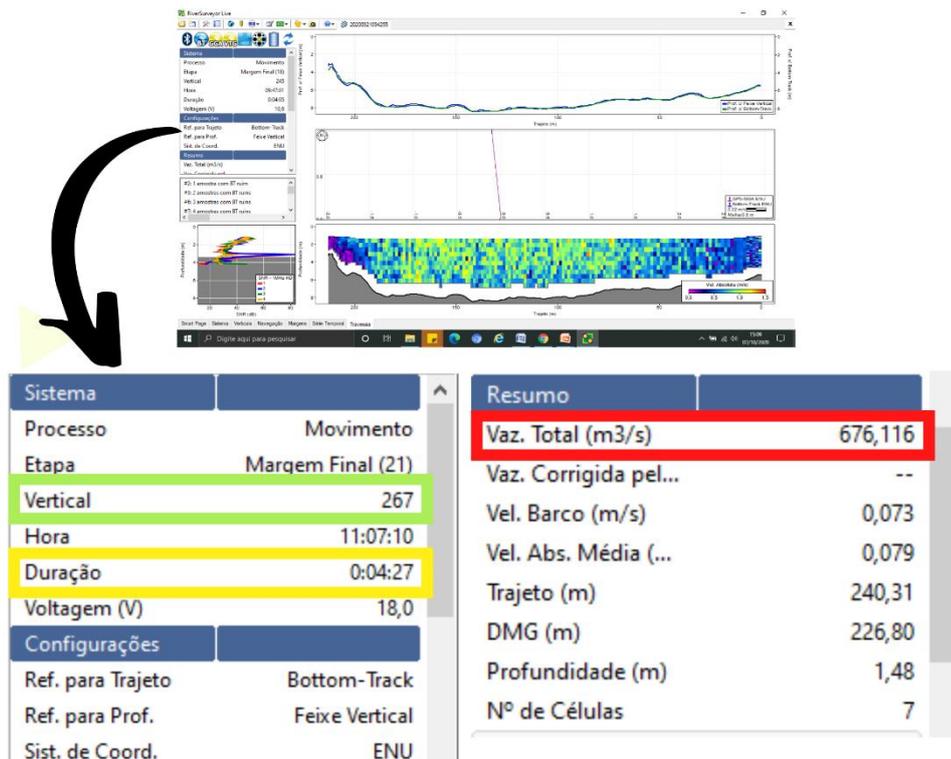


Figura 14 – Destaque da tela do software *RiverSurveyor Live*[®] (SonTek) com informações disponibilizadas pelo ADCP, como: Número de Verticais (Verde), Duração da Medição (Amarelo), Vazão total (Vermelho). Fonte: Próprio Autor.

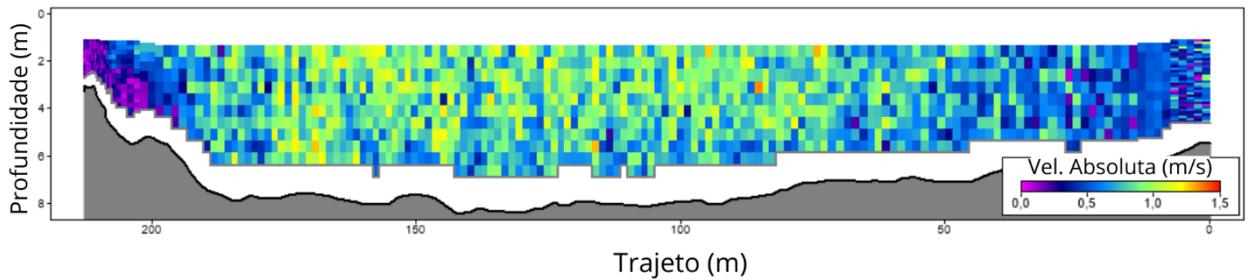


Figura 15 – Seção 1 (Campus Anglo), com a representação da velocidade absoluta (m/s) nas células, apresentado pelo software *RiverSurveyor Live®* (SonTek). Percebe-se também, as zonas brancas abaixo do perfil não medidas (*blank areas*). Fonte: Próprio autor.

As tabelas (2 e 3) abaixo apresentam o resumo das vazões nas campanhas realizadas, variável fundamental para o cálculo da descarga de sedimentos em suspensão no Canal São Gonçalo (GONÇALVES, 2020). Na Seção 1, foram observadas a vazão mínima de 220,5 m³/s e a máxima de 2.075,3 m³/s. Já na Seção 2, foram observadas a vazão mínima de 722,5 m³/s e a vazão máxima de 1.361,7 m³/s. Em ambas as seções não foi constatada a presença de fundo móvel, que poderia acarretar em erros nas medições, como já demonstrado pelos trabalhos de Lima (2016) e Noschang (2018), realizados nos mesmos locais, citado por Gonçalves (2020).

Tabela 2 – Medidas de vazão realizadas na Seção 1 – Pelotas.

Data	Vazão (m ³ /s)	Velocidade Média (m/s)	Área (m ²)
13/03/2019	807,24	0,54	1502,08
11/04/2019	540,19	0,33	1643,55
11/06/2019	220,50	0,15	1498,10
24/06/2019	661,02	0,42	1558,52
25/07/2019	591,96	0,42	1410,14
31/07/2019	995,83	0,70	1417,85
21/08/2019	1156,03	0,82	1414,72
27/08/2019	1104,45	0,81	1368,09
17/09/2019	1501,60	1,05	1431,51
08/10/2019	1377,57	0,99	1395,79

14/10/2019	1334,26	0,93	1432,78
05/11/2019	2075,28	1,35	1534,82
20/11/2019	1550,52	0,99	1559,96

Tabela 3 – Medidas de vazão realizadas na Seção 2 – Santa Isabel do Sul.

Data	Vazão (m³/s)	Velocidade Média (m/s)	Área (m²)
26/06/2019	797,34	0,64	1240,30
03/07/2019	1073,71	0,80	1338,10
09/07/2019	722,46	0,57	1271,50
02/08/2019	894,67	0,66	1362,90
03/09/2019	1058,24	0,76	1399,40
10/09/2019	875,56	0,63	1389,00
16/10/2019	1107,98	0,74	1504,40
06/11/2019	1361,73	0,84	1630,63

Ao final de cada medição os dados são salvos pelo dispositivo conectado com o equipamento. O mesmo software (*RiverSurveyor Live*[®]) foi usado para o pós-processamento dos dados de vazão e validação desses. Junto aos valores de velocidade, extraídos de cada célula pelo ADCP e que permite a obtenção da vazão do canal, também é retornado o valor de SNR, fundamental para o desenvolvimento da equação da estimativa da CSS (Figura 17). No entanto, como não é possível realizar a correção para dados de sedimentos no próprio software, estes foram extraídos no formato ASCII para posterior observação e análise em planilha Excel[®]. A correção do SNR e a construção da equação para estimativa da CSS serão explicadas e discutidas no item 5.6.

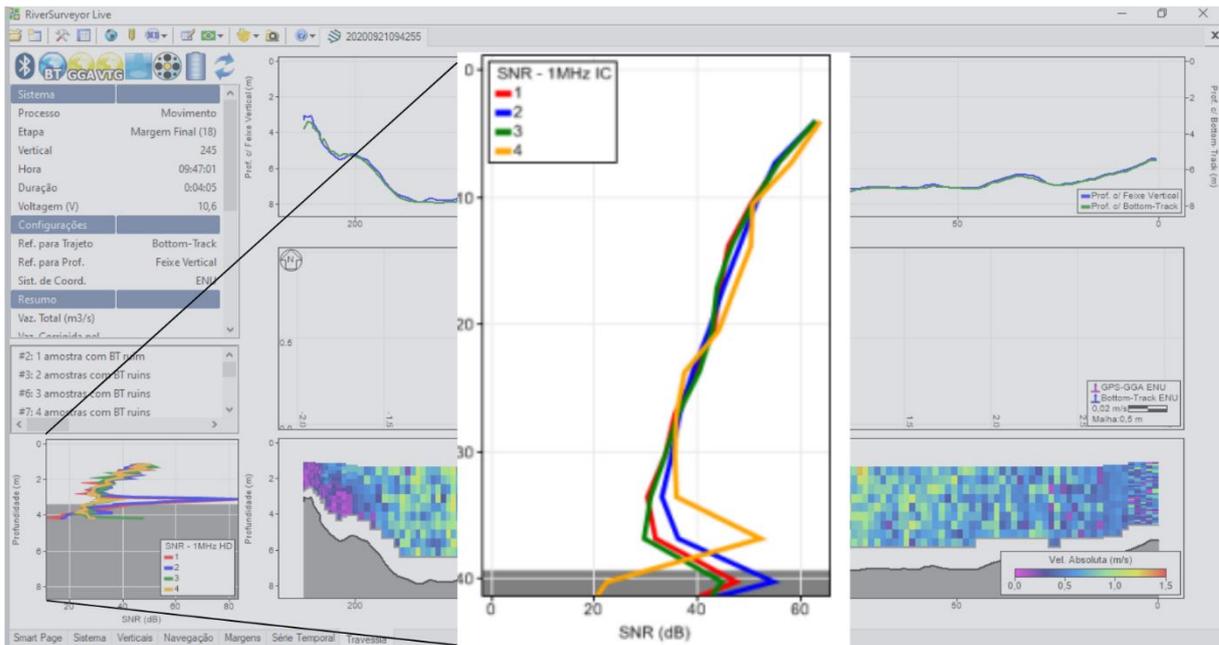


Figura 16 – Visualização em zoom do SNR medido pelo ADCP. Fonte: Próprio autor.

5.4 Obtenção de dados da amostragem por Integração da Vertical

Os dados gerados pela amostragem por integração na vertical foram obtidos em duas etapas principais: amostragem de sedimento em suspensão nas duas seções transversais analisadas, e subsequente a coleta dos materiais, sua quantificação em laboratório. Como as 21 campanhas foram realizadas em um intervalo de aproximadamente de 9 meses, isso possibilitou que as amostragens de sedimentos ocorressem em diferentes condições hidrológicas e climáticas. Durante o monitoramento, 13 amostragens foram realizadas na Seção 1 – Campus Anglo, e 8 amostragens na Seção 2 - Santa Isabel do Sul.

Foi utilizado o método de Igual Incremento de Descarga - IID, com 6 verticais amostradas, sendo coletadas 2 amostras por vertical para melhor representatividade (Figura 18). Durante as campanhas amostragens foram utilizados amostradores como o DH-59 e o D-49 (Figura 19), os quais possuem limitação de profundidade para a coleta da amostra (4,6 metros para todas as verticais). Os amostradores possuem uma garrafa coletora de 470ml e em ambos foi utilizado o bico de 1/8". A velocidade de trânsito e as distâncias entre as verticais foram calculadas a partir do software Hidro Sedimentos® (BACK *et al.*, 2012). Foi utilizado uma estação total para o correto balizamento do barco nas seções estudadas.

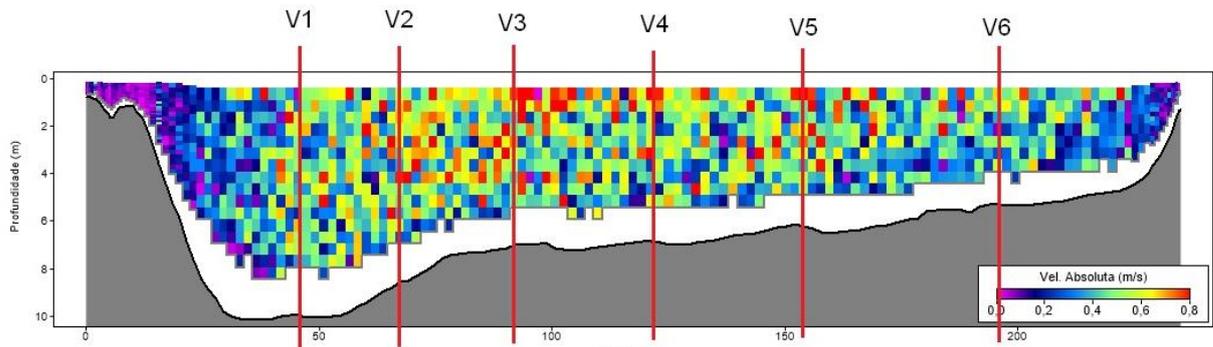


Figura 17 - Exemplo das 6 verticais definidas pelo método IID no perfil transversal de uma das seções amostradas. Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, cumprindo todas as etapas para o completo procedimento de amostragem, as amostras coletadas (duas amostras por vertical) foram armazenadas em frascos de vidro que posteriormente foram conduzidas para o laboratório do NEPE - HidroSedi, no Campus Anglo – UFPel, para a determinação da CSS através de procedimentos laboratoriais, descritos a seguir.

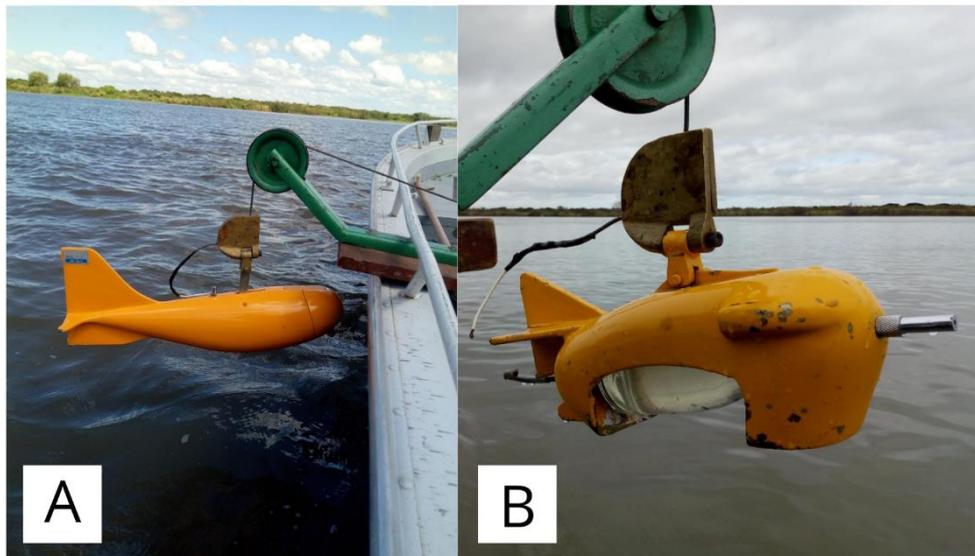


Figura 18 – Amostradores na vertical utilizados. A) D-49 e b) DH-59. Fonte: Próprio autor.

5.5 Determinação da CSS em Laboratório

Em laboratório, os passos para aferir sobre a CSS seguiram o método de filtragem DNAEE (1970). A Figura 20 apresenta o fluxograma do processo de preparo e processamento das amostras. Nesse procedimento, a etapa de filtragem (Figura 21) é responsável pela passagem da mistura física água-sedimento pelas membranas filtrantes, que retêm as partículas sólidas, apresentadas na Figura 22. Com isso, divide-se a amostra entre as duas variáveis, água e sedimento, e possibilita mensurar o objetivo final, a quantificação da CSS através da equação 17.

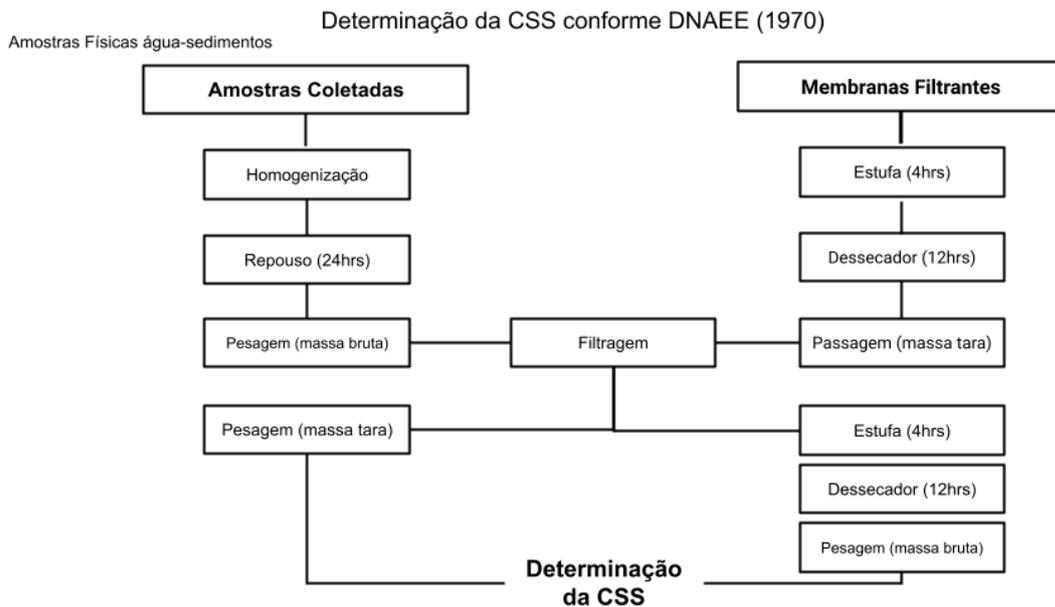


Figura 19 – Fluxograma dos processos laboratoriais para determinação da CSS das amostras físicas água-sedimento. Fonte: Próprio autor.

$$CSS = \frac{m_{SB} - m_{ST}}{\sum_{i=1}^n (m_{ABi} - m_{ATi})} \times 10^6 \times Fc + Cp \quad (17)$$

Em que:

Css = Concentração de sedimentos em suspensão (mg/l)

m_{SB} = Massa bruta do sedimento filtrado, membranas (g)

m_{ST} = Massa tara da membrana (g)

m_{ABi} = Massa bruta da i-ésima sub-amostra (g)

m_{Ati} = Massa tara da i-ésima sub-amostra (g)

10^6 = Fator de conversão de g/g para mg/kg – (mg/kg) / (g/g)

F_c = Fator de conversão de CSS de mg/kg para mg/l – (mg/l) / (mg/kg)

C_p = Correção nula de precisão intermediária do procedimento analítico



Figura 20 – Sistema montado para execução do método de filtração das amostras. Fonte: Próprio autor.



Figura 21 – Membranas filtrantes e as partículas sólidas retidas. Fonte: Próprio autor.

Abaixo apresenta-se o resumo das concentrações de sedimento em suspensão em cada uma das 6 verticais amostradas dentre as campanhas realizadas, além da amostra composta dos dias amostrados (Tabela 4). Ressalta-se, que a CSS apresentada é uma média de duas amostragens em cada vertical. Das medições realizadas, 5 verticais não obtiveram os valores finais. Dentre elas, as falhas do dia 24 de julho de 2019 nas verticais 3, 4, 5 e 6 ocorreram devido a interrupção da coleta após a segunda vertical por conta de condições climáticas extremas no dia da amostragem. A falha do dia 16 de outubro, no entanto, foi devido a erros causados no processamento das amostras durante a determinação da CSS em laboratório, sendo necessário a exclusão destes valores de CSS da vertical 1 para essa data. Detalhes sobre o experimento encontram-se descritos no estudo original de Gonçalves (2020).

Tabela 4 – Tabela do valores da CSS (mg/l) resultantes de cada vertical amostrada em ambas as seções. Fonte: Gonçalves, 2020.

Seção 1 - CSS [mg/l]								
Série	Data	1	2	3	4	5	6	Composta
1	13/Mar	43.19	42.76	38.84	50.79	53.33	53.16	46.93
2	11/Apr	24.66	24.32	24.76	27.22	27.96	32.85	26.66
3	11/Jun	7.51	12.57	10.25	8.76	14.34	11.31	11.23
4	24/Jun	34.91	37.23	38.03	39.17	47.19	44.33	39.25
5	24/Jul	40.73	41.51	-	-	-	-	41.20
6	31/Jul	43.40	43.83	50.50	49.38	48.14	46.05	46.83
7	21/Aug	54.73	53.39	59.37	60.55	57.87	56.15	57.05
8	27/Aug	54.99	51.77	59.09	54.99	58.51	57.39	55.97
9	17/Sep	35.40	37.35	41.73	42.43	42.42	43.57	40.29
10	8/Oct	28.34	30.96	35.82	34.66	38.03	36.92	33.92
11	14/Oct	37.41	40.01	42.35	45.50	52.79	51.96	45.06
12	5/Nov	17.34	18.08	18.15	16.27	21.00	25.05	19.17
13	20/Nov	15.99	15.41	14.86	16.78	16.61	17.34	16.12

Seção 2 - CSS [mg/l]								
Série	Data	1	2	3	4	5	6	Composta
1	26/Jun	-	95.49	93.41	104.95	122.07	141.07	106.87

2	3/Jul	85.51	101.60	119.26	137.63	154.44	171.99	129.45
3	9/Jul	32.33	38.41	42.99	48.31	47.18	47.01	43.20
4	2/Aug	89.40	94.13	93.72	95.01	94.31	93.50	93.44
5	3/Sep	71.44	71.44	71.59	67.09	67.12	64.01	68.69
6	10/Sep	50.69	49.05	42.75	44.40	41.19	38.69	44.14
7	16/Oct	22.82	19.98	30.31	53.50	21.34	19.70	27.09
8	6/Nov	9.48	13.35	11.06	11.51	11.57	10.30	11.29

Na Seção 1 o valor mínimo de CSS medido encontrado pelo autor foi de 11,27mg/l (16/06/2019) e o valor máximo foi de 57,05mg/l (21/08/2019), constatando pouca amplitude nas campanhas realizadas por conta das baixas concentrações calculadas. No entanto, os valores de CSS por vertical na Seção 2, localizada em Santa Isabel do Sul, apresentaram uma maior amplitude nos dados de CSS observados. O valor mínimo de CSS observado na Seção 2 foi de 11,29mg/l (06/11/2019) e o valor máximo observado foi de 171,99mg/l (03/07/2019). A amplitude da CSS nas seções é fator importante para a relação com o SNR para termos a percepção do seu comportamento nas diferentes proporções.

5.6 Construção do modelo para estimativa da CSS via SNR

Após extraídos e tabulados os dados de SNR de cada dia de medição, desenvolveu-se uma série de etapas visando a correção do SNR. Primeiramente selecionou-se a vertical de SNR localizada na mesma posição da vertical de CSS amostrada fisicamente. Visando minimizar o erro em relação a posição entre a amostra física (posição exata é complexa de se obter) e as verticais de SNR, o procedimento se deu da seguinte forma:

- 1º) Observação da distância da margem até a vertical amostrada fisicamente;
- 2º) Seleção da vertical de SNR (vertical principal) representante da mesma posição que a amostragem física;
- 3º) Seleção das verticais laterais (esquerda e direita);
- 4º) Cálculo SNR médio para cada célula das 3 verticais (média dos 4 feixes);

5º) Cálculo SNR médio para cada vertical (média dos SNRs médios de cada célula das verticais). Limite de profundidade de 4,6 metros, mesma dos amostradores físicos que estão limitados a essa distância;

6º) Criação de uma vertical média através do cálculo do SNR médio entre as verticais.

7º) Definição da vertical (média, principal, da direita ou da esquerda) mais representativa pela relação simples entre os valores de SNR x CSS observada.

A Figura 23 é uma exemplificação de como foi realizado o processo de coleta e escolha dos dados de SNR que se utilizou. Dessa forma, a “nuvem de pontos” formada pela distribuição SNR x CSS observada permitiu compreender o comportamento da relação. Em seguida, após análise do Coeficiente de Determinação (R^2), pode-se escolher a vertical que melhor se adapta para a seção.

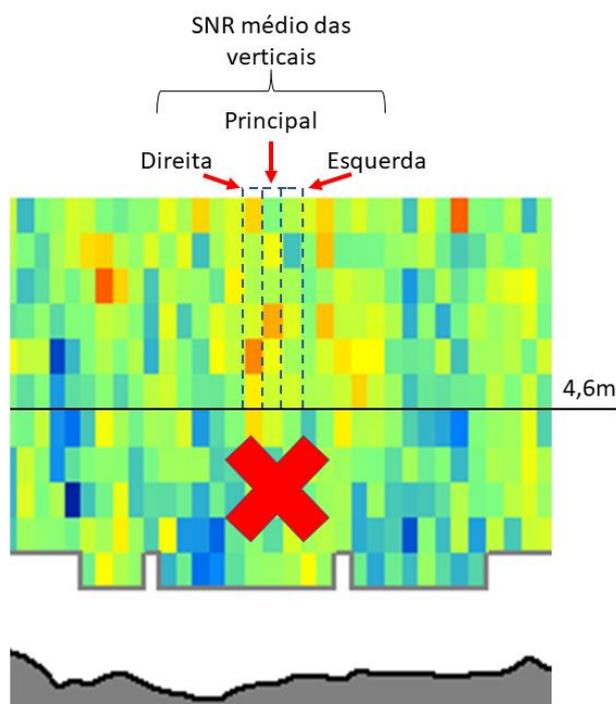


Figura 22 - Exemplificação da escolha das verticais para o estudo nos 4,6 metros de profundidade, limitado pela distância da amostragem física. Fonte: Próprio autor

Após extração dos valores de SNR para cada uma das 6 verticais amostradas por seção, procedeu-se para a etapa de correção. Nesse aspecto, considerando a falta de dados granulométricos, optou-se pelo método simplificado partindo da equação do sonar (URICK, 1983), modificada por Gartner (2004) e Guerreiro (2011),

explicado no item 4.3.2. A correção utilizou as equações 13 e 16, onde necessitou-se dos dados de temperatura da água no momento da medição, fornecido pelo ADCP para cada vertical amostrada, como também dados da frequência utilizada (1MHz).

Dessa forma chega-se ao termo TL (Eq. 7), relativo às perdas de transmissão. Ressalta-se que a correção para o campo próximo não foi necessária, a tecnologia *SmartPulse* utilizada pelo ADCP já corrige esse fator. O termo RL da equação de URICK (1983), relativo ao nível do eco que retornou ao equipamento, é considerado o próprio SNR medido. Dessa forma, tendo corrigido os valores de SNR (termo RB da Eq. 4) elaborou-se uma relação entre os valores de $\text{Log}_{10}(\text{CSS})$ em mg/l e os de SNR corrigido em dB com o objetivo de obtermos os coeficientes A (intercepto) e B (inclinação). Obtendo-se os coeficientes pelo método dos mínimos quadrados, aplica-se a equação final para obtenção do modelo de CSS estimada (GARTNER, 2004), apresentada no item 4.3.2, equação 3. A figura 24, abaixo, resume a metodologia para a correção do SNR e a construção da fórmula para o cálculo da CSS. Observa-se que a utilização do R de 4,6 metros de forma fixa foi apenas para a construção do modelo, quando realizada a estimativa para todos os dados de SNR, utilizou-se R como sendo a profundidade de cada célula.

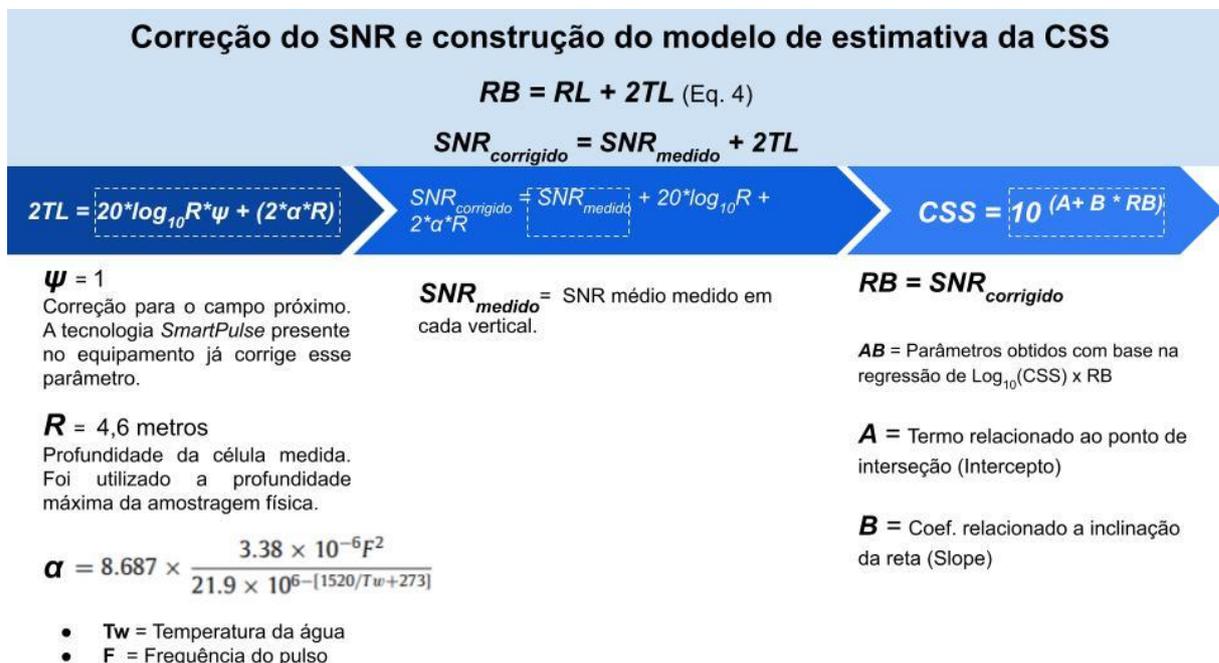


Figura 23 - Resumo da metodologia seguida para a construção da estimativa de CSS através de dados de SNR. Fonte: Próprio autor.

Obtido os modelos para estimar a CSS construídos para cada seção, aplicou-se as equações para todos os dados de SNR coletados pelos ADCP. Dessa forma, é possível estimar de forma discretizada a CSS para cada célula medida. Esta etapa foi desenvolvida a partir de rotina em ambiente MATLAB. Primeiramente, a rotina utiliza-se da relação construída para corrigir o SNR, posteriormente aplica os SNRs corrigidos no modelo de estimativa de CSS utilizando os coeficientes ajustados (A e B) para cada seção. Ressalta-se que a rotina leva em consideração os valores de SNR, os valores de frequência do som e de temperatura da água para cálculo do valor alfa para atenuação da água (α). Com os valores de α e de profundidade para cada célula, aplica-se o modelo de estimativa da CSS, obtendo-se como resposta a CSS para cada uma das células do perfil.

6. Resultados

6.1 SNRs selecionados

Os valores de SNRs das verticais amostradas, extraídos das medições com o ADCP, estão apresentados abaixo. A Tabela 5 refere-se aos valores da Seção 1, Campus Anglo, da Universidade Federal de Pelotas, já a Tabela 6, refere-se à Seção 2, localizada em Santa Isabel do Sul. As duas tabelas são separadas a modo de apresentar o resultado do valor médio dos 4 feixes para cada uma das verticais estudadas, tanto para uma vertical “média”, quando para a vertical principal e as duas verticais afastadas (uma para o lado direito e uma para o lado esquerdo).

Tabela 5 - Quadro resumo dos SNRs (dB) resultantes de cada vertical amostrada na Seção 1 - Anglo, Pelotas.

Seção 1 - Média Geral das Verticais							
Série	Data	1	2	3	4	5	6
1	13/mar	42,69	46,06	46,69	46,74	45,29	46,19
2	11/abr	33,87	33,66	34,86	35,06	37,18	36,79
3	11/jun	29,25	26,30	26,54	27,53	27,81	28,98
4	24/jun	41,20	37,01	39,68	41,71	42,93	41,73
5	25/jul	39,73	40,06	42,03	42,49	44,06	44,42
6	31/jul	35,54	37,29	37,58	37,78	38,58	33,20
7	21/ago	36,24	37,20	37,63	39,41	40,29	41,02
8	27/ago	38,66	38,92	39,50	41,06	41,52	42,09
9	17/nov	41,14	41,91	42,38	45,80	44,67	48,55
10	08/out	37,27	39,46	39,34	41,54	40,63	44,48
11	14/out	40,43	41,49	41,17	42,11	44,76	44,74
12	05/nov	44,27	43,50	47,13	45,10	46,30	51,88
13	20/nov	40,08	40,48	40,56	41,75	42,89	41,94

Seção 1 – Vertical Principal						
Data	1	2	3	4	5	6
13/mar	41,99	41,62	45,01	46,19	45,43	44,98

11/abr	32,93	34,45	35,61	36,00	36,78	36,72
11/jun	29,39	26,69	27,20	27,98	27,89	28,36
24/jun	40,54	37,87	39,96	41,41	42,77	41,10
25/jul	40,15	39,57	42,42	42,29	43,49	44,25
31/jul	34,82	37,43	36,72	37,67	38,47	33,86
21/ago	36,51	36,67	36,98	38,86	40,33	41,04
27/ago	38,28	38,40	39,04	40,84	41,87	42,25
17/nov	40,81	41,63	42,26	45,78	44,13	48,21
08/out	37,57	39,68	39,05	40,65	39,87	44,48
14/out	40,28	41,86	40,50	41,43	44,59	43,62
05/nov	43,80	43,45	46,68	45,73	46,60	51,54
20/nov	40,13	38,69	39,88	41,68	42,57	40,97

Seção 1 - Vertical da Direita

Série	Data	1	2	3	4	5	6
1	13/mar	42,07	40,10	45,33	42,75	44,28	41,87
2	11/abr	34,31	34,47	35,75	34,51	37,12	36,89
3	11/jun	27,59	26,49	25,25	28,19	27,73	29,59
4	24/jun	41,12	37,39	39,44	41,77	42,92	42,07
5	25/jul	39,08	40,77	41,87	42,37	44,28	44,43
6	31/jul	36,30	37,12	38,54	37,82	38,78	34,12
7	21/ago	36,53	36,47	37,84	39,35	39,63	41,32
8	27/ago	38,77	38,86	39,91	40,62	41,74	42,02
9	17/nov	41,21	41,99	42,06	46,08	44,36	48,42
10	08/out	37,84	39,88	38,77	41,30	41,61	45,14
11	14/out	40,69	41,53	41,79	42,76	45,52	45,25
12	05/nov	43,65	43,04	47,59	43,03	44,87	50,67
13	20/nov	39,93	41,58	40,58	41,13	42,73	42,79

Seção 1 - Vertical da Esquerda

Data	1	2	3	4	5	6
-------------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

13/mar	43,7938	44,616	45,263	42,691	45,25	44,781
11/abr	34,3563	32,069	33,213	34,669	37,63	36,775
11/jun	30,7625	25,728	27,163	26,4	27,8	29,003
24/jun	41,9438	35,772	39,653	41,959	43,11	42,031
25/jul	39,9625	39,838	41,8	42,822	44,4	44,584
31/jul	35,4938	37,334	37,491	37,85	38,51	31,613
21/ago	35,6781	38,456	38,075	40,006	40,9	40,713
27/ago	38,9281	39,497	39,534	41,734	40,94	42
17/nov	41,3969	42,122	42,8	45,522	45,53	49,003
08/out	36,4031	38,819	40,188	42,681	40,42	43,8
14/out	40,3281	41,081	41,228	42,125	44,17	45,35
05/nov	45,3594	44,006	47,131	46,538	47,43	53,419
20/nov	40,1875	41,153	41,222	42,425	43,37	42,069

Tabela 6 - Quadro resumo dos SNRs (dB) resultantes de cada vertical amostrada na Seção 2 – Santa Isabel do Sul.

Seção 2 - Média Geral das Verticais							
Série	Data	1	2	3	4	5	6
1	26/jun	46,49	47,06	48,09	50,43	49,78	49,76
2	03/jul	45,86	46,95	43,18	46,49	48,83	47,63
3	09/jul	32,31	32,66	34,46	35,11	35,52	35,91
4	02/ago	45,23	40,85	42,11	40,62	45,73	44,94
5	03/set	38,07	37,93	38,06	37,93	41,64	42,48
6	10/set	36,94	36,76	36,48	36,97	42,97	45,78
7	16/out	39,19	34,78	33,93	34,18	35,05	38,94
8	06/nov	37,63	33,81	31,89	33,43	33,61	39,56

Seção 2 - Vertical Principal						
Data	1	2	3	4	5	6
26/jun	46,43	47,22	48,01	49,97	49,53	49,74
03/jul	45,66	46,54	42,49	46,45	48,93	49,36
09/jul	32,05	31,66	33,87	34,63	34,96	35,98

02/ago	45,02	40,46	44,70	40,31	45,86	44,78
03/set	37,53	37,64	37,88	37,59	41,79	42,25
10/set	36,69	36,57	35,79	36,40	42,76	45,38
16/out	38,32	34,45	32,96	33,19	34,41	38,42
06/nov	37,32	34,22	31,83	33,88	33,43	39,20

Seção 2 - Vertical Esquerda

Série	Data	1	2	3	4	5	6
1	26/jun	46,43	47,22	48,01	49,97	49,53	49,74
2	03/jul	45,66	46,54	42,49	46,45	48,93	49,36
3	09/jul	32,05	31,66	33,87	34,63	34,96	35,98
4	02/ago	45,02	40,46	44,70	40,31	45,86	44,78
5	03/set	37,53	37,64	37,88	37,59	41,79	42,25
6	10/set	36,69	36,57	35,79	36,40	42,76	45,38
7	16/out	38,32	34,45	32,96	33,19	34,41	38,42
8	06/nov	37,32	34,22	31,83	33,88	33,43	39,20

Seção 2 - Vertical Direita

Data	1	2	3	4	5	6
26/jun	46,71	46,94	47,85	50,94	50,54	50,57
03/jul	45,90	47,05	43,81	45,33	48,33	44,96
09/jul	33,06	33,60	34,85	35,69	36,14	35,54
02/ago	45,53	41,27	40,53	41,44	45,32	44,98
03/set	38,13	37,59	38,18	38,68	42,36	42,85
10/set	37,28	37,07	36,68	37,20	43,59	46,22
16/out	39,24	34,08	34,94	35,05	35,03	39,07
06/nov	37,63	33,58	31,86	32,94	33,67	40,13

Ao total foram extraídos 120 valores de SNR médios de respectivas 120 verticais. Na Seção 1 foram ao total 74 valores trabalhados, sendo observado o SNR médio de 39,97 (dB), máximo de 53,49 (dB) e mínimo de 25,72 (dB). Na Seção 2, 46

foram os dados totais extraídos de SNR, dos quais a média foi de 40,16 (dB), valor mínimo de 31,89 (dB) e o máximo de 50,42 (dB).

Nesse contexto, Oliveira (2019) avaliando o uso de equipamentos acústicos (RiverSurveyor M9[®]) para estimar a CSS no rio Guamá (PA) em zona costeira, gerou 45 valores de SNR para sua relação. Os resultados aqui corroboram com os encontrados pelo autor citado, pois o mesmo mediu SNRs da ordem de 27,3 até 49,5, em um curso d'água com a CSS variando entre 38mg/l e 362mg/l.

Na Laguna dos Patos, próximo ao exutório do canal, Ávila (2014), utilizou-se de dados de saída do ADCP os valores de amplitude do sinal acústico (Amp) e por isso necessitou corrigi-los conforme Eq.6. O autor obteve um dado amostral de 205 pares, sendo que foram de fato trabalhados 155 pares em consequência à exclusão de *outliers*. Wosiacki (2020), também aplicando a correção de SNR (utilizando o mesmo equipamento do presente trabalho) para estimativa de sedimentos em três locais distintos e com características de fluxo dissemelhantes entre eles, utilizou-se de um N amostral de 30 para construção de suas estimativas.

6.2 Escolha da vertical representativa

A escolha da vertical mais apropriada se deu a partir da análise da relação SNR e CSS nas verticais principais, da direita e, da esquerda, para ambas as seções, utilizando-se como parâmetro o coeficiente de determinação R^2 da regressão linear. Abaixo, nas Figuras 25 e 26, são apresentados os gráficos de regressão linear com as melhores relações nas duas seções estudadas. Ressalta-se que não houve exclusão de nenhum valor tendo como objetivo manter a fidelidade dos dados e a amplitude máxima das variáveis.

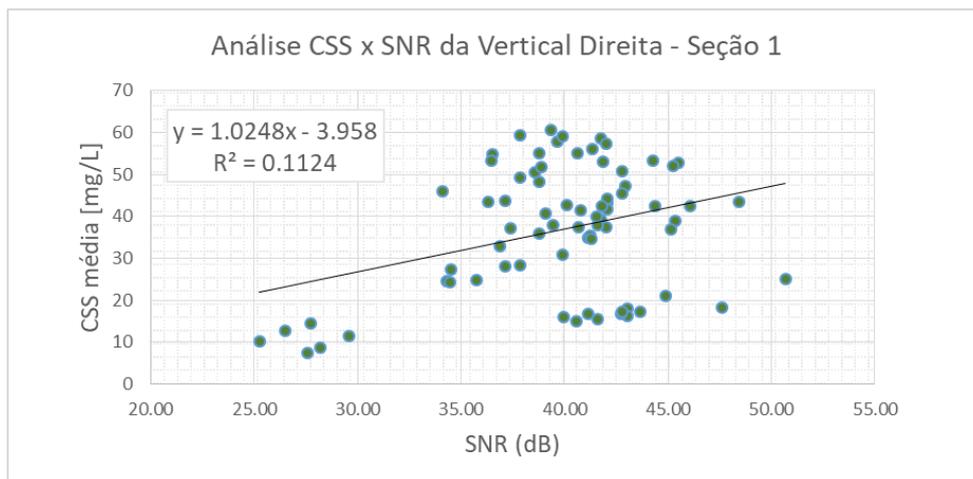


Figura 24 - Gráfico da regressão linear de todos os pontos da Seção 1 pela vertical da direita, com o coeficiente de determinação de 0,1124. Fonte: Próprio autor.

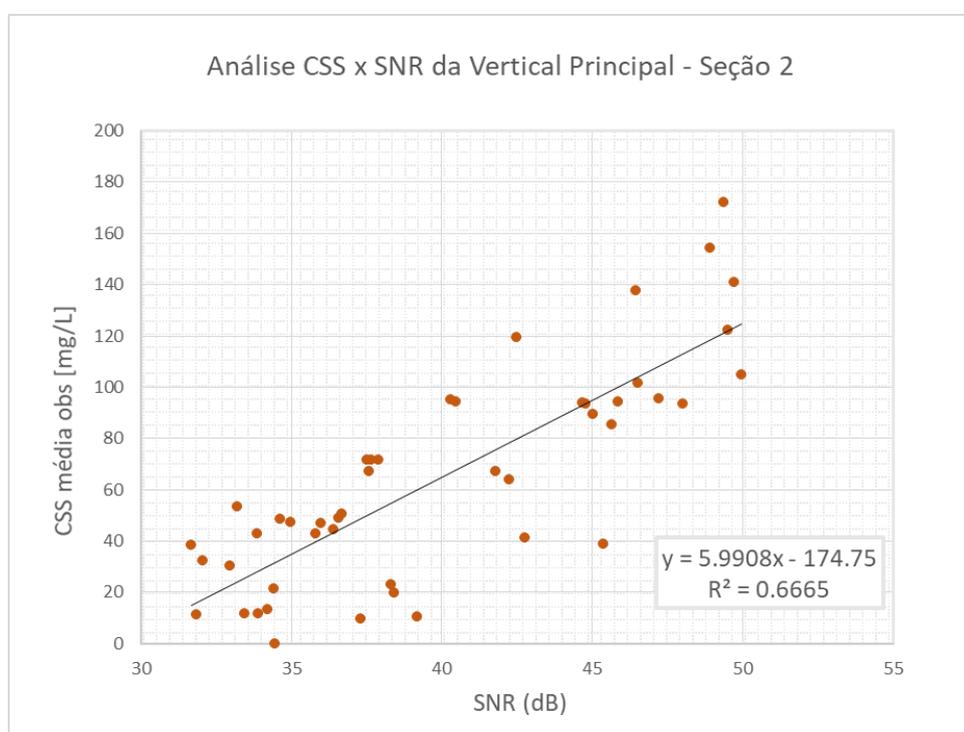


Figura 25 - Gráfico da regressão linear com a vertical principal e todos os pontos da Seção 2, com o coeficiente de determinação aproximado de 0,66. Fonte: Próprio autor.

A seção com melhor desempenho foi a de Santa Isabel (Figura 26), relacionando o SNR da vertical principal da seção com a CSS, resultando em um R^2 aproximado de 0,66. De forma oposta, a Seção 1, Pelotas (Anglo) apresentou um desempenho ruim (Figura 25), com coeficiente de determinação (0,11) para a relação SNR x CSS com a vertical da direita.

Conforme mencionado por Landers et al. (2016), a discrepância entre altas e baixas CSS medidas é fundamental para a análise do retorno do sinal medido. Isso

se deve a possibilidade de verificar se o ruído produzido pelo meio afeta pulso emitido pelo equipamento. Visualizando a Tabela 7, evidencia-se as amplitudes em cada relação estudada, tanto para a CSS quanto para o SNR, assim como seu respectivo número de pares e o coeficiente de determinação. As amplitudes da CSS identificadas na Seção 2, em Santa Isabel, são superiores as encontradas na Seção 1, em Pelotas. Enquanto a variação de SNR, ainda que em escala menor, foi o oposto, sendo maior a amplitude na Seção 1 e menor na Seção 2. Dessa forma, pode-se dizer que nas menores amplitudes de faixa de concentração de sedimentos têm-se condições um tanto inadequadas para a construção das relações entre pulso acústico e concentração de sedimentos, como por exemplo na Seção 1. Já, a variação obtida na Seção 2, reflete de forma positiva na construção da equação de estimativa da CSS.

Tabela 7 – Comparação das amplitudes cada relação estudada. Fonte: Próprio autor.

		Amplitude das amostras			
Seção 1 - Pelotas (Anglo)		CSS	SNR	Nº	R²
		(mg/l)	(dB)	Pares	
5	Relação da Vertical Principal		18.309		0.667
6	Relação da Vertical Direita	162	19.081	46	0.614
7	Relação da Vertical Esquerda		18.309		0.666
8	Relação da Vertical Média		18.538		0.653
Seção 2 - Sta. Isabel		CSS	SNR	Nº	R²
		(mg/l)	(dB)	Pares	
1	Relação da Vertical Principal		27.691		0.102
2	Relação da Vertical Direita	53.035	23.175	74	0.112
3	Relação da Vertical Esquerda		23.275		0.085
4	Relação da Vertical Média		25.576		0.108

6.3 Construção do Modelo

Utilizando-se dos dados das melhores relações observadas (vertical da direita para Seção 1, e vertical principal para a Seção 2) realizou-se a construção do modelo,

no qual foram realizadas as etapas de correção do SNR e desenvolvimento da equação para estimativa da CSS.

6.3.1 Correção do SNR medido

Conforme descrito no item 5.6, não houve necessidade de correção para o campo próximo. Seguindo a metodologia apresentada no item 5.6, o termo alfa (α_w) variou de acordo com a temperatura da vertical no momento da medição e a frequência utilizada pelo equipamento (1MHz em todas as verticais estudadas). O R utilizado foi de 4,6 metros. Tendo os termos RL e TL pôde-se corrigir os SNRs para ambas as seções. Com isso, para a obtenção da reta de calibração foram utilizados os valores logaritmos das concentrações de sedimentos em suspensão ($\text{Log}_{10}(\text{CSS})$) e os respectivos valores de retorno do sinal acústico corrigidos (SNR corrigido). Utilizando o método dos mínimos quadrados (regressão linear da reta), constatou-se os termos A (-0,7739) e B (0,0446) para Santa Isabel do Sul, com R^2 de 0.5654 (Figura 27). Já para a Seção 1, Pelotas, o termo A foi de 0,0154 e o coeficiente B de 0,673, com R^2 de 0,1071 (Figura 28).

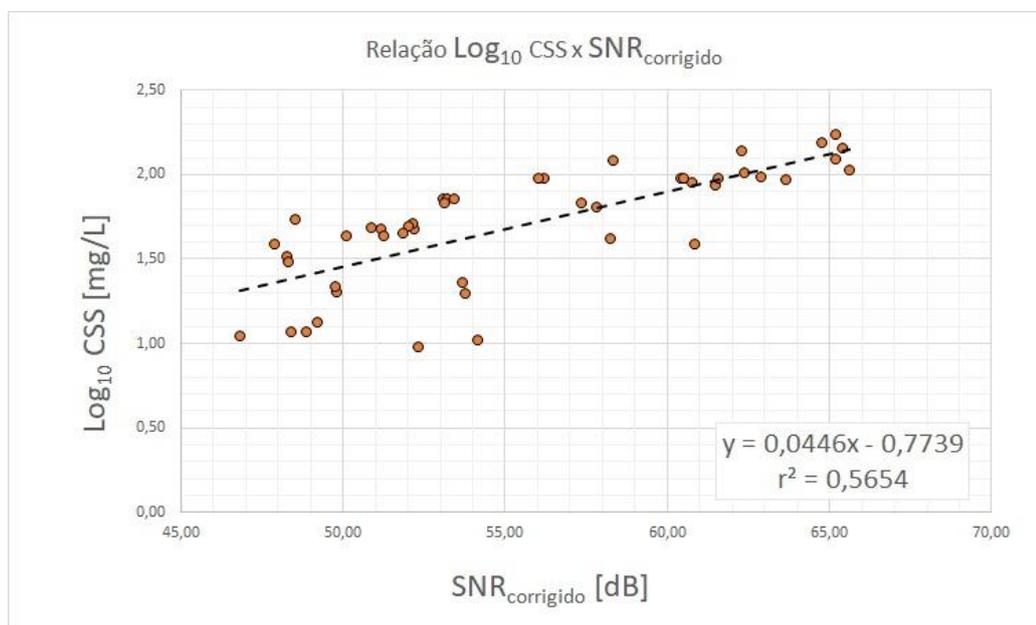


Figura 26 - Gráfico da regressão linear entre $\text{Log}_{10}(\text{CSS})$ e $\text{SNR}_{\text{corrigido}}$ para a Seção 2, Santa Isabel do Sul. Apresenta-se os coeficientes A e B. Fonte: Próprio autor.

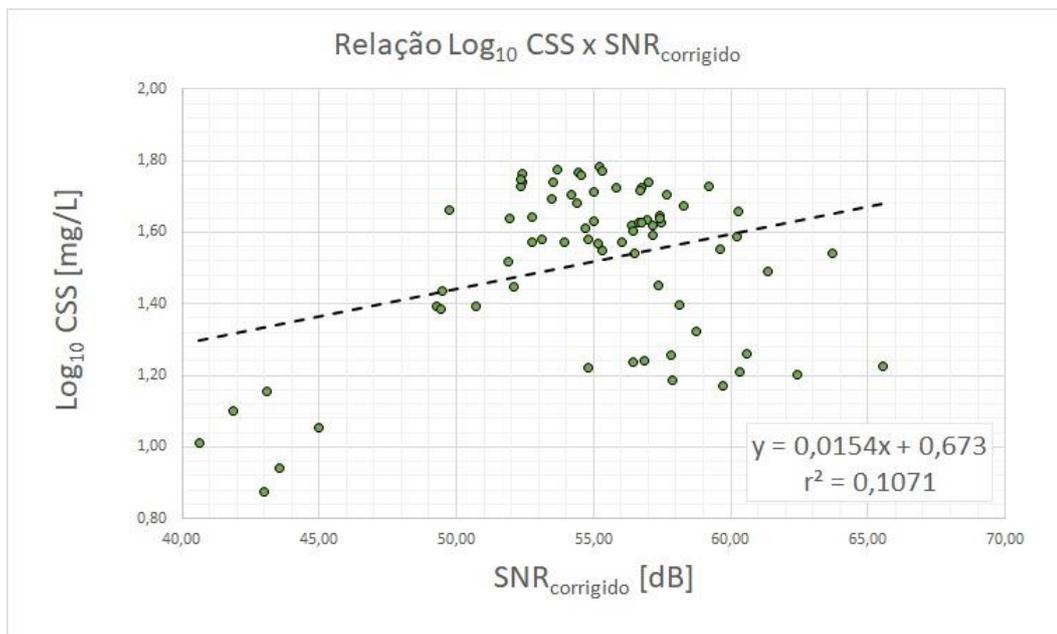


Figura 27 - Gráfico da regressão linear entre $\text{Log}_{10}(\text{CSS})$ e $\text{SNR}_{\text{corrigido}}$ para a Seção 1, Campus Anglo - Pelotas. Apresenta-se os coeficientes A e B. Fonte: Próprio autor.

6.3.2 Modelos de estimativa da CSS

Os coeficientes A e B são os termos finais para a construção do modelo de estimativa da CSS. Assim, tendo o modelo pronto para ambas as seções (Eq. 18 para Santa Isabel do Sul e Eq. 19 para Pelotas) com os coeficientes ajustados, observou-se a relação linear entre a CSS medida e a CSS estimada de modo a avaliar o coeficiente de determinação (R^2) e os erros produzidos pelos modelos. O R^2 entre a CSS medida e a CSS estimada para a Seção 2 foi de 0.7053, já para a Seção 1 foi de 0,0195 (Figuras no item 29). A relação encontrada na Seção 2 e a deficiente relação na Seção 1 serão discutidas no item 6.5.

$$\text{CSS} = 10^{(-0,7739 + 0,0446 * \text{SNR}_{\text{corrigido}})} \quad (18)$$

$$\text{CSS} = 10^{(0,0154 + 0,673 * \text{SNR}_{\text{corrigido}})} \quad (19)$$

6.4 Análise dos erros calculados

As métricas de erro para avaliar a qualidade do modelo em estimar a variável CSS, considerando essa sendo uma previsão de valores numéricos, deu-se de duas maneiras. Primeiro, foram avaliados os resultados de CSS estimada pela análise do Erro Absoluto Médio (MAE) e Erro Absoluto Médio Quadrático (RMSE), ambos retornando os resultados em função da unidade estudada, nesse caso mg/l. A avaliação do modelo pelo MAE reflete a diferença média absoluta (dados positivos) entre a variável observada (CSS observada) e a variável estimada (CSS estimada). Essa avaliação é a mais branda, pois entende que todos os valores têm a mesma relevância, seja ele afastado ou não dos valores corretos. Já o RMSE tem uma consideração diferente sobre os dados, pois atribui pesos diferentes aos valores. Se houver um *outlier* (ponto de dados que difere significativamente de outras observações), seu peso será maior para o cálculo do RMSE, deixando maior o valor do erro. Outra análise realizada foi a distribuição Normal de Gauss, que indica a distribuição dos erros gerados por acumulação, e é apresentado em porcentagem. No estudo, os limites extremos foram fixados em 10% (Ea10) e 90% (Ea90), com isso 80% dos valores restantes estarão dentro deste intervalo de erros.

A Figura 29 abaixo apresenta as relações de CSS estimada e CSS medida na proporção 1:1 para as duas seções estudadas de acordo com seus modelos. No gráfico estão dispostos os valores R^2 , MAE, RMSE, Ea10, Ea50 e Ea90 para ambas as seções, além do número de amostras de cada uma (n). A Seção 1 apresentou um MAE de 13,06 mg/l e um RMSE de 15,19 mg/l, com um total de 74 amostras. Já a Seção 2 obteve um MAE de 18,77 mg/l e um RMSE de 22,88 mg/l, com um total de 47 amostras. Os intervalos dos erros para Ea10, Ea50 e Ea90 da Seção 1, foram de -18,32, 5,54 e 24,15 mg/l, respectivamente, já na Seção 2 esses apresentaram valores de -25,86, 6,24 e 33,16 mg/l.

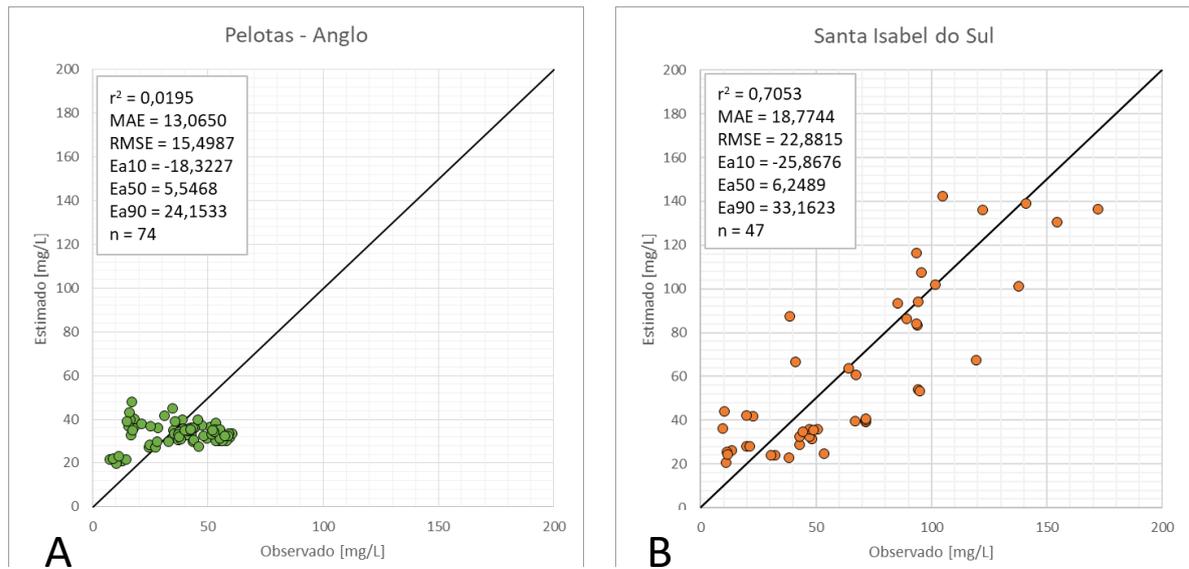


Figura 28 - Gráfico da Seção 1 (A) - Anglo e 2 (B) - Santa Isabel do Sul da relação 1:1 entre a CSS observada e a estimada, com os valores de R2, MAE, RMSE, Ea10, Ea50, Ea90, além do número de amostras. Fonte: Próprio autor.

Outra análise realizada foi através do cálculo dos resíduos, que representa o quão distante estão os pontos medidos do seu valor normalizado. No eixo x observamos os valores estimados e no eixo y os valores dos resíduos. Quanto maior a amplitude apresentada no eixo y, maiores os erros apresentados pelo modelo. Através da análise dos resíduos também é possível identificar a homogeneidade e o comportamento dos erros dentro da faixa de valores estimados. As Figura 30 e 31 representam os resíduos das seções 1 e 2, respectivamente.

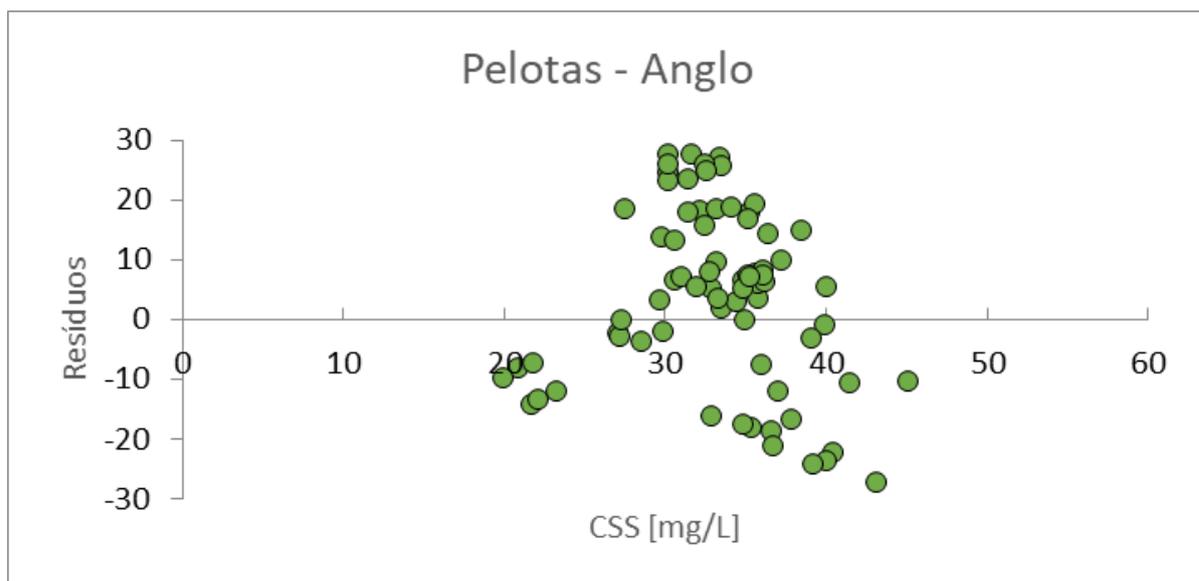


Figura 290 - Gráfico da Seção 1 da relação entre a CSS estimada e os resíduos gerados. Fonte: Próprio autor.

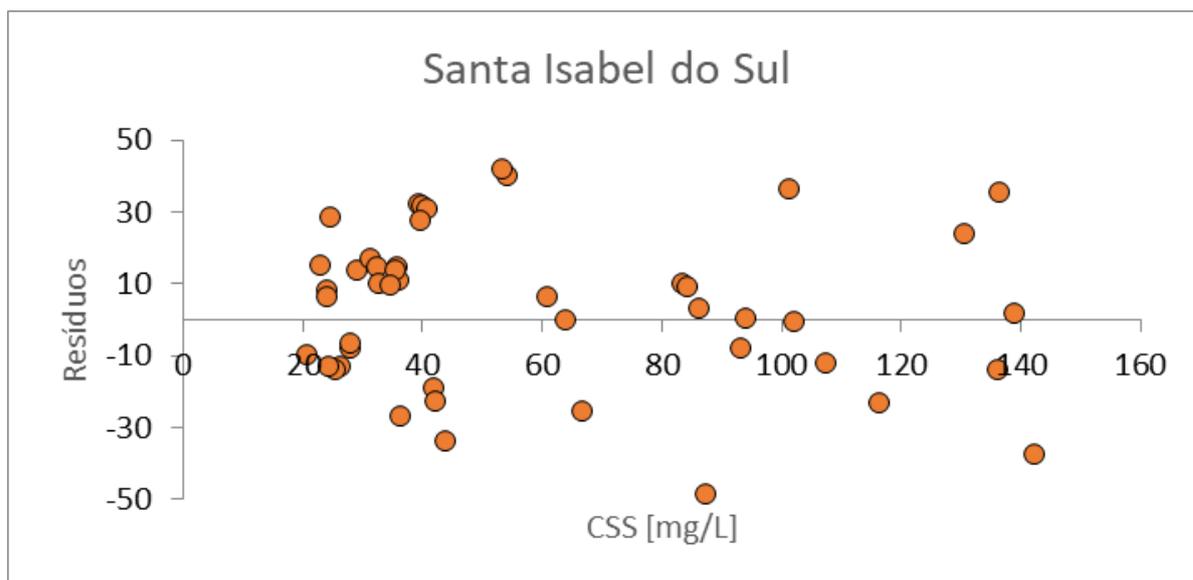


Figura 301 - Gráfico da Seção 2 da relação entre a CSS estimada e os resíduos gerados. Fonte: Próprio autor.

6.5 Plotagem dos Perfis a partir da CSS estimada

A partir da equação para a estimativa de CSS das duas seções, aplicou-se os cálculos para todos os valores de SNR das células de cada perfil. Dessa maneira, foi possível gerar os transectos de CSS estimada para todos os dias de medições realizadas. Como exemplo, a Figura 32 abaixo representa a CSS estimada de todo o perfil para as medições dos dias 08/10 (A), 14/10 (B) e 05/11 (C) de 2019 na Seção 1 (Pelotas). Já a Figura 33 é relacionada aos dias 26/06 (A), 03/07 (B) e 09/07 (C) de 2019, medidos na Seção 2 (Santa Isabel do Sul). Nas figuras pode-se perceber, além das variações de CSS para cada célula, os resultados de CSS estimada médio, mínima, máxima e a mediana para cada perfil. Por exemplo, observa-se que o perfil do dia 08/10/2019 (Figura 32A) apresentou valores de estimativa média de CSS de 22,28 mg/l, variando entre o mínimo de 5,44 e o máximo de 45,19 mg/l.

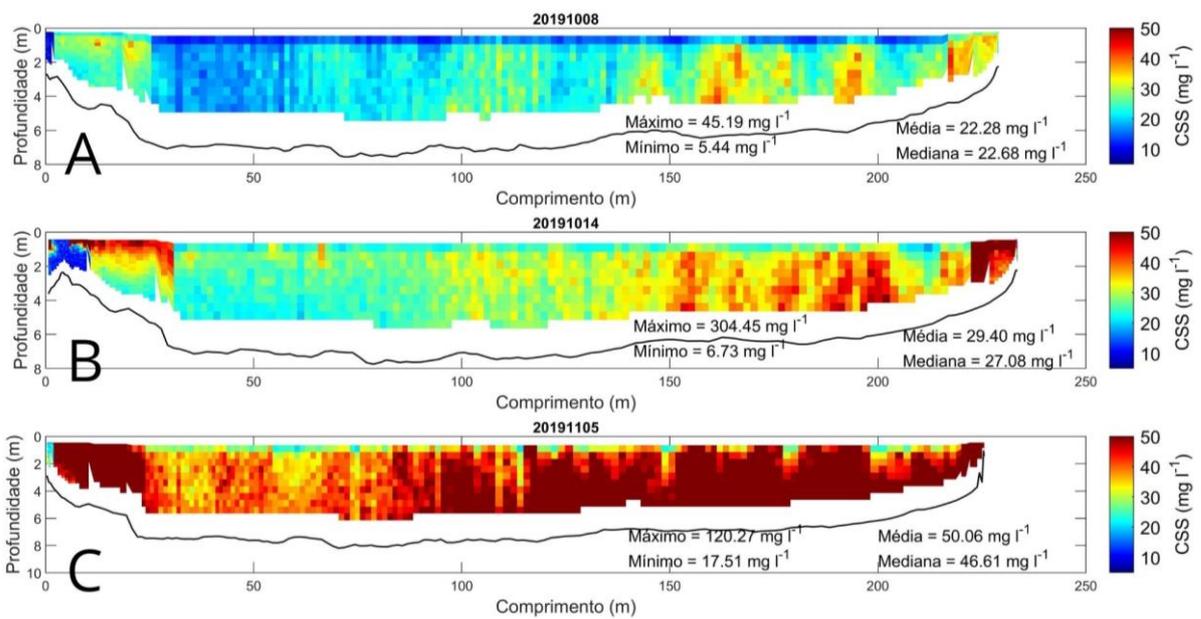


Figura 312 - Perfis de CSS estimados via SNR das medições dos dias 08/10 (A), 14/10 (B) e 05/11 (C) de 2019 na Seção 1 (Pelotas). Fonte: Próprio autor.

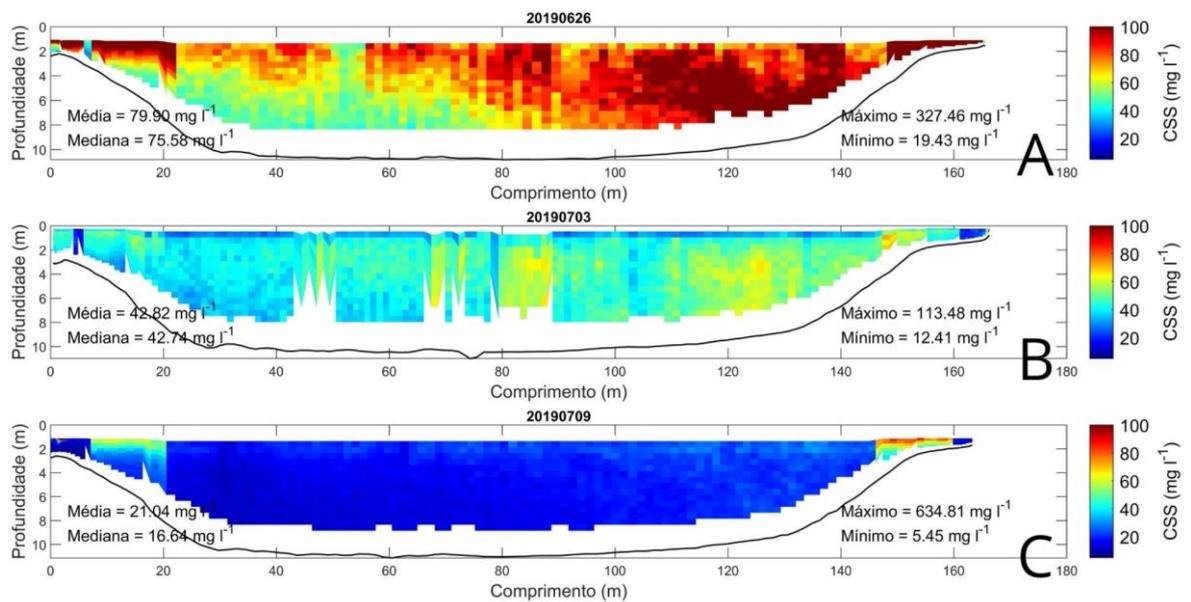


Figura 323 - Perfis de CSS estimados via SNR das medições dos dias 26/06 (A), 03/07 (B) e 09/07 (C) de 2019, medidos na Seção 2 (Santa Isabel do Sul). Fonte: Próprio autor.

Dessa maneira, a partir dos valores médios de CSS para todos os perfis analisados, pode-se também comparar com a CSS composta provinda das amostragens físicas. O Apêndice A apresenta a tabela com os valores obtidos de CSS

estimada e os erros gerados (Resíduo, MAE e RSME) para as 2 seções. O Apêndice B apresenta os valores dos dados calculados e a comparação os resultados obtidos.

6.6 Discussões

Conforme descrito por Guerrero et al (2011), quantificar a concentração de sedimentos em suspensão em rios usando ADCPs dinâmicos é muito atraente, dada a velocidade e a natureza multifuncional do equipamento, que poderia investigar simultaneamente a velocidade e CSS do corpo hídrico. Entretanto, o processo de desenvolver relações confiáveis entre as variáveis pulso acústico e presença de sedimentos, apresentam-se como bastante desafiadoras, e a assertividade de modelos pode variar muito entre cursos d'água distintos.

O coeficiente de determinação (R^2), relação física entre variáveis dependente e independente, também foi utilizado em estudos anteriores para avaliação de modelos de estimativa da CSS a partir de ADCPs (ÁVILA et al, 2014; LANDERS et al., 2016; OLIVEIRA, 2019; GONÇALVES, 2020; WOSIACKI 2020). Mesmo não realizando a correção para a atenuação causada pelo sedimento, os valores do coeficiente de determinação obtidos na Seção 2, Santa Isabel, apontam como favoráveis para estimar a CSS tanto para a correlação entre $\text{Log}_{10}(\text{CSS})$ e SNR corrigido, quanto para a CSS observada e a CSS estimada. Já os dados provindos da Seção 1 foram considerados não confiáveis pelo alto grau de incerteza gerado.

Realizando estudos com ADCP estático para as mesmas seções aqui analisadas e correlacionando o $\text{Log}_{10}(\text{CSS})$ com o SNR corrigido (método proposto por Gartner, 2004), Gonçalves (2020) obteve um R^2 de 0,43 para a Seção 2, enquanto neste estudo, a partir de um ADCP dinâmico obtivemos o valor de 0,56. Tais resultados se mostram eficientes para a quantificação de CSS na seção, haja vista que a utilização de ADCPs oferecem uma abrangência maior para as seções estudadas quando comparadas ao método tradicional. O valor relativo a 0,13 de diferença entre os trabalhos pode ser explicado pelo fato de o ADCP dinâmico ter uma melhor representatividade da seção e das verticais, coletando informações com maiores variabilidades. Além disso, a frequência utilizada é de 500 KHz no estático e 3MHz no dinâmico, mudando assim, a relação do sinal com o as partículas, podendo esse ser outro motivo para a diferença.

No entanto, quando analisada a Seção 1, Gonçalves (2020) obteve um R^2 de 0,44, muito superior aos quase 0,1 de coeficiente de determinação obtido neste trabalho, fato que pode ser justificado pela ineficiência e limitação da metodologia para a Seção 1. Conforme apontado no estudo de Gonçalves (2020), os dados obtidos na Seção 1 não apresentaram significativa correlação entre o SNR medido e a CSS estimada.

No estudo produzido por Latosinski et. al (2014), que investigou o transporte de sedimento de fundo no Rio Paraná com uso de ADCP dinâmico de 1,2 MHz, onde também realizou a estimativa de sedimentos em suspensão, foi demonstrado que o material fino (silte e argila) não teve boa correlação com o sinal de retroespalhamento acústico corrigido. Neste estudo também foi observado que a CSS apresentada teve variação menor 100mg/l, corroborando com a tese de que a Seção 1 possui presença de sedimentos muito finos. O que não descarta a hipótese de que a Seção 2 possa ter tido, também, a presença de sedimentos finos e/ou em conjunto com partículas de maior granulometria. Os autores ainda explicam que a concentração do material em suspensão ficou entre esses valores por conta de a absorção sonora influenciada pela viscosidade da água ser maior que reflexão causada pelos sedimentos, que entre diferentes tamanhos de grãos, os finos produzem uma reflexão maior. Dessa maneira, o retorno do sinal é governado pelas partículas grossas sem influência significativa do material fino, conforme relatado por diferentes autores (Flammer, 1962; Topping et al., 2007; Wright et al., 2010). Holdaway et al. (1999), por exemplo, encontraram um aumento de 26% na estimativa de concentração ao contabilizar a atenuação de sedimentos. Ainda nesse sentido, Wood et al. (2019), também apresentou em seu estudo que as calibrações desenvolvidas para CSS de partículas grossas resultaram em condições favoráveis para a aplicação das equações de correção. No entanto, quando o autor analisou-se as partículas finas o modelo não foi confiável. O autor comenta ainda afirma que a necessidade de desenvolver uma calibração específica para estimar a CSS para sedimentos finos é uma limitação do método.

Outro estudo desenvolvido em uma região próxima é o de Ávila et al. (2014), realizado no estuário da Laguna dos Patos, Rio Grande do Sul. Os autores obtiveram um coeficiente de determinação de 0,75 com a mesma relação de análise, $\text{Log}_{10}(\text{CSS})$ com o SNR corrigido. Os autores utilizaram-se de um ADCP do tipo dinâmico de 1,5 MHz. Uma análise mais elaborada desperta a atenção, pois embora uma boa

correlação tenha sido obtida, os dados passaram por um processo de filtragem na qual da série original ($n = 203$), 48 delas foram excluídos. Se não retirados, o coeficiente de determinação da regressão entre as séries seria de 0,32, próximos aos apontados por Gonçalves (2020), embora ambos ainda inferiores aos obtidos neste trabalho.

Wosiacki (2020), utilizando o mesmo equipamento *RiverSurveyor*[®] M9 e aplicando a correção para perdas para atenuação do sedimento com dados de granulometria do ambiente em estudo, Rio Taquari, obteve uma relação de $\text{Log}_{10}(\text{CSS})$ e SNR corrigido de 0,80. Oliveira (2019), ao estudar o rio Guamá, localizado no nordeste do Estado do Pará, relacionando a CSS medida com a estimada encontrou um R^2 de 0,68. Sakho (2019), com um ADCP dinâmico de 600 KHz no rio Rhône na França fazendo a correção para as atenuações para ambos os elementos, água e sedimento, obteve um R^2 de 0,60 em dois eventos extremos de vazão. Ambos os três estudos citados nesse parágrafo obtiveram resultados próximos ao encontrado na Seção 2, em Santa Isabel do Sul, com R^2 de 0,70.

Em relação aos gráficos de erro, que relacionam a CSS observada e CSS estimada em curva 1:1, tanto para o MAE quanto para o RMSE, os dados mostram uma discrepância significativa. Na Seção 1, como demonstrado anteriormente, é visível a concentração de pontos dentro de uma faixa única de valores de mg/l com baixa amplitude. Ou seja, o modelo desenvolvido para a Seção 1, mesmo obtendo erros MAE e RMSE entre 13 e 15mg/l respectivamente, não apresenta um comportamento linear e uniforme, e conseqüentemente a estimativa de CSS não será confiável. Para a Seção 2, no entanto, mesmo essa apresentando MAE e RMSE mais elevados que a Seção 1, na faixa de 18,77mg/l e 22,88mg/l, respectivamente, a Seção 2 apresenta distribuição com tendência à linearidade, sendo dessa forma, mais confiáveis os valores de estimativa de CSS para esta seção. Além do mais, pode se levar em consideração que a faixa amostral de CSS da Seção 2 esteve entre 11,29mg/l (06/11/2019) e 171,99mg/l (03/07/2019) reforçando a existência da condição de ajuste do modelo.

Ao analisar os resultados de Ea10, Ea50 e Ea80, é possível perceber que para a Seção 2, o modelo subestimou em até 25,86 mg/l e superestimou em até 33,16mg/l em 80% das vezes. Resultado esse, que sugere a possibilidade de estimativa da CSS pelo modelo apresentado para a seção. Entretanto, para a Seção 1, o limite inferior

ficou na casa dos -18,32mg/l e o superior foi de 24mg/l. Ou seja, a estimativa da CSS pelo modelo desenvolvido para Seção 1, superestima ou subestima quase que toda a amplitude dos valores amostrais, invalidando o modelo proposto.

Uma análise semelhante pode ser feita na análise com os resíduos gerados pelos modelos. A Seção 1 apresenta valores de resíduo menor que a Seção 2, no entanto, para a Seção 1 se torna inviável a estimativa da CSS devido ao fato de que a distribuição dos resíduos não apresenta um padrão comportamental para a faixa estimada, embora essa coincida com a faixa amostral da CSS na seção. Ou seja, o resíduo de 30mg/l tem a mesma proporção da amostragem física e estimada. Na Seção 2, levando em consideração a faixa amostral e a faixa residual gerada, percebe-se grandes erros, dentro da casa dos 50mg/l. O modelo da Seção 2, embora apresente comportamento com tendência à linearidade, apresenta erros de estimativa bastante expressivos, o que dificulta a sugestão de utilização do modelo para gerar estimativas confiáveis por essa análise.

Já no diagnóstico dos perfis gerados pela estimativa de CSS através da aplicação das duas equações produzidas (Eq. 18 e 19), percebe-se o alto grau de incerteza nos resultados obtidos. Verifica-se pelo Apêndice B que foram obtidos perfis com variação expressiva entre CSS medida e CSS estimada, por exemplo no dia 03/07/19, na qual a CSS em mg/l, foi de 129,45 na observada e 42,82 na estimada, representando uma diferença entre as duas medições de 86,63mg/l. Essa grande faixa de valores entre as duas CSS traz grandes incertezas na aplicação dos modelos quando comparadas aos métodos tradicionais.

BARANYA (2013) sugere que a amostragem realizada pelo método tradicional, tanto por IID quanto por IIL, também enfrentam resultados insatisfatórios quando analisadas para toda a seção, sendo esses métodos questionáveis. A média de CSS composta tida como valor de referência para as seções estudadas são calculadas através da seleção de algumas poucas verticais, as quais podem não representar todo o transporte de sedimentos de um corpo hídrico, já que a parcela não amostrada é muito maior. Como ressaltado por Latosinski et. al (2013), embora os métodos de coleta de sedimentos por Integração da Vertical ou Pontual, sejam razoavelmente precisos eles são muito trabalhosos, alcançando baixa resolução de espaço e tempo.

Ainda em relação aos perfis de CSS, ressalta-se aqui as grandes variações observadas na aplicação dos modelos nas margens. De fato, os perfis apresentam

grandes distorções de CSS ao passo que a profundidade vai diminuindo. A margem por ser uma região sempre fora das amostragens físicas, culmina por não se obter dados de CSS da mesma, não oportunizando assim, as correções para o SNR medido e sua relação com dados de CSS observada. Além disso, a medida dos SNRs realizada nas margens pelos ADCPs com tecnologia *smart pulse* utiliza-se das maiores frequências. Ou seja, quando as medidas são em baixas profundidades, no caso do *RiverSurveyor M9*, o equipamento passa de uma frequência de 1MHz para 3MHz. Dessa forma, pode ter ocorrido alguma imprecisão da equação nesta região, que pelo fato de não haver dados para aferição, impossibilita sua validade. Outra situação, é a necessidade de averiguar se a metodologia aplicada para as margens pode ser a mesma aplicada para maiores profundidades. A mudança de frequência faz com que o cálculo α (referente as correções para atenuação da água) atue de modo diferente. Por exemplo, pelo método simplificado com uma temperatura fixa de 20°C e variando a frequência entre 1 e 3 MHz, o valor de α passa de 0,2 para 1,859 respectivamente, fazendo com que o termo 2TL (total das perdas bidirecionais) passe de 15,15 para 30,35. Essa problemática pode apresentar desigualdades significantes para estimar a CSS, que pode ser melhor compreendida quando realizada a correção de SNR com dados de CSS marginais para posterior avaliação da equação.

De maneira geral, algumas sugestões podem ser discutidas para trabalhos futuros. Por exemplo, para a determinação da concentração dos sedimentos suspensos pelo método de amostragem por IID, em cada vertical poderia ser aplicado o método de B.C. Colby, onde se coleta cinco amostras a 10%, 30%, 50%, 70% e 90% da profundidade de cada vertical (CARVALHO, 2008). Esse método seria mais adequado, pois associaríamos as medidas de SNR via ADCP de cada célula com a uma concentração coletada pontualmente na mesma profundidade, maximizando a calibração dos modelos (OLIVEIRA, 2019). Outra situação já mencionada, é que a variabilidade à qual está sujeita o CSS torna o procedimento de calibração mais delicado, por isso a importância de obter os perfis de granulometria, o qual tem relação direta com a frequência acústica (THORNE e CAMPBELL, 1992).

Também poderia ser considerado o uso de filtros, relativos à exclusão de diferentes pontos amostrados, os quais se afastam de maneira expressiva da reta de regressão, chamados também de outliers (OLIVEIRA, 2019). Como demonstrado por Guerrero et al, (2011) e Wall et al, (2006), citado em Ávila (2014), este procedimento

é fundamental, quando ausentes os perfis de granulometria das partículas sólidas em suspensão, para se obter uma correlação mais robusta.

Em relação aos perfis gerados, esses dependem de mais estudos. Primeiro deve-se analisar as metodologias aplicadas para a computação dos dados para as margens, e isso deve ser feito por duas razões: i) executar a aquisição de dados de CSS das margens para correta calibração do SNR; ii) executar a avaliação da influência da mudança de frequência dos ADCPs nas equações utilizadas, já que frequência do ADCP se altera conforme a profundidade de aplicação. Segundo, é entender o porquê de os resultados dos perfis gerados apresentarem alguns problemas relacionados a células que não foram selecionadas para o cálculo, como por exemplo, o perfil do dia 03/07/19, em que células intermediárias não foram computadas.

7. Considerações Finais

A análise de CSS observada no Canal São Gonçalo e a CSS estimada tem duas conclusões distintas. Para a Seção 1, localizada no Campus Anlgo - Pelotas, os resultados foram considerados não correlatos, com R^2 aproximado de 0,11 para a relação $\text{Log}_{10}(\text{CSS})$ e SNR corrigido. Uma das possíveis causas que pode ter influenciado negativamente a relação foi o fato da baixa amplitude nos dados de CSS amostrados fisicamente. O valor mínimo de 11,27mg/l e o valor máximo de 57,05mg/l podem não ter permitido uma abrangência maior do feixe sonoro, retornando valores de SNR muito próximos, sem os diferenciar. Também há a hipótese de a seção ser regida pela presença de sedimentos do tipo muito finos que não são capazes de produzir uma condição favorável ao retorno do pulso acústico.

No entanto, na Seção 2, Santa Isabel do Sul a relação aqui investigada resultou em dados com boa aferição, apresentando um coeficiente de determinação de 0,70 para relação da CSS media observada e CSS estimada, se aproximando de resultados tidos como bons na literatura. Ainda na Seção 2, observou-se uma alta amplitude nos valores de CSS observada, entre 11,29mg/l e 171,99m/l, diferente da Seção 1.

Desta forma, considerando os resultados obtidos neste estudo, aceita-se como verdadeira a hipótese, inicialmente levantada, de que a relação entre CSS e SNR corrigido de equipamentos perfiladores acústicos dinâmicos é uma metodologia adequada para estimar a concentração de sedimentos em suspensão de forma discretizada no Canal São Gonçalo, apontando as ressalvas já mencionadas.

8. Referências

- ALBERTI, A. **Hidrovia do Mercosul**. DNIT, 26 de junho de 2016. Disponível em:<http://www.dnit.gov.br/hidrovias/hidrovias-interiores/hidrovia-do-mercosul>. Acesso em: 10 Out. 2021.
- ANA.; Medição de descarga líquida em grandes rios: manual técnico. **Agência Nacional de Águas**. Ed.2.; p. 94. 2014.
- ÁVILA, Rafael; OSMAR JUNIOR,; ANDRADE, Mauro. 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**, [S.L.], v. 19, n. 2, p. 299-309, 2014. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n2.p299-309>.
- BACK, A. J.; **HidroSedimentos, Versão 3.1**. 2011.
- BARANYA, Sandor; JOZSA, Janos. Estimation of Suspended Sediment Concentrations with Adcp in Danube River. **Journal Of Hydrology And Hydromechanics**, [S.L.], v. 61, n. 3, p. 232-240, 1 set. 2013. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.2478/johh-2013-0030>.
- BONCZYNSKI, Reginaldo Galski. **Modelagem Geométrica do Canal São Gonçalo através do Levantamento de Seções Topobatimétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Geoprocessamento), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2018.
- BORDAS, M.P; SEMMELMANN, F.R; TUCCI, C.E.M (org.). **Engenharia de Sedimentos. In: Hidrologia: ciência e aplicação**. Ed. da Universidade: ABRH: EDUSP, Porto Alegre, Cap 10. 1993.
- BURKHAM, D.C. **An approach for appraising the accuracy of suspended-sediment data: U.S.** Denver: Geological Survey Professional Paper 1333. 1985.
- CARVALHO, N. O.; JÚNIOR, N. P. F.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W.; **GUIA DE PRÁTICAS SEDIMENTOMÉTRICAS**. Agência Nacional de Energia Elétrica - Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. Brasília, DF. p. 116. 2000.
- CARVALHO, N. O; HORA, M. A. G. M. da; **Sedimentologia Fluvial: Estudos e Técnicas**. 1.ed. Porto Alegre: ABRH, p. 218. 2014.
- CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1991. 372p.
- CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrossedimentologia Prática**. 2. Ed. atual e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência, 2008, 599p.
- CHRISTOFOLETTI, A. **A mecânica do transporte fluvial**. Geomorfologia, n. 51, p. 1-42, 1977.

DEFENDI, V.; KOVACEVIC, V.; ARENA, F.; ZAGGIA, L.. Estimating sediment transport from acoustic measurements in the Venice Lagoon inlets. **Continental Shelf Research**, [S.L.], v. 30, n. 8, p. 883-893, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.004>.

DEINES, K. L. **Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers**. RD Instruments, San Diego. USA. 1999. doi:10.1109/ccm.1999.755249

DOWNING, J. P. Suspended sediment and turbidity measurements in streams: What they do and do not mean, paper presented at Automatic Water Quality Monitoring Workshop, B. C. **Water Quality Monitor**. Richmond, British Columbia, Canada, 1996.

EDWARDS, T. K.; GLYSSON, G. D.; **Field methods for measurement of fluvial sediment**. Open-file report - USGS. Reston, Virginia. USA. p. 86-531 1988.

GAMARO, P. E.; **Estimando carga de sedimentos com medidores acústicos Doppler. Sedimentologia Fluvial: Estudos e Técnicas – Capítulo 3**. Porto Alegre: ABRH. Volume 1, p. 218.2014.

GAMARO, Paulo Everardo Muniz. **Medidores Acústico Doppler de Vazão**. Assessoria de comunicação social, Itaipu Binacional, 164p, 2012.

GARCIA, Marcelo H.. Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice. 110. ed. Reston, Virginia: American Society Of Civil Engineers, 2008.

GARTNER, J. W. Estimation of suspended solids concentrations based on Acoustic Backscatter Intensity: theoretical background. In: **Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop**. Reno, NY, USA. p. 3. 2002.

GARTNER, Jeffrey W. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. **Marine Geology**, [S.L.], v. 211, n. 3-4, p. 169-187, out. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2004.07.001>.

GLENN P.H; PETER D. T; FLATT, D; JONES, S.E; PRANDLE, D (1999). **Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration**. 19(3), 0–441. doi:10.1016/s0278-4343(98)00097-1.

GONÇALVES, George Marino Soares. **Estimativa da Concentração de Sedimento em Suspensão no Canal São Gonçalo a partir de equipamentos acústicos**. 2020. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

GRAY J.R., LANDERS M.N. **Measuring Suspended Sediment. In: Ahuja S. (ed.) Comprehensive Water Quality and Purification.** Reston: US Geological Survey, 2014.

GRAY, J. R; GARTNER, J. W; ANDERSON, C. W; FISK, G. G; GLYSSON, G. D; GOODING D. J; HORNEWER, N. J; LARSEN, M. C; MACY, J. P; RASMUSSEN, P. P; WRIGHT, S. A., ZIEGLER, A. C. Surrogate Technologies for Monitoring Suspended-Sediment Transport in Rivers, in **Sedimentology of Aqueous Systems.** Wiley-Blackwell, Oxford, UK. 2010. doi: 10.1002/9781444317114.ch1.

GRAY, John R.; GARTNER, Jeffrey W. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring. **Water Resources Research.** V. 45, W00D29, 2009. doi:10.1029/2008wr007063.

GUERRERO, M.; SZUPIANY, R.N.; AMSLER, M. Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation. **Flow Measurement and Instrumentation**, [S.L.], v. 22, n. 5, p. 392-401, out. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.06.003>.

GUERRERO, M; RUTHER, N; SZUPIANY, R; HAUN, S; BARANYA, S; LATOSINKI, F. The Acoustic Properties of Suspended Sediment in Large Rivers: Consequences on ADCP Methods Applicability. **Water**, [S.L.], v. 8, n. 1, p:13.2016.

HARTMANN, C.; HARKOT, P. F. C. Influência do canal São Gonçalo no aporte de sedimentos para o estuário da laguna dos patos-RS. **Revista Brasileira de Geociências**, Rio Grande, v. 20, 1998.

HARTMANN, C; HARKOT, P.F.C. Influência do canal São Gonçalo no aporte de sedimentos para o estuário da Laguna dos Patos/RS. **Revista Brasileira de Geociências**, 20(1-4):329-332, março/dezembro de 1990.

HARTMANN, C; SCHETTINI, C.A. Aspectos Hidrológicos na desembocadura da Laguna dos Patos, RS. **Rev. Bras. Geociências**. 1991, 21, 371–377.

HAUN, S; LIZANO, L. Sensitivity analysis of sediment flux derived by laser diffraction and acoustic backscatter within a reservoir. **International Journal Of Sediment Research**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 18-26, mar. 2018. .

KARSBURG, R. M. **Precipitação e velocidade do vento na oscilação dos níveis d'água do canal São Gonçalo-RS.** 2016, 79p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

KISLER, J.K, FREY, A. R. COPPENS, A. B. SANDRES, J. V. Fundamentals of Acoustics. Wiley, 3 ed., 1982.

LANDERS, M.N; STRAUB, T.D; WOOD, M.S; DOMANSKI, M.M., 2016, Sediment acoustic index method for computing continuous suspended-sediment

concentrations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. C5, 63 p., <http://dx.doi.org/10.3133/tm3C5>.

LARSON, M. D., SIMIC MILAS, A., VINCENT, R. K.; Evans, J. E. (2018). Multi-depth suspended sediment estimation using high-resolution remote-sensing UAV in Maumee River, Ohio. **International Journal of Remote Sensing**, 39(15-16), 5472–5489. doi:10.1080/01431161.2018.1465616

LATOSINSKI, Francisco G.; SZUPIANY, Ricardo N.; GARCÍA, Carlos M.; GUERRERO, Massimo; AMSLER, Mario L.. Estimation of Concentration and Load of Suspended Bed Sediment in a Large River by Means of Acoustic Doppler Technology. **Journal Of Hydraulic Engineering**, [S.L.], v. 140, n. 7, p. 04014023, jul. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000859](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000859).

LIMA, Luciana Shigihara. **Estimativa de vazões para o Canal São Gonçalo, do sistema Lagunar Patos-Mirim-RS, através do método das velocidades indexadas**. 2016, 63p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Hídrica), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

MANIK, H M; A GULTOM, D; FIRDAUS; ELSON, L. Evaluation of ADCP backscatter computation for quantifying suspended sediment concentration. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S.L.], v. 429, p. 012035, 28 jan. 2020. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/429/1/012035>.

MARINO, G.S.G; BORGES, G.S; DOS SANTOS, L.B; GOMES, C. H. T; BIGLIARDI, I. C.M; AKIYOSHI, L. E. S. S; LOGUERCIO, G. C. Granulometria do sedimento de fundo do canal São Gonçalo na região do Porto de Pelotas. **Revista Ambientale**, v. 13, n. 2, p. 60-72, 16 jul. 2021.

MINELLA J. P. G; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Ciência Rural**, v. 41, 424-432. 2021.

MUELLER, D. S; WAGNER, C. R; REHMEL, M.S; OBERG, K.A; RAINVILLE, F. **Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat**. U.S: Geological Survey Techniques and Methods, 2013.

NORDIN, C.F. **The sediment discharge of rivers — a review**. Proceedings of the Florence Symposium, IAHS. 1981.

NOSHCANG, Anderson Andrei. **Estimativa de descarga líquida do Canal São Gonçalo na região de desembocadura da Lagoa Mirim, extremo sul do Brasil, utilizando o método das velocidades indexadas**. 2015, 53p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Hídrica), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2018

OLIVEIRA, Pablo José de. **Estimativa de sedimentos em suspensão utilizando um perfilador acústico de correntes por efeito Doppler**. 2019. 72 f. Dissertação

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

REICHEL, G. G; NACHTNEBEL, H.P. Suspended sediment monitoring in a fluvial environment: Advantages and limitations applying an Acoustic Doppler Current Profiler. **Water Research**, v. 28, n. 4, p. 751-761.

RONG-RONG Li, Y. J., KAUFMAN, Bo-Cai Gao and C. O. Davis, "Remote sensing of suspended sediments and shallow coastal waters. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 41, no. 3, p. 559-566, March 2003, doi: 10.1109/TGRS.2003.810227.

RUBEN, L.G. Dominguez; SZUPIANY, R.N; LATOSINSKI, F.G; WEIBEL, C.L; WOOD, M; BOLDT, J. Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): a software package for calibrating and processing trdi adcp data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers. **Computers & Geosciences**, [S.L.], v. 140, p. 104499, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104499>.

SANKHO, I; DUSSOUILLEZ, P; DELANGHE, D. *et al.* Suspended sediment flux at the Rhone River mouth (France) based on ADCP measurements during flood events. **Environ Monit Assess**, [S.L.] v.191, p. 508, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7605-y>

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, p. 372, 2001.

SCHUCK, Aline. **Utilização do Acoustic Doppler Profiler (ADP) para a estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e turbidez**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7822/SCHUCK%2C%20ALINE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

SCHULKIN, M; MARSH, H.W. Sound absorption in sea water. **J Acoust Soc Am**, v. 34, p. 864–865.1962.

SIMPSON, Michael R. **Discharge Measurement Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler**. Sacramento: USGS, 2001.

SONTEK, I. Y. **Manual do Sistema RiverSurveyor S5/M9**. San Diego: SonTek/YSI_. 2007. 44 p.

THORNE, P. D; VINCENT, C. E; HARCATTLE, P. J; REHMAN, S; Pearson, N. Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. **Marine Geology**, 98: 7-16, 1991.

THORNE P.D; CAMPBELL, S. C. Backscattering by a suspension of spheres. **J. Acoust Soc Am.** v. 92 (2), p. 978-986, 1992.

THORNE, P. D; HARDCLASTLE, P. J; SOULSBY, R. L. Analysis of acoustic measurements of suspended sediments. **Journal of Geophysical Research**, 98: 899-910, 1993.

THORNE P. D; HARDCASTLE P. J; HUMPHERY D. Flatt and J. D. On the use of acoustics for measuring shallow water suspended sediment processes. **Journal of Oceanic Engineering**. vol. 19, p. 48-57, Jan. 1994, doi: 10.1109/48.289450.

THORNE, P. D; HANES, D. N. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. **Continental Shelf Research**, v. 2002, n. 22, p. 603-632, 7 nov. 2001.

TOPPING, D. J; WRIGHT, S. A; MELIS, T. S; RUBIN, D. M. High-resolution measurement of suspended-sediment concentrations and grain size in the Colorado River in Grand Canyon using a multi-frequency acoustic system, paper presented. In: 10th International Symposium on River Sedimentation, World Assoc. for Sediment. and Erosion Res, 2007. Moscow.

TUCCI, C. E. M. (org), **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, EDUSP e ABRH, 1993. 495 p.

UMAR, M; RHOADS, B. L; GREENBERG, J. A. (2018). Use of multispectral satellite remote sensing to assess mixing of suspended sediment downstream of large river confluences. *Journal of Hydrology*, 556, 325–338. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.11.026

URICK, R. J. Principles of Underwater Sound. 3 rd Edition. **McGraw-Hill**, Inc., 423 pp. 1983.

VANONI, V.A. **Sedimentation engineering**. 2.ed. American Society of Civil Engineers. 2006

VANONI, V.A. Sedimentation engineering. New York: **ASCE**, 1975. 745p. Manuals & Reports on Engineering Practice, n.54.

VICENT, C.E; HARDCASTLE, P.J; REHMAN, S; PEARSON. Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. **Marine Geology**, v. 98(1), 7–16. 1991.

WALL, G., NYSTROM, E., LITTEN, S. & REPORT, S. I. Use of an ADCP to compute suspended-sediment discharge in the tidal Hudson River, New York. 2006.
Disponível em:
<http://www.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&ollection=ENV&recid=15957754>.

WOOD, M. S. et al. Measuring suspended sediment in sand-bedded rivers using down-looking acoustic doppler current proalers. In: **Joint Federal Interagency**

Sedimentation and Hydrologic Modeling Conference. [S.l.]: SEDHYD, 2019. p. 15.

WOOD, M. S.; TEASDALE, G. N. Use of Surrogate Technologies to Estimate Suspended Sediment in the Clearwater River, Idaho, and Snake River, Washington, 2008-10. **U.S Geological Survey Scientific Investigations Report.** 2013-5052. p. 30. 2013.

WOSIACKI, Liege Fernanda Koston. **Surrogate technologies for suspended solid dynamics assessment in surface waters.** 2020. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental; Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Department of Civil Engineering, Geo and Environmental Sciences, 2020.

WOSIACKI, L.F.K., SUEKAME, H.K., WOOD, M.S., *et al.* Mapping of suspended sediment transport using acoustic methods in a Pantanal tributary. **Environ Monit Assess**, 193, 493, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09266-w>.

WRIGHT, S.A; TOPPING, D.J; WILLIAMS, C.A. Discriminating silt-and-clay from suspended sand in rivers using side-looking acoustic profilers. **2nd Joint Federal Interagency Conference**, Las Vegas, NY. 2010.

XAVIER, B. C.; SILVA, I. O.; GUIMARÃES, L. G.; GALLO, M. N.; RIBEIRO, C. P.; FIGUEIREDO JR, A. G. Estudo experimental e numérico para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão por meio de sinais de espalhamento acústico. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS – ENES, 10., 2012. **Anais.** Foz do Iguaçu, PR. Brasil, 2012.

XIAOQING, Y. **Manual on sediment management and measurement.** Geneva: World Meteorological Organization, 2003. 158 p. (Operational hydrology report, n. 47).

YORKE, T. H; OBERG, K.A. Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers. **Flow Measurement and Instrumentation.** v. 13, n. 5–6, p. 191-195. 2002

ZIEGLER, A. C. Definition of optical methods for turbidity and data reporting, in Proceedings of the Federal Interagency Workshop on Turbidity and Other Sediment Surrogates. **Geol. Surv. Circ.**, 1250, 9 – 13. 2003.

APÊNDICE A – Valores obtidos de CSS estimada e os erros gerados (Resíduo, MAE e RSME) para as 2 seções.

Valores obtidos de CSS estimada e os erros gerados (Resíduo, MAE e RSME) para a Seção 1 e Seção 2. Fonte: Próprio autor.

Seção 1				
Css _{obs} [mg/l]	CSS _{est} [mg/l]	Resíduo [mg/l]	Erro absoluto	Erro quadrático
43,1925	35,5101	7,6823	7,6823	59,0184
42,7594	33,1120	9,6474	9,6474	93,0722
38,8356	39,8520	-1,0164	1,0164	1,0331
50,7940	36,3784	14,4156	14,4156	207,8099
53,3270	38,4012	14,9258	14,9258	222,7794
53,1646	35,2514	17,9133	17,9133	320,8847
24,6641	27,0459	-2,3818	2,3818	5,6727
24,3172	27,1962	-2,8789	2,8789	8,2882
24,7588	28,4602	-3,7015	3,7015	13,7007
27,2153	27,2384	-0,0231	0,0231	0,0005
27,9573	29,8790	-1,9216	1,9216	3,6926
32,8547	29,6350	3,2197	3,2197	10,3666
7,5124	21,6205	-14,1081	14,1081	199,0397
12,5694	20,7934	-8,2240	8,2240	67,6348
10,2506	19,8963	-9,6457	9,6457	93,0393
8,7561	22,0854	-13,3294	13,3294	177,6720
14,3360	21,7262	-7,3902	7,3902	54,6157
11,3112	23,2069	-11,8958	11,8958	141,5097
34,9120	34,9043	0,0076	0,0076	0,0001
37,2332	30,5820	6,6512	6,6512	44,2386
38,0277	32,8916	5,1361	5,1361	26,3795
39,1727	35,7182	3,4545	3,4545	11,9334
47,1945	37,2090	9,9856	9,9856	99,7114
44,3274	36,1002	8,2272	8,2272	67,6862
40,7346	32,7797	7,9549	7,9549	63,2807
41,5120	34,7972	6,7148	6,7148	45,0884
43,3992	29,7151	13,6841	13,6841	187,2559
43,8257	30,5837	13,2421	13,2421	175,3519
50,5003	32,1724	18,3280	18,3280	335,9140

49,3823	31,3593	18,0231	18,0231	324,8311
48,1426	32,4373	15,7053	15,7053	246,6579
46,0457	27,4973	18,5485	18,5485	344,0451
54,7258	30,1884	24,5374	24,5374	602,0840
53,3904	30,1249	23,2655	23,2655	541,2819
59,3701	31,6266	27,7435	27,7435	769,6993
60,5478	33,3729	27,1749	27,1749	738,4735
57,8691	30,1884	27,6807	27,6807	766,2199
56,1538	30,1249	26,0288	26,0288	677,4987
54,9878	31,4107	23,5772	23,5772	555,8822
51,7711	33,1450	18,6261	18,6261	346,9306
59,0926	33,4735	25,6191	25,6191	656,3391
54,9933	35,5376	19,4556	19,4556	378,5218
58,5138	32,4652	26,0486	26,0486	678,5282
57,3862	32,5733	24,8129	24,8129	615,6798
35,4028	33,5100	1,8928	1,8928	3,5826
37,3453	34,3560	2,9893	2,9893	8,9359
41,7297	35,7503	5,9794	5,9794	35,7531
42,4275	36,1126	6,3150	6,3150	39,8787
42,4169	35,0870	7,3299	7,3299	53,7281
43,5664	36,0726	7,4938	7,4938	56,1571
28,3360	35,9760	-7,6400	7,6400	58,3700
30,9640	41,4906	-10,5266	10,5266	110,8101
35,8222	39,0245	-3,2022	3,2022	10,2543
34,6554	45,0762	-10,4208	10,4208	108,5936
38,0337	30,9705	7,0632	7,0632	49,8887
36,9248	33,2946	3,6302	3,6302	13,1783
37,4094	31,8686	5,5408	5,5408	30,7006
40,0057	34,8575	5,1482	5,1482	26,5036
42,3540	35,2420	7,1119	7,1119	50,5797
45,5003	39,9476	5,5528	5,5528	30,8333
52,7874	34,1086	18,6788	18,6788	348,8983

51,9569	35,1484	16,8084	16,8084	282,5235
17,3439	35,3655	-18,0216	18,0216	324,7775
18,0820	36,6055	-18,5235	18,5235	343,1210
18,1467	40,3638	-22,2171	22,2171	493,6009
16,2704	39,9854	-23,7150	23,7150	562,4018
21,0031	37,7800	-16,7769	16,7769	281,4650
25,0515	36,9724	-11,9209	11,9209	142,1072
15,9860	43,1121	-27,1261	27,1261	735,8248
15,4070	36,6844	-21,2774	21,2774	452,7292
14,8585	39,1499	-24,2914	24,2914	590,0736
16,7817	48,0949	-31,3132	31,3132	980,5144
16,6107	32,8583	-16,2476	16,2476	263,9847
17,3424	34,8459	-17,5034	17,5034	306,3697

Seção 2

CSS _{obs} [mg/l]	CSS _{est} [mg/l]	Resíduo [mg/l]	Erro absoluto	Erro quadrático
95,4936	107,3494	-11,8558	11,85577	140,5592
93,4050	116,4291	-23,0241	23,02413	530,1105
104,947	142,2889	-37,3418	37,34183	1394,412
122,066	136,1248	-14,0586	14,05861	197,6445
141,066	138,9942	2,072117	2,072117	4,293667
85,5083	93,25844	-7,75008	7,750077	60,06369
101,596	102,092	-0,49527	0,495272	0,245295
119,257	67,33215	51,92514	51,92514	2696,22
137,625	101,1138	36,51145	36,51145	1333,086
154,436	130,501	23,93559	23,93559	572,9126
171,990	136,4104	35,58036	35,58036	1265,962
32,3273	23,98081	8,346507	8,346507	69,66418
38,4123	23,03785	15,37447	15,37447	236,3744
42,9880	28,91475	14,07332	14,07332	198,0584
48,3133	31,2599	17,05342	17,05342	290,819
47,1788	32,35197	14,8269	14,8269	219,8369
47,0052	35,90852	11,09674	11,09674	123,1377

89,3958	86,28278	3,113116	3,113116	9,691492
94,1345	54,02266	40,11188	40,11188	1608,963
93,7183	83,45053	10,26781	10,26781	105,4279
95,0143	53,17979	41,83452	41,83452	1750,127
94,3138	94,00203	0,311813	0,311813	0,097227
93,4984	84,14976	9,34867	9,34867	87,39763
71,4436	39,31769	32,12598	32,12598	1032,078
71,4410	39,77457	31,66648	31,66648	1002,766
71,5925	40,76968	30,82287	30,82287	950,0492
67,0937	39,54547	27,5483	27,5483	758,909
67,1207	60,87188	6,248905	6,248905	39,04882
64,0073	63,81236	0,194952	0,194952	0,038006
50,6918	35,7601	14,93176	14,93176	222,9574
49,0470	35,31532	13,73174	13,73174	188,5607
42,7499	32,60309	10,14683	10,14683	102,9582
44,4024	34,68631	9,716154	9,716154	94,40365
41,1900	66,66926	-25,4792	25,4792	649,1896
38,6856	87,26926	-48,5836	48,58359	2360,365
22,8158	41,73318	-18,9173	18,91731	357,8645
19,98	28,05915	-8,07915	8,079153	65,27272
30,3123	24,06874	6,243601	6,243601	38,98256
53,4976	24,64717	28,85049	28,85049	832,3508
21,3429	27,9513	-6,60835	6,608352	43,67031
19,7034	42,1775	-22,4741	22,47405	505,0831
9,4816	36,25551	-26,7739	26,77391	716,842
13,353	26,35331	-13,0003	13,00031	169,0082
11,0586	20,63628	-9,57762	9,57762	91,7308
11,5100	25,46373	-13,9537	13,95366	194,7047
11,5663	24,32156	-12,7552	12,7552	162,6952
10,2971	43,95406	-33,6569	33,6569	1132,787

APÊNDICE B – Valores de CSS estimada, comparação da CSS composta medida e valores da diferença entre ambas para cada seção.

Valores de CSS estimada para cada perfil via SNR e a comparação com a CSS composta medida em cada campanha, além dos valores de diferença entre ambas.

Seção 1 - CSS Composta [mg/l]				
Série	Data	Medida	Estimada	(Medida - Estimada)
1	13-Mar	46.93	37.08	9.85
2	11-Apr	26.66	14.01	12.65
3	11-Jun	11.23	9.6	1.63
4	24-Jun	39.25	37.6	1.65
5	25-Jul	41.20	19.18	22.02
6	31-Jul	46.83	15.9	30.93
7	21-Aug	57.05	22.79	34.26
8	27-Aug	55.97	22.78	33.19
9	17-Sep	40.29	28.25	12.04
10	8-Oct	33.92	22.28	11.64
11	14-Oct	45.06	29.4	15.66
12	5-Nov	19.17	50.06	-30.89
13	20-Nov	16.12	26.97	-10.85

Seção 2 - CSS Composta [mg/l]				
Série	Data	Medida	Estimada	(Media - Estimada)
1	26-Jun	106.87	79.9	26.97
2	3-Jul	129.45	42.82	86.63
3	9-Jul	43.2	21.04	22.16
4	2-Aug	93.44	29.51	63.93
5	3-Sep	68.69	23.77	44.92
6	10-Sep	44.14	21.31	22.83
7	16-Oct	27.09	17.76	9.33