



## ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO POR MEIO DE UM VELOCÍMETRO ACÚSTICO DOPPLER

### ESTIMATING SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION USING AN ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER

Helenesio Carlos Cabral<sup>1</sup>; Daniela Guzzon Sanagiotto<sup>2</sup>; João Batista Dias de Paiva<sup>1</sup>

Artigo recebido em: 01/04/2016 e aceito para publicação em: 16/06/2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v19i3.11241>

**Resumo:** A avaliação da concentração de sedimentos em suspensão (CSS) ainda representa uma tarefa desafiadora, associada a processos experimentais compostos por várias etapas. Este trabalho busca contribuir na avaliação do potencial de uso do velocímetro acústico Doppler (ADV) para quantificar concentração de sedimentos em suspensão. Este equipamento pode representar uma alternativa mais rápida e econômica para a avaliação de CSS. Também se busca verificar a sensibilidade do equipamento na distinção de partículas de diferentes dimensões. Para tanto, desenvolveu-se um sistema de medição em laboratório, caracterizado por um recipiente de forma cilíndrica de 30 cm de diâmetro e 30 cm de altura, conectado a um sistema de bombeamento. Este sistema permitiu a mistura e homogeneização de diferentes proporções de água+solo, gerando amostras de características conhecidas, para posterior avaliação com o ADV. Realizaram-se ensaios com amostras com oito CSS e cinco faixas granulométricas de cinco tipos de solo, totalizando 200 configurações testadas. Para cada teste coletaram-se três amostras, totalizando 600 ensaios. Para visualização dos dados e pós processamento, utilizou-se o programa WinADV, aplicando o filtro PSTM. Os resultados obtidos apontaram o aumento do SNR (relação sinal-ruído) obtido com o ADV com o acréscimo da CSS para os diferentes tipos de solo para as cinco granulometrias, tendo as melhores correlações entre o eco e a CSS nos ensaios com os solos 2, 3 e 4. Para as condições testadas a faixa granulométrica não interferiu nas leituras do ADV. Esse estudo demonstra que há boas perspectivas para a utilização do ADV para a quantificação da CSS, mas ressalta a importância de estudos complementares.

**Palavras-chave:** Sedimentos em suspensão. Granulometria. Relação sinal/ruído.

**Abstract:** The evaluation of suspended sediment concentration (SSC) still represents a challenging task, associated with experimental processes composed of several stages. This paper aims to contribute to the evaluation of the potential use of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) to quantify SSC. This equipment can represent a faster and more economical alternative to SSC evaluation. It is also sought to verify the sensitivity of the equipment in the distinction of particles size. A laboratory measurement system was developed, characterized by a cylindrical container 30 cm in diameter and 30 cm high, connected to a pumping system. This system allowed the mixing and homogenization of different proportions of water + soil, generating samples of known characteristics, for later evaluation with ADV. Samples with eight SSC and five particle sizes of five soil types were performed, totaling 200 tested configurations. For each test, three samples were collected, totaling 600. For data visualization and post processing, the WinADV program was used, applying the PSTM filter. The results obtained indicated the increase of the SNR (signal-to-noise ratio) obtained with the ADV with the addition of SSC for the different soil types for the five granulometries, with the best correlations between the echo and SSC in soil trials 2, 3 and 4. In the present study, the granulometric range does not inter-

<sup>1</sup> Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS E-mails: ([helenesio@yahoo.com.br](mailto:helenesio@yahoo.com.br), [jbdpai-va@gmail.com](mailto:jbdpai-va@gmail.com))

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS E-mail: ([dsanagiotto@gmail.com](mailto:dsanagiotto@gmail.com))

ferre with the ADV readings. This study demonstrates that there are good prospects for the use of ADV for the quantification of SSC, but emphasizes the importance of complementary studies.

**Keywords:** Suspended sediment, Particle size. Signal-to-noise ratio.

---

## 1 INTRODUÇÃO

A erosão do solo constitui um dos processos naturais que mais degradam o meio ambiente. Dentre os vários impactos causados pela erosão tem-se: destruição das nascentes dos rios, aumento do risco de desertificação e remoção da camada fértil do solo em zonas agrícolas. Segundo Maier (2013), “a erosão tem sido um problema não apenas em relação à perda de solo e a diminuição da capacidade produtiva dos solos, mas também no que se refere a aspectos de transferência desses sedimentos para os corpos d’água”.

O estudo da concentração de sedimentos em suspensão é essencial para a compreensão do processo de transporte de sedimentos em rios, reservatórios, diminuição da qualidade da água (CHIEN; WAN, 1999; SAHIN *et al.*, 2017). A importância do conhecimento do aporte de sedimentos em bacias hidrográficas está na gestão e planejamento dos recursos hídricos. Tais informações são fundamentais no dimensionamento e operação de obras hidráulicas, interferindo decisivamente nos custos de implantação e manutenção de tais sistemas.

Existem métodos diretos e indiretos de se obter a concentração de sedimentos em suspensão (CSS). A forma tradicional é o método direto, através da coleta de amostras de água de forma representativa e posterior análise laboratorial. Devido aos custos envolvidos no método tradicional, tem se buscado métodos alternativos, como turbidímetros, equipamentos ultrassônicos e velocímetros Doppler.

O Velocímetro Acústico Doppler, ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*), é um equipamento que mede a velocidade das partículas presentes na água através do princípio do efeito Doppler, utilizando transdutores acústicos transmissores e receptores. O ADV utiliza transdutores acústicos receptores e transmissores, ambos construídos de modo a operar em feixes estreitos (SONTEK, 2001), que variam de acordo com o modelo e fabricante do equipamento. A medição de velocidade ocorre em um volume de água onde os feixes dos transdutores se encontram. O transmissor gera um pequeno pulso de som de frequência conhecida, que se

propaga na água ao longo do eixo desse feixe. Como o pulso passa pelo volume de medição, a energia acústica é refletida em todas as direções pelas pequenas partículas presentes na água. Parte da energia refletida volta através do eixo receptor, onde é feita a medição da mudança da frequência pelo ADV. Este deslocamento na frequência medido pelo receptor é proporcional à velocidade das partículas em suspensão.

Outra variável medida pelo ADV é a SNR (“*signal-to-noise ratio*”), que representa a relação sinal-ruído. Esta relação é medida em decibel (dB) e corresponde à diferença entre o nível do sinal recebido e o nível de ruído inerente ao processo de transmissão da informação (SONTEK, 2001). Esta informação é obtida durante a aquisição de dados com o ADV, sendo superiores os valores de SNR obtidos em amostras com maiores concentrações de partículas em suspensão.

Essas características do equipamento e das medições realizadas com o mesmo têm sido objeto de algumas pesquisas que visam extrair informações de velocidades médias ou instantâneas. Por exemplo, podem ser calculadas a energia cinética turbulenta e tensões de cisalhamento no fundo (VOULGARIS & TROWBRIDGE, 1998; CARTWRIGHT *et al.*, 2013; GARCÍA *et al.*, 2005; BIAN *et al.*, 2015; KIM *et al.*, 2000).

Outras informações têm sido obtidas com medições a partir de ADV, como avaliações de padrões de turbulência do escoamento, a partir das flutuações de velocidades medidas (e.g. JAIN *et al.*, 2015; KHORSANDI *et al.*, 2012; PELTIER *et al.*, 2013, SULAIMAN *et al.*, 2013); salinidade (ex: MOSQUERA & PEDOCCHI, 2019) e estimativas de sedimentos em suspensão, a partir das leituras da relação sinal/ruído (SNR), associada à presença e proporção de material em suspensão (ex: CHANSON ET AL, 2008, HA ET AL., 2009, BROWN E CHANSON, 2013, ROUHNIA ET AL., 2014, LI *et al.*, 2016, LI *et al.*, 2018, ÖZTÜRK, 2017).

Em um experimento realizado em laboratório, Ha *et al.* (2009) utilizaram três ADVs para avaliar a CSS. Dos velocímetros utilizados um é de 5 MHz definido na frequência de amostragem de 10 Hz e velocidade de 5 cm/s, outro de 10 MHz e o último, um Micro ADV, de 16 MHz definidos na velocidade de 3 cm/s, taxa de amostragem de 5 Hz e tempo de aquisição definido em 60 segundos. As CSS utilizadas pelos autores variaram de 7,5 mg/L até 2 g/L. Os autores concluíram que um ADV pode ser um instrumento útil para estimar a CSS, embora sua principal função seja medir velocidades de fluxo em um ponto fixo. De acordo com esses

pesquisadores, para se ter melhores respostas ao usar o ADV para medir a CSS para sedimentos coesivos, deve-se selecionar um equipamento com o comprimento de onda que esteja próximo do tamanho das partículas de sedimentos.

Chanson, Takeuchi e Trevethan (2008) buscaram correlacionar a intensidade acústica de um Micro ADV (16 MHz) com a turbidez, utilizando uma sonda de turbidez instalada a 5 cm do leito de um estuário no leste da Austrália durante um período de 10 horas. Esses autores verificaram que há uma boa correlação da amplitude do sinal acústico com a turbidez. Chanson, Takeuchi e Trevethan (2008) observaram que o eco medido pelo Micro ADV foi similar as medições de turbidez e que não foram apresentadas variações nas diferentes profundidades, recomendando o uso do MicroADV para a estimativa da CSS.

Brown & Chanson (2013) utilizaram dois ADVs a fim de investigar a relação entre a amplitude de retroespalhamento do equipamento com a CSS. O experimento foi conduzido durante uma grande enchente por dois dias, caracterizando o fluxo em suspensão, além de avaliar aspectos da turbulência do escoamento. Foi observado pelos autores, que até com uma CSS de cerca de 5 kg/m<sup>3</sup>, ocorre o aumento do sinal lido pelo ADV com o acréscimo das CSS, no entanto para CSS superiores a 5 kg/m<sup>3</sup> ocorre a diminuição do sinal lido com o aumento da CSS. Esse fato também foi observado por Ha et al. (2009), para estudos com solos coesivos.

Mais recentemente, Li et al. (2016) e Li et al. (2018) utilizaram o ADV para avaliar a CSS no reservatório da barragem de Três Gargantas, na China. Estes autores calibraram o ADV para a quantificação da CSS neste local e estão utilizando o equipamento para a estimativa de concentração instantânea de sedimentos em suspensão.

Observa-se que na literatura há boas evidências da aplicabilidade do ADV para a estimativa da CSS. Este trabalho busca contribuir nesse sentido, investigando a influência do tipo de solo e da faixa granulométrica nas medições.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

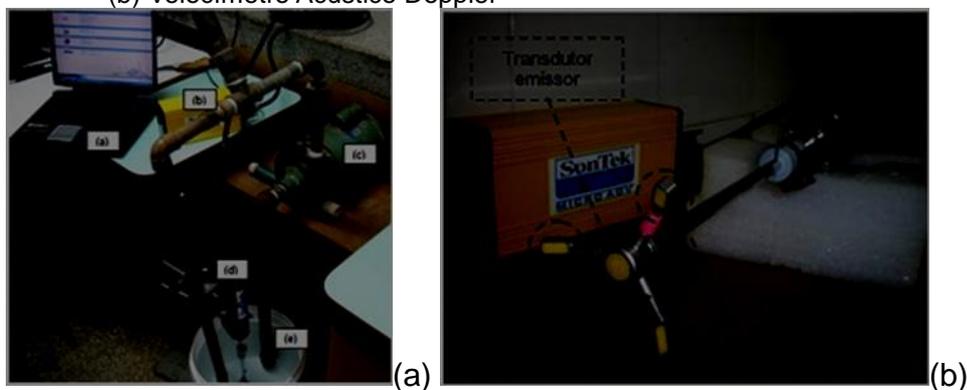
Os ensaios foram realizados em laboratório, em um ambiente controlado, testando respostas do ADV para testes conduzidos em amostras de características conhecidas, conforme será descrito a seguir. Para atender essa etapa foi construído

um sistema de medição experimental descrito a seguir, que permite a obtenção dos dados em amostras homogêneas de água e solo.

Foi construído no Laboratório de Sedimentos (LASED), no Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, CT – UFSM, um sistema de medição experimental composto por um recipiente cilíndrico, com altura e diâmetro de 30 cm e 29,5 cm, respectivamente. Neste recipiente misturou-se quantidades conhecidas de diferentes tipos de solos (Solo 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Solo 2 - Argissolo Vermelho Distrófico, Solo 3 - Cambissolo Háplico Tb Distrófico, Solo 4 - Latossolo Vermelho Distrófico e Solo 5 - Planossolo Háplico Eutrófico, com granulometria variando entre 63  $\mu\text{m}$  a 1 mm) em 15 litros de água destilada. Esse sistema de medição (Figura 1) contém um sistema de recirculação composto por uma tubulação de PVC de  $\frac{3}{4}$ ", e uma bomba de 3410 rpm,  $\frac{1}{2}$  cv e 60 Hz).

A concepção do sistema de medição experimental utilizou como referência inicial a proposta de Xavier et al. (2012), que utilizaram em seu experimento um recipiente cilíndrico, com 40 cm de diâmetro e 50 cm de altura, com um circuito de recirculação operando através de duas bombas de aquário (modelo B650 fabricadas pela Sarlo Better). No presente trabalho, o processo de recirculação buscou garantir a homogeneidade da mistura. Realizaram-se testes com o objetivo de assegurar que as misturas ficassem homogêneas, evitando qualquer deposição de sedimento no fundo do recipiente durante a realização dos experimentos.

**Figura 1** - (a) Sistema de medição experimental; ((a) Notebook utilizado para armazenar os dados coletados; (b) Fonte do ADV; (c) Sistema de recirculação; (d) ADV e (e) Recipiente para homogeneização); (b) Velocímetro Acústico Doppler



O equipamento utilizado foi o Micro ADV 16 MHz Sontek/YSI (Figura 1.b), que é indicado para utilização em laboratório. Ele permite medições de velocidade tridimensionais, taxas de amostragem de até 50 Hz, faixa de amostragem no volume total de água de 1 cm<sup>3</sup> e seleção de faixa de velocidade adequada entre 3 cm/s e 250 cm/s. A taxa de amostragem e a faixa de velocidade do ADV foram avaliados em testes preliminares. Optou-se por utilizar a máxima frequência disponível no equipamento, de 50 Hz (50 dados por segundo) e a mínima faixa de velocidade, de 3 cm/s. Detalhes sobre estes testes podem ser consultados em Cabral (2014).

Além das leituras de 3 velocidades (V<sub>x</sub>, V<sub>y</sub> e V<sub>z</sub>), o ADV fornece valores de SNR - signal-to-noise ratio, correspondentes a cada um dos transdutores receptores (SNR1, SNR2 e SNR3). As análises apresentadas nesse trabalho utilizaram a média desses 3 valores. Se adotou o valor médio após a análise dos valores individuais, verificando que a média é mais representativa do eco em cada volume de medição.

Para a realização dos ensaios foram utilizados 5 tipos de solo, os quais foram divididos em 5 faixas granulométricas. Para cada solo e faixa granulométrica foram realizados testes para as 8 concentrações conhecidas (5 mg/L, 10 mg/L, 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L, 250 mg/L, 500 mg/L e 1000 mg/L), resultando em 200 condições diferentes testadas (5 tipos de solo x 5 faixas granulométricas x 8 concentrações). Para cada condição foram realizados 3 ensaios (3 posições diferentes: 6 cm, 12 cm e 18 cm do fundo do recipiente), totalizando 600 ensaios, conforme quadro 1.

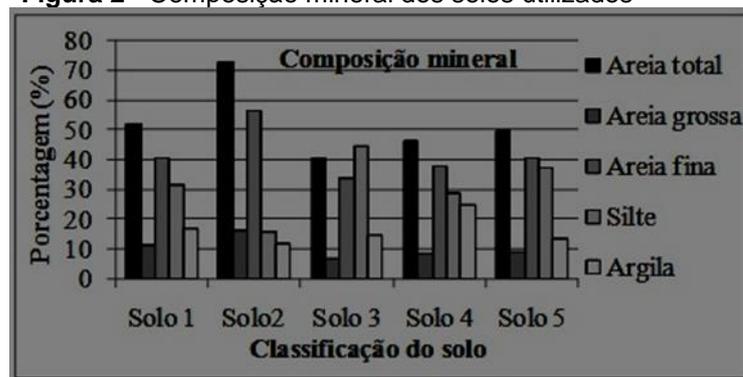
**Quadro 1** – Ensaios realizados para cada tipo e granulon

Designação	Solo	Origem	Granulometrias	CSS (mg/L)	Posições (cm)	Ensaios
1	Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico	Santa Maria	63 µm 125 µm 250 µm 500 µm 1 mm	5	6 12 18	5*5*8*3=600
2	Argissolo Vermelho Distrófico	São Gabriel		10		
3	Cambissolo Háplico Tb Distrófico	São Gabriel		25		
4	Latossolo Vermelho Distrófico	Passo Fundo		50		
5	Planossolo Háplico Eutrófico	São Gabriel		100		

A divisão do solo em faixas granulométricas foi obtida por peneiramento do solo integral. Para realizar os ensaios, o solo foi dividido em faixas granulométricas, conforme as recomendações da NBR 7181/1984, depois da amostra ser seca ao ar livre e destorroada. Após este processo, foi inserido 1 kg do solo integral nas

peneiras com as malhas passantes de 1 mm, 500  $\mu\text{m}$ , 250  $\mu\text{m}$ , 125  $\mu\text{m}$  e 63  $\mu\text{m}$  e agitados manualmente por aproximadamente 15 minutos e, então, pesadas as porcentagens passantes em cada peneira e colocadas em sacos plásticos, identificando-os. As 5 faixas granulométricas utilizadas foram: partículas menores e iguais que 63  $\mu\text{m}$ , partículas que variam de 64  $\mu\text{m}$  a 125  $\mu\text{m}$ , partículas de 126  $\mu\text{m}$  a 250  $\mu\text{m}$ , partículas de 251  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$  e partículas de 501  $\mu\text{m}$  a 1 mm. A determinação da granulometria realizou-se por peneiras e pelo método da pipeta, descrito na NBR 7181/1984. Utilizou-se diferentes tipos de solo: Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico de Santa Maria (Solo 1), Argissolo Vermelho Distrófico de São Gabriel (Solo 2), Cambissolo Háptico Tb Distrófico de São Gabriel (Solo 3), Latossolo Vermelho Distrófico de Passo Fundo (Solo 4) e Planossolo Háptico Eutrófico de São Gabriel (Solo 5). Na figura 2 pode ser visualizada a composição mineral de cada solo utilizado.

**Figura 2** - Composição mineral dos solos utilizados



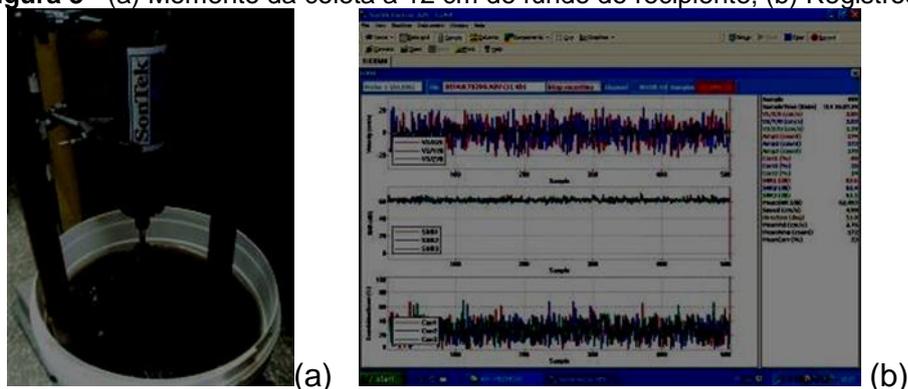
Para cada ensaio foram inseridos no recipiente do sistema de medição experimental a água e a quantidade de solo correspondente a concentração desejada. O sistema de recirculação era ligado para o processo de homogeneização e desligado para a realização da amostragem com o ADV. Os tempos de homogeneização da mistura e de aquisição dos dados foram testados previamente, buscando selecionar os valores mais adequados. Foram testados tempos de misturas variando entre 30 segundos e 12 horas e tempos de aquisição do sinal de até 90 segundos. Nestas avaliações, o tempo de 2 minutos mostrou-se suficiente para uma boa homogeneização da amostra. Nos experimentos de Guerrero, Rütther e Szupiany (2012) também foi adotado o tempo de mistura de 2 minutos. Para o tempo de aquisição dos dados, o tempo de 30 segundos mostrou-se adequado.

Para a aquisição dos dados foi utilizado o programa Horizon ADV, recomendado pelo fabricante do equipamento. Mediu-se a temperatura da água no início dos ensaios, informando-a ao programa de aquisição dos dados e, durante a realização dos ensaios, após cada hora de homogeneização (realização de vários ensaios em sequência) foi realizada novamente a medição.

Para cada tipo de solo, para realizar os ensaios com as oito concentrações, foram, a partir do primeiro ensaio com a menor concentração, inseridas gradualmente maiores quantidades de sedimentos, até completar a concentração determinada para o ensaio seguinte.

Após realizar o último ensaio utilizando a CSS máxima de 1000 mg/L para cada uma das faixas granulométricas, conforme a figura 3(a), foi realizada a limpeza de todos os equipamentos com algodão e água destilada, realizando o mesmo processo, porém para as outras faixas granulométricas mencionadas.

**Figura 3 -** (a) Momento da coleta a 12 cm do fundo do recipiente; (b) Registros dos dados



Por fim, com o objetivo de analisar se a separação por faixa granulométrica influencia os resultados, foram conduzidos ensaios na CSS de 5mg/L com o solo 3 integral, sem passar por nenhum processo de classificação.

Para a avaliação dos dados do ADV utilizou-se o filtro PSTM, desenvolvido por Goring e Nikora (2002). Esse método é chamado pelos autores de “Phase-Space Thresholding Method”. Com a aplicação deste filtro que foi modificado e implementado no programa WinADV por Wahl (2003) nos dados obtidos, tentou-se eliminar dados afetados por algum efeito de ruído (ruído elétrico, ruído proveniente da presença de bolhas na água, entre outros) e manter um grande percentual de dados. Esse filtro tem sido aplicado a dados obtidos com o ADV em outros estudos (ex: LI *et al.*, 2018).

Utilizou-se uma ferramenta estatística que permitisse avaliar se existe uma diferença significativa entre dois ou mais valores de SNR medidos para uma mesma CSS, confrontando diferentes profundidades e tempo de coleta. Para essa avaliação foi utilizado o teste t de Student, com nível de significância de 5%, através do programa Primer, que permitiu verificar se as grandezas podiam ser consideradas iguais ou não dentro de um certo nível de significância.

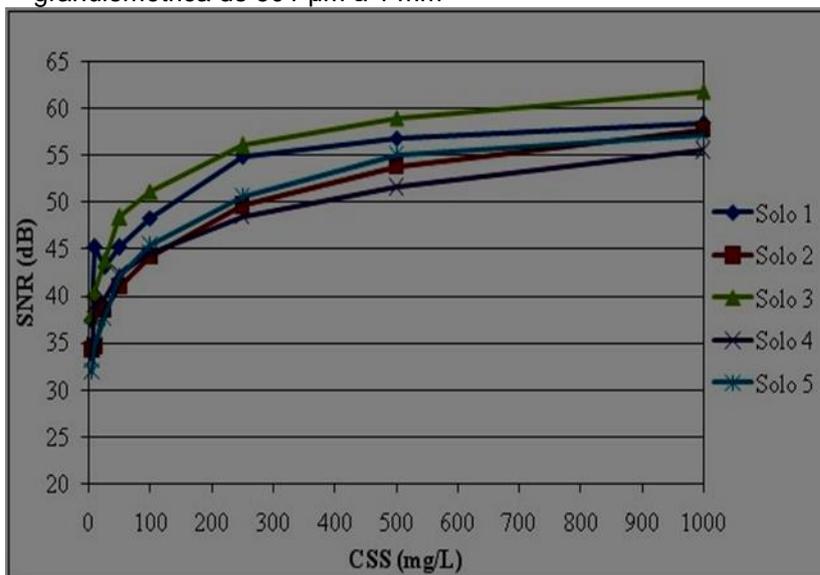
### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nesta pesquisa, a utilização do sistema de recirculação resultou em uma boa homogeneização da água com os sedimentos, já que as coletas em diferentes profundidades dentro do recipiente, para uma mesma condição de ensaio, indicam leituras sem diferenças significativas. O sistema de medição experimental proporcionou boa homogeneização às diferentes misturas de água e solo, com granulometrias e concentrações de sedimentos em suspensão variadas, permitindo a realização de medições com o ADV.

Na figura 4 é apresentada a relação entre CSS e SNR para uma mesma faixa granulométrica de partículas entre 501  $\mu\text{m}$  e 1 mm para os diferentes tipos de solo, conforme mencionado anteriormente. Embora tenham sido realizadas medições em diferentes posições dentro do recipiente, observou-se que, devido a boa homogeneidade da amostra no sistema de medição experimental, para uma mesma condição de ensaio, os valores podem ser representados pelo valor médio das três leituras.

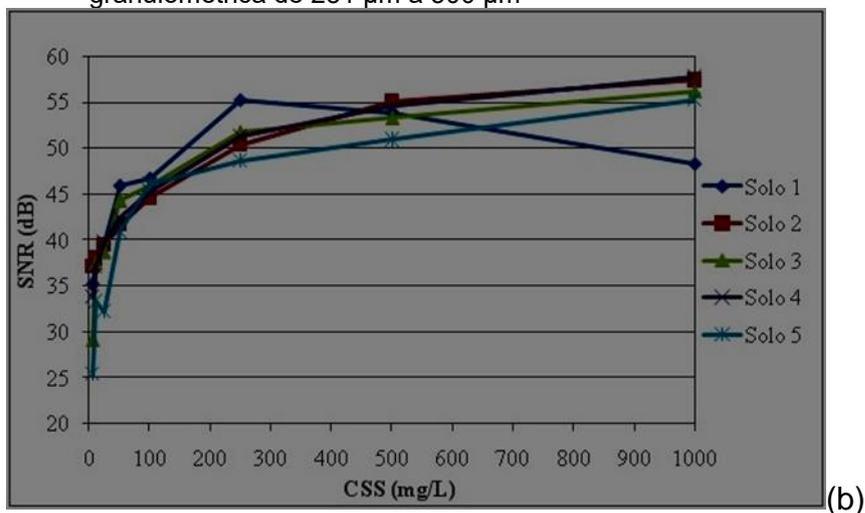
Embora haja uma mesma tendência de comportamento do SNR em função da concentração de sedimentos, conforme figura 4, analisando diferentes tipos de solo, para uma mesma CSS, pode-se dizer que os valores dependem do tipo de solo, pois ao aplicar o teste t de Student confrontando diferentes situações para os cinco tipos de solo em uma mesma CSS (1-2; 1-3; 1-4; 1-5; 2-3; 2-4; 2-5; 3-4; 3-5 e 4-5), pode-se perceber que, a um nível de significância de 5%, há diferenças nos valores.

**Figura 4** - Relação entre o SNR médio e a CSS para todos os tipos de solo na faixa granulométrica de 501  $\mu\text{m}$  a 1 mm



Na figura 5 são apresentadas as médias do SNR para os diferentes tipos de solo para a faixa granulométrica de partículas entre 251  $\mu\text{m}$  e 500  $\mu\text{m}$ . A figura 5 apresentou para as CSS de 5 mg/L, 10 mg/L e 25 mg/L um valor médio de SNR acima dos demais. A partir da CSS de 50 mg/L até 250 mg/L o solo 1 apresentou valores médios maiores, voltando o solo 2 a apresentar valores médios maiores para as CSS de 500 mg/L e 1000 mg/L. Os solos 2, 3 e 4 apresentaram comportamentos semelhantes. O solo 1 teve decaimento nas CSS de 500 mg/L e 1000 mg/L. Além disso, o solo 5 apresentou valores médios baixos nas menores concentrações (até 25 mg/L) e após comportamento semelhante aos solos 2, 3 e 4.

**Figura 5** - Relação entre o SNR médio e a CSS para todos os tipos de solo na faixa granulométrica de 251  $\mu\text{m}$  a 500  $\mu\text{m}$



(b)

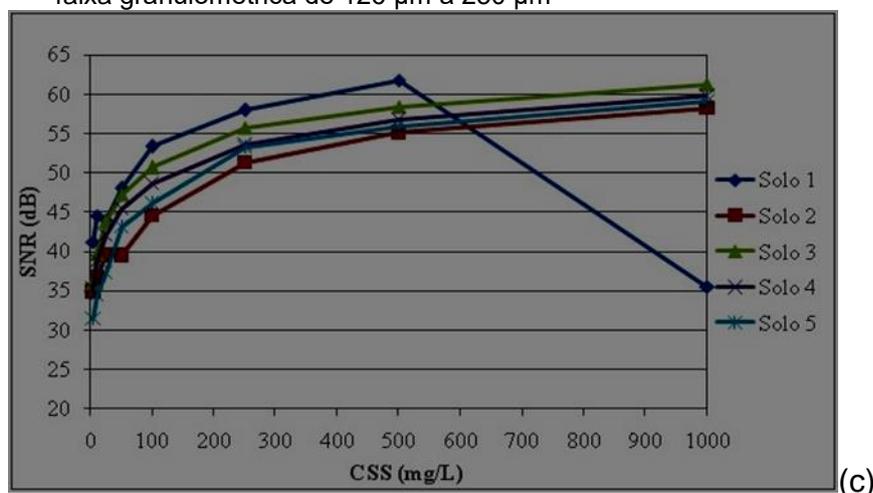
Conforme pode ser observado na figura 5, existe um aumento do SNR com o aumento da CSS, para as concentrações testadas. Um exemplo disto é observado para a faixa granulométrica entre 251 e 500  $\mu\text{m}$ . Porém, para o solo 1 observou-se nas várias faixas granulométricas que, para as maiores concentrações testadas, tem-se um decaimento do SNR medido com o ADV, contrariamente ao observado nos demais solos. Esse comportamento já foi relatado anteriormente por Ha et al. (2009) e Brown & Chanson (2013) em estudos com solos coesivos, onde foi verificado que para altas concentrações ocorre a diminuição do SNR ou uma atenuação do eco lido.

A análise da composição mineral do solo 1 em comparação com os demais solos, não produz uma justificativa para esse comportamento diverso aos demais solos testados. Esse fato sugere que estudos complementares sejam conduzidos a fim de buscar esclarecer esse comportamento diferenciado.

Aplicou-se o teste t de Student para os dados referentes às amostras com faixa granulométrica entre 251 e 500  $\mu\text{m}$ , confrontando diferentes situações para os cinco tipos de solo em uma mesma CSS. Nessa análise verificou-se que há diferença ao nível de significância de 5% em todos os confrontos.

Para os resultados referentes às amostras na faixa granulométrica entre 125 e 250  $\mu\text{m}$ , como pode ser observado na figura 6, observa-se que em geral todos os tipos de solos apresentaram um aumento no valor do SNR com o aumento das CSS, com exceção do solo 1 na maior concentração testada.

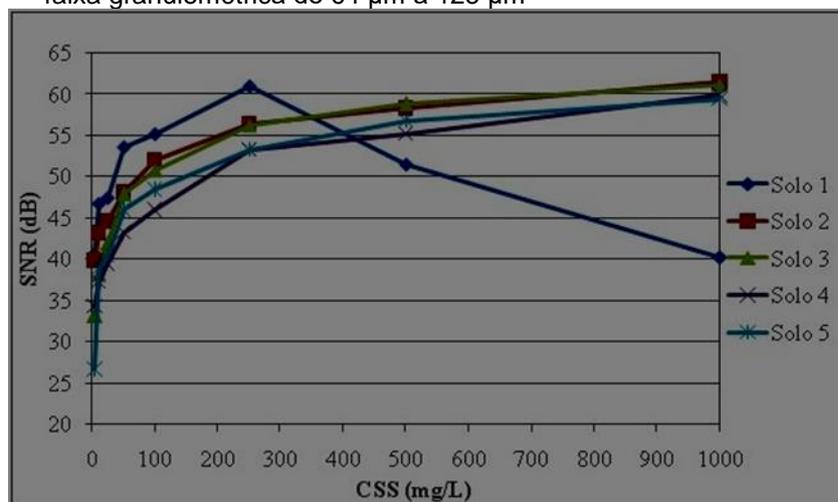
**Figura 6** - Relação entre o SNR médio e a CSS para todos os tipos de solo na faixa granulométrica de 126  $\mu\text{m}$  a 250  $\mu\text{m}$



Na análise estatística dos resultados das amostras na faixa granulométrica entre 125 e 250  $\mu\text{m}$ , observou-se que a única comparação em que não ocorreu diferença significativa a nível de significância de 5% foi o solo 2 com o solo 4. São necessários ensaios complementares, analisando a composição dos solos 2 e 4 para verificar se há alguma característica desses solos, para essa faixa granulométrica, que justifique o comportamento diferenciado.

Os resultados com as amostras na faixa granulométrica entre 64  $\mu\text{m}$  e 125  $\mu\text{m}$ , conforme apresentado na figura 7, seguem o mesmo padrão que vem sendo observado. Observa-se que todos os tipos de solo apresentaram aumento no valor do SNR com o aumento da CSS, exceto o solo 1 para as maiores concentrações.

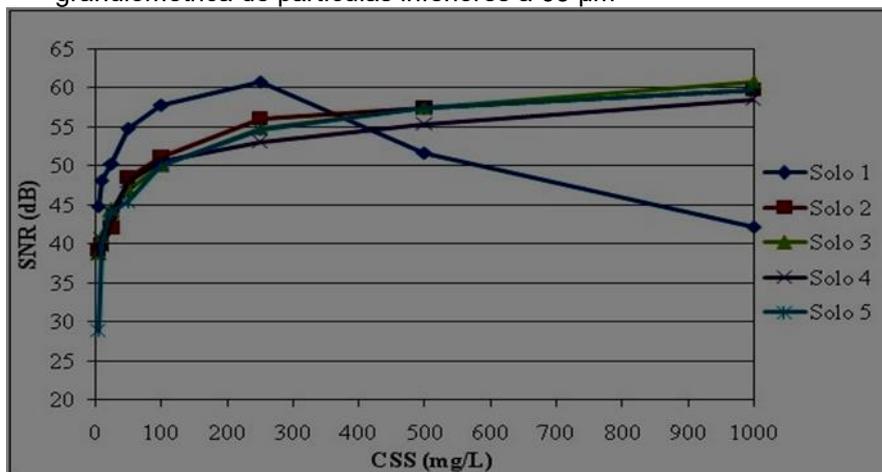
**Figura 7** - Relação entre o SNR médio e a CSS para todos os tipos de solo na faixa granulométrica de 64  $\mu\text{m}$  a 125  $\mu\text{m}$



A análise estatística realizada para as amostras com solos na faixa granulométrica entre 64  $\mu\text{m}$  e 125  $\mu\text{m}$  indica que há diferenças significativas entre os solos a nível de significância de 5%, para uma mesma concentração.

Os resultados obtidos com amostras com partículas menores do que 63  $\mu\text{m}$ , conforme figura 8, demonstram que o aumento da CSS é acompanhada pelo acréscimo nas leituras de SNR, para os cinco tipos de solo e concentrações, com exceção do solo 1, o qual obteve um decaimento no seu valor médio de SNR a partir da CSS de 250 mg/L.

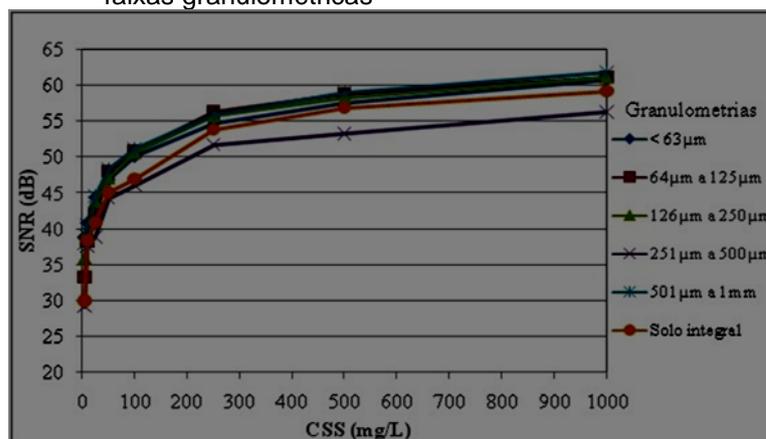
**Figura 8** - Relação entre o SNR médio e a CSS para todos os tipos de solo na faixa granulométrica de partículas inferiores a 63  $\mu\text{m}$



Aplicou-se o teste t de Student nos dados para a CSS de 5 mg/L, sendo que a única confrontação que apresentou diferença significativa a nível de 5% de significância foi a do solo 3 com o solo 4.

Com objetivo de analisar se a separação por faixas granulométricas influenciava nos resultados, foram realizadas coletas utilizando o solo 3 para as cinco faixas granulométricas e com este mesmo solo em seu estado integral (sem divisão por faixas granulométricas), com as mesmas concentrações conduzidas nos demais ensaios. Os resultados obtidos a partir destas coletas estão apresentados na figura 9.

**Figura 9** - Relação entre o SNR médio (relação sinal-ruído medido com o ADV) e a CSS para o solo 3 integral e dividido por faixas granulométricas



Pela análise da figura 9 percebe-se que há uma relação direta entre o aumento médio no sinal medido pelo equipamento e o aumento da concentração de sedimentos presentes na mistura. Os valores médios de SNR obtidos para as cinco

faixas granulométricas ficaram próximos do valor médio apresentado para o solo integral.

A aplicação dos testes estatísticos para os resultados comparando amostras com o solo integral e com o solo dividido em faixas granulométricas indicam que a maioria das condições podem ser consideradas sem diferenças significativas com nível de significância de 5%. A tabela 1 apresenta a avaliação para o solo 3, para CSS de 5 mg/L, onde se verificam diferenças significativas com nível de significância de 5%.

**Tabela 1** - Aplicação do teste estatístico com nível de significância de 5% para o solo 3 dividido em faixas granulométricas e em sua forma integral para a CSS de 5 mg/L

<b>Faixas granulométricas</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
Partículas menores ou iguais a 63 $\mu\text{m}$	38,83	17,23 <sup>a</sup>
Partículas de 64 $\mu\text{m}$ a 125 $\mu\text{m}$	33,12	6,52 <sup>b</sup>
Partículas de 126 $\mu\text{m}$ a 250 $\mu\text{m}$	35,96	7,76 <sup>c</sup>
Partículas de 251 $\mu\text{m}$ a 500 $\mu\text{m}$	29,17	7,13 <sup>d</sup>
Partículas de 501 $\mu\text{m}$ a 1 mm	37,93	6,67 <sup>a</sup>
Solo integral	29,97	6,67 <sup>e</sup>

\*Letras iguais não diferem estatisticamente entre si ao nível de significância de 5%.

Na análise comparativa entre os resultados obtidos com as amostras com diferentes solos, percebe-se que, de forma geral, a tendência é a mesma entre a relação sinal-ruído (SNR) e a CSS para as várias amostras. Uma análise visual dos dados poderia indicar que o tipo de solo utilizado na amostra não representa um fator decisivo nos resultados obtidos. No entanto, a análise estatística, onde para uma mesma concentração foram comparados os resultados obtidos com os cinco tipos de solo, percebe-se que a maioria dos confrontos resulta em diferenças com nível de significância superiores a 5%, ou seja, pode-se considerar o tipo de sedimento em suspensão como fator de influência no resultado obtido nas medições com o ADV.

Os valores de p encontrados através do teste t são apresentados no quadro 2 a seguir.

**Quadro 2** - Interpretação do teste estatístico com nível de significância de 5%

	Menor ou igual a 63 $\mu\text{m}$	De 64 $\mu\text{m}$ a 125 $\mu\text{m}$	De 126 $\mu\text{m}$ a 250 $\mu\text{m}$	De 251 $\mu\text{m}$ a 500 $\mu\text{m}$	De 501 $\mu\text{m}$ a 1000 $\mu\text{m}$	Solo integral	
Menor ou igual a 63 $\mu\text{m}$	-	$p = 0,000$	$p = 0,000$	$p = 0,000$	$p = 0,059$	$p = 0,000$	a
De 64 $\mu\text{m}$ a 125 $\mu\text{m}$	-	-	$p = 0,000$	$p = 0,000$	$p = 0,000$	$p = 0,000$	b
De 126 $\mu\text{m}$ a 250 $\mu\text{m}$	-	-	-	$p = 0,000$	$p = 0,000$	$p = 0,000$	c
De 251 $\mu\text{m}$ a 500 $\mu\text{m}$	-	-	-	-	$p = 0,000$	$p = 0,002$	d
De 501 $\mu\text{m}$ a 1000 $\mu\text{m}$	-	-	-	-	-	$p = 0,000$	a
Solo integral	-	-	-	-	-	-	e

\*Letras iguais não diferem significativamente entre si ao nível de significância de 5%.

Observa-se que a avaliação por faixa granulométrica ou com o solo integral produzem respostas que apresentam uma mesma tendência. Com os resultados obtidos nesse trabalho não se permite definir um comportamento que possa ser associado à dimensão dos grãos que compõem as amostras.

A premissa inicial, a partir de estudos anteriores (e. g. Ha et al., 2009) considerava que além da CSS, a faixa granulométrica interferiria na leitura obtido com o ADV. Com o andamento da pesquisa, analisando os resultados obtidos para os diferentes solos divididos em faixas granulométricas, observou-se que separação por tamanhos de partículas, dentre os testados, em alguns casos interferem na leitura de SNR para uma mesma CSS e tipo de solo, porém não se visualiza um padrão diretamente relacionado a dimensão das partículas. Dessa forma, se buscou complementar o estudo, realizando medições com o solo sem qualquer fracionamento, para apenas um dos solos, com o intuito de consolidar um resultado existente. Ao se analisar as diferentes faixas granulométricas de um mesmo solo, as respostas de leitura do SNR, para uma mesma CSS não diferem significativamente para a maioria das condições testadas.

Sendo assim, para o equipamento utilizado nesse estudo e para os solos testados, não se considera necessária a divisão por faixa granulométrica para a obtenção de melhores resultados, contrariamente ao sugerido por Ha et al. (2009). Esse fato é interessante, já que em medições de interesse os sedimentos não estarão divididos em faixas granulométricas. Ressalta-se, que as conclusões são limitadas às faixas granulométricas, tipo de solo e equipamento testados neste estudo.

## 4 CONCLUSÕES

Os dados coletados apresentaram o aumento do SNR em relação ao aumento da concentração de sedimentos em suspensão para os diferentes tipos de solo para as cinco granulometrias, sendo que as melhores correlações entre o eco e a CSS ocorreram para os ensaios com os solos 2, 3 e 4, o que indica que o ADV é capaz de distinguir diferentes CSS.

Em relação à importância da faixa granulométrica para a avaliação da CSS utilizando o ADV, conclui-se dos experimentos conduzidos que a variável faixa granulométrica não influencia os resultados obtidos, pelo menos para os solos testados. Justifica-se essa afirmação a partir do estudo comparativo entre amostras com o solo integral e com o solo dividido em faixas granulométricas.

Esse estudo demonstra que há boas perspectivas para a utilização do ADV para a quantificação da concentração de sedimentos em suspensão, mas ressalta a importância de estudos complementares, que busquem apontar os fatores relacionados ao tipo de solo que resultam no decaimento das leituras de SNR para as maiores concentrações, além da avaliação de uma maior variedade de solos e concentrações.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor, ao FINEP pelos recursos ao projeto MAPLU, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFSM e ao Grupo de Pesquisa GHidros. Os autores também agradecem a colaboração e dedicação dos bolsistas de iniciação científica Pablo Valcorte e Gabriel Froemming.

## REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 7181, de 30 de dezembro de 1984**. Análise granulométrica por peneiramento/sedimentação - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.

BIAN, C., MAO, X., JIANG, W., GU, Y. Adv-based estimates of sediment settling velocity on the shelf of the yellow and east China seas: evidence of marked seasonal and intra-tidal variations. **Geo Mar. Lett.** n. 35, p. 53–60, 2015.

BROWN, R.; CHANSON, H. Turbulence and suspended sediment measurements in an urban environment during the Brisbane River flood of January 2011. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, p. 244-253, feb. 2013.

CABRAL, H. C. B. **Utilização de velocímetro acústico Doppler (ADV) para avaliação da concentração de sedimentos em suspensão**. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS, Brasil, 2014.

CARTWRIGHT, G.M., FRIEDRICH, C.T., SMITH, S.J. A test of the ADV-based Reynolds flux method for in situ estimation of sediment settling velocity in a muddy estuary. **Geo Mar. Lett.** n. 33, p. 477–484, 2013.

CHANSON, H.; TAKEUCHI, M.; TREVETHAN, M. Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary. **Journal of Environmental Management**, v.88, p. 1406-1416, 2008.

CHANSON, H., TREVETHAN, M., AOKI, S.I. Acoustic Doppler velocimetry (adv) in small estuary: field experience and signal post-processing. **Flow Meas. Instrum.** n. 19, p. 307–313, 2008.

CHIEN, N., & WAN, Z.H. **Mechanics of sediment transport**. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 1999.

GARCÍA, C. M., CANTERO, M. I., NINO, Y., GARCÍA, M. H. Turbulence measurements with Acoustic Doppler Velocimeters. **J. Hydraul. Eng.** n. 131, p.1062–1073, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429. \(2005\)131:12\(1062\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429. (2005)131:12(1062)).

GORING, D. G; NIKORA, V. I. Fluctuations of suspended sediment concentration and turbulent sediment fluxes in an open-channel flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 128, p. 214-224, jan. 2002.

GUERRERO, M.; RÜTHER, N.; SZUPIANY, R.N. Laboratory validation of acoustic Doppler current profiler (ADCP) techniques for suspended sediment investigations. **Flow measurement and Instrumentation**, v. 23, p. 40-48, 2012.

HA, H. K.; HSU, W. Y.; MAA, J. P. Y.; SHAO, Y. Y., HOLLAND, C. W. Using ADV backscatter strength for measuring suspended cohesive sediment concentration. **Continental Shelf Research**, v. 29, p. 1310-1316, 2009.

JAIN, R. K.; KUMAR, A.; KOTHYARI, U. C. Turbulence statistics of flow through degraded channel bed of sand-gravel mixture. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 9, n. 4, p. 508-518, 2015.

KHORSANDI, B.; MYDLARSKI, L.; GASKIN, S. Noise in turbulence measurements using acoustic Doppler velocimetry. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 138, n. 10, p. 829-838, 2012.

KIM, S. C., FRIEDRICH, C. T., MAA, J. P. Y., WRIGHT, L. D. Estimating bottom stress in tidal boundary layer from Acoustic Doppler Velocimeter data. **J. Hydraul. Eng.** n. 126, 399–406, 2000. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429. 126:6\(399\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429. 126:6(399)).

LI, W., ET AL. Estimating instantaneous concentration of suspended sediment using acoustic backscatter from an ADV. **International Journal of Sediment Research**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.10.012>

LI, W., ET AL. Field measurements of settling velocities of fine sediments in Three Gorges Reservoir using ADV. **International Journal of Sediment Research**, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.05.002>.

MAIER, C. **Variabilidade intra-evento da origem das fontes de sedimentos em uma bacia hidrográfica rural**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Brasil, 2013.

MOSQUERA, R.; PEDOCCHI, F. Salinity estimation from Acoustic Doppler Velocimeter measurements, 2019. **Continental Shelf Research**. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.04.010>.

ÖZT6URK, M. Sediment Size Effects in Acoustic Doppler Velocimeter-Derived Estimates of Suspended Sediment Concentration. **Water**, 2017. doi:10.3390.

PELTIER, Y.; RIVIÈRE, N.; PROUST, S.; MIGNOT, E.; SHIONO, K. Estimation of the error on the mean velocity and on the Reynolds stress due to a misoriented ADV probe in the horizontal plane: Case of experiments in a compound open-channel. **Flow Measurement and Instrumentation**, n. 34, p. 34-41, 2013.

RAFFEL, M., WILLERT, C., SCARANO, F., KÄHLER, C., WERELEY, S., KOMPENHANS, J. **Particle image velocimetry: a practical guide**, v. 30 Cambridge University Press, 2011.

ROUHNIA, M.; KEYVANI, A.; STROM, K. Do changes in the size of mud flocs affect the acoustic backscatter values recorded by a Vector ADV? **Continental Shelf Research**, n. 84, p. 84-92, 2014.

SAHIN, C., VERNEY, R., SHEREMET, A., VOULGARIS, G. Acoustic back scatter by suspended cohesive sediments: Field observations, Seine Estuary, France. **Continental Shelf Research**, n. 134, p. 39–51, 2017.

SONTEK. **Sontek ADV field acoustic doppler velocimeter**. Technical Documentation. San Diego, USA, 2001.

SSULAIMAN, M. S.; SINNAKAUDAN, S. K.; SHUKOR, M. R. Near bed turbulence measurement with Acoustic Doppler Velocimeter (ADV). **KSCE Journal of Civil Engineering**, v.17, n. 6, p.1515-15285, 2013.

VOULGARIS, G., TROWBRIDGE, JH. Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for turbulence measurements. **J. Atmos. Ocean. Technol.** v. 15, p. 272–289, 1998.

WAHL, T. L. Discussion of “Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data” by Goring, D. G. e Nikora, V. I. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, p. 987-988, 2003.

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.