

UTILIZAÇÃO DE PERFILADORES ACÚSTICOS DOPPLER PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO NO RIO SAPUCAÍ - MG

Mateus Ricardo Nogueira Vilanova¹, Augusto Nelson Carvalho Viana², Fernando das Graças

Braga da Silva³

RESUMO – A criação e manutenção de sistemas de informações hidrológicas consistentes dependem da qualidade dos dados brutos coletados em campo, sendo, para isso, fundamental selecionar e utilizar equipamentos que ofereçam resultados confiáveis e vantagens operacionais. Em termos de medição de vazão em cursos d'água, os perfiladores acústicos Doppler vem se mostrando como uma alternativa interessante em relação aos equipamentos/métodos tradicionais e às novas tecnologias, ainda não consolidadas. Nesse sentido, apresenta-se no presente trabalho o resultado de uma campanha hidrométrica realizada no Rio Sapucaí (distrito de Olegário Maciel – MG) com dois tipos de perfilador Doppler: um dinâmico *moving-boat* (ADCP) e um estático *section-by-section* (Qliner). As medições ocorrerão durante atividades de campo da disciplina “Hidrometria Básica”, do curso de Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Itajubá. Foram realizadas 3 travessias com o Qliner e 8 com o ADCP, sob as mesmas condições hidráulicas e climáticas. As vazões medidas pelos dois sistemas apresentaram grande semelhança, apesar das diferenças operativas de cada um. Os resultados indicam que, dependendo da aplicação, e considerando-se os procedimentos de garantia de qualidade em medições, os perfiladores Doppler podem ser empregados de forma confiável para a medição de vazão em cursos d'água.

ABSTRACT – Creating and maintaining consistent hydrological information systems depends of the quality of raw data collected in field, and, therefore, the selection and use equipments that offer reliable performance and operational advantages. In terms of flow measurement in water courses, the acoustic Doppler profilers has been shown as an interesting alternative for traditional equipments/methods and new technologies not yet consolidated. Accordingly, the present work presents the result of a hydrometric campaign held in Sapucaí River (Olegário Maciel – MG district) with two types of Doppler profiler: a dynamic moving-boat (ADCP) and a static section-by-section (Qliner). Measurements occurred during the field activities of “Basic Hydrometry” discipline, from Hydric Engineering course, Federal University of Itajubá. It were performed 3 transects with Qliner and 8 with ADCP, under the same hydraulic conditions and weather. The flow rates measured by the two systems were very similar, despite differences of operating each. The results indicate that, depending on the application, and considering the procedures for quality assurance of measurements, the Doppler profiles can be employed with reliability for flow measurement in water courses.

Palavras-chave: hidrometria, perfiladores acústicos Doppler, Rio Sapucaí.

¹ Pesquisador da UNIFEI, IRN/GEN/GHIDRO, av. BPS, 1303, 37500-903, Itajubá-MG. Email: mathidr@yahoo.com.br

² Professor associado da UNIFEI, IRN/GEN/GHIDRO, av. BPS, 1303, 37500-903, Itajubá-MG. Email: augustonelsonviana@yahoo.com.br

³ Professor adjunto da UNIFEI, IRN/NUMMARH/GHIDRO, av. BPS, 1303, 37500-903, Itajubá-MG. Email: fernandobraga@unifei.edu.br

1 INTRODUÇÃO

Segundo Hirsch e Costa (2004), o maior avanço na medição de vazão em rios e canais nos últimos anos se deve à introdução dos perfiladores acústicos Doppler de corrente (ADCPs). Tais equipamentos utilizam-se de ondas acústicas em faixas tipicamente compreendidas entre 300 e 3.000 kHz (SIMPSON, 2001) para medir a vazão, através da mudança aparente da frequência das ondas, refletidas por material em suspensão (efeito Doppler). Esses equipamentos calculam a vazão em uma seção de forma indireta, através da determinação dos perfis de velocidade da seção de acordo com a velocidade relativa entre as partículas em suspensão e o equipamento, além da área molhada, obtida por sondagem batimétrica simultânea.

São várias as vantagens dos ADCPs em relação aos equipamentos tradicionais de medição de vazão. A medição de vazão com molinetes hidrométricos exige, dependendo das dimensões do rio, várias medições individuais ao longo da seção, que geralmente compreendem várias horas de trabalho. Já as medições com perfiladores Doppler são significativamente mais rápidas, durando minutos ao invés de horas, tendo resultados igualmente precisos (MORLOCK, 1996; MUELLER, 2003). Além disso, ADCPs permitem medir em condições ambientais adversas como enchentes, onde, além dos aspectos técnicos, devem-se considerar os aspectos logísticos e de segurança.

No Brasil, os perfiladores Doppler foram utilizados pela primeira vez em 1994, no Rio Solimões, pela equipe do Projeto Hidrologia da Bacia Amazônica (HiBAm), durante o Curso Internacional de Medição de Descarga Líquida em Grandes Rios, organizado pelo Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica (DNAEE) e pela Organização Meteorológica Mundial (WMO), num total de 12 campanhas hidrométricas (HIBAM, 1994).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os perfiladores acústicos Doppler utilizam-se da variação que ocorre na frequência de uma

onda quando há movimento relativo entre o emissor e o receptor (efeito Doppler) (SIMPSON, 2001; RDI, 1996) para medir a velocidade da água e, posteriormente, a vazão. Na verdade, o equipamento mede a velocidade de partículas suspensas no fluxo (sedimentos, plâncton, etc.), que refletem parte das ondas emitidas. Considerando-se que o efeito Doppler ocorre duas vezes durante a medição, entre transdutor/partícula e se repete entre partícula/transdutor, e que este depende apenas da componente radial do deslocamento relativo, apenas uma componente do vetor velocidade da água é considerado (RDI, 1996), conforme equação 1:

$$F_d = 2.F_s \cdot \left(\frac{V}{C} \right) \cdot \cos(A) \quad (1)$$

onde:

- F_d frequência alterada pelo efeito Doppler [Hz];
- F_s frequência emitida pelo perfilador Doppler [Hz];
- V velocidade relativa entre emissor e receptor [m/s];
- C velocidade do som [m/s];
- A ângulo entre o feixe emitido e o vetor velocidade da água [°].

Apesar de utilizarem o mesmo princípio físico (efeito Doppler), os perfiladores acústicos Doppler de corrente apresentam diferentes formas de processamento de sinais, visando principalmente à redução da incerteza das medições. As tecnologias de processamento utilizadas pelos diferentes fabricantes de equipamentos são, de acordo com Gamaro (2007):

- Pulso incoerente ou *NarrowBand*: o sistema transmite um único pulso longo, sendo utilizado o efeito Doppler propriamente dito (mudança de frequência) para o cálculo da velocidade do escoamento, apresentando uma incerteza de curto prazo relativamente grande;
- Processamento coerente pulso a pulso: é o mais preciso (menor incerteza de curto prazo),

emitindo pulsos curtos com defasagem temporal que impeça a sobreposição de sinais sucessivos. Utiliza a diferença de fase das ondas para calcular o efeito Doppler, sendo restrito a determinadas faixas de velocidade e profundidade;

- Processamento *Spread Spectrum* ou *BroadBand*: utiliza o princípio de processamento coerente, sendo os pulsos sucessivos, porém, emitidos em intervalos que permitam sua simultaneidade durante o perfilamento. Sua incerteza é intermediária em relação aos processamentos *NarrowBand* e pulso a pulso.

No presente trabalho, foram utilizados equipamentos Doppler que operam em modos distintos: *moving-boat* e *section-by-section*. Cada uma destas depende, inicialmente, das características do *hardware*; há a possibilidade, porém, de um mesmo equipamento operar nos dois modos, dependendo, para isso, de *software* específico.

Nas aplicações *moving-boat*, o equipamento realiza a medição em movimento, sendo instado em barcos comuns ou embarcações próprias. A principal vantagem desse tipo de aplicação é a velocidade das medições. Para que um perfilador Doppler possa realizar medições dinâmicas, faz-se necessário fornecer, em tempo real, uma referência entre a velocidade do equipamento e a velocidade do escoamento. Essa referência pode vir de um GPS ou, como ocorre da na maioria dos casos de um recurso próprio do equipamento, denominado *bottom tracking*. O *bottom tracking* utiliza um pulso acústico mais longo, com alcance aproximadamente duas vezes maior que o dos pulsos utilizados para a medição de velocidade (RDI, 2003). Devido ao caráter tridimensional do escoamento para medições em movimento, para se obter o vetor velocidade resultante do fluxo, através de relações trigonométricas, faz-se necessária a existência de, no mínimo, três feixes, sendo um para cada componente (RDI, 1996). As medições *moving-boat* apresentam grande detalhamento hidrodinâmico e batimétrico da seção estudada.

As medições *section-by-section* assemelham-se aos métodos tradicionais com medidores mecânicos. Nesse caso, a seção é dividida em várias verticais, onde ocorre o perfilamento e

determinação das velocidades médias, sendo necessário estacionar o perfilador em cada vertical. A partir dos dados geométricos (profundidades medidas e distâncias entre verticais), o equipamento determina a área entre cada par de verticais (sub-seções) e, multiplicando-a pela velocidade média entre estas, calcula a vazão da sub-seção. O somatório das vazões de cada sub-seção fornece a vazão total. Medições *section-by-section* são usadas, principalmente, em rios onde ocorra o fundo móvel (deslocamento de camadas de sedimento no fundo do curso d'água). Quando se utiliza o recurso *bottom tracking* para determinar a velocidade relativa do equipamento em relação ao fluxo de água, o fundo móvel é interpretado como um movimento do barco/ADCP, inserindo erros à medição. A medição *section-by-section*, segundo Gamaro (2008), é uma das principais formas de se evitar erros devido à presença do fundo móvel, uma vez que sua premissa é o estacionamento (velocidade em relação ao fundo igual a zero) do equipamento em cada vertical.

A geração dos perfis de velocidade ocorre através da divisão de cada vertical (*ensemble*) em várias células (*bins* ou *cells*) uniformes, ilustrados na figura 1. O número de células de cada vertical depende da profundidade total e do tamanho de cada célula, fornecida pelo usuário. O perfilador realiza a amostragem de várias velocidades dentro de cada célula, sendo a respectiva vazão calculada a partir da média destas velocidades.

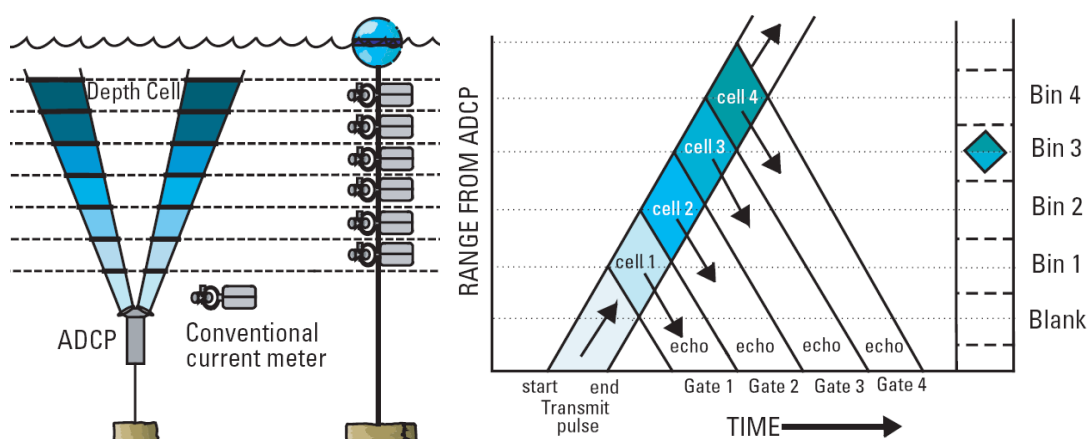


Figura 1 – Células de profundidade geradas por perfiladores Doppler (RDI, 1996)

Durante medições com perfiladores acústicos Doppler de corrente, alguns trechos da área

molhada da seção hidrométrica não são efetivamente medidos, sendo elas: faixa superficial; faixa de fundo e margens. A faixa superficial é um somatório da profundidade de imersão dos transdutores com o blanking distance (necessária para os transdutores – que são emissores e receptores – pararem de vibrar e receber o sinal de volta). Próximo ao fundo ocorre o espalhamento do sinal, impedindo sua medição com precisão. Nesses casos, as vazões parciais são calculadas através de extrapolações dos perfis obtidos nas áreas medidas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ADCP

O ADCP utilizado é um Workhorse Rio Grande de 1.200 kHz, fabricado pela RD Instruments, com tecnologia *BroadBand* e profundidade máxima de perfilamento de 21 m. O equipamento possui vários modos de medição, configuráveis de acordo com as características da seção (velocidades médias, profundidades, etc). O tamanho recomendado das células varia de 0,10 a 0,25 m. A acurácia teórica das velocidades medidas é de $\pm 0,25\%$ $\pm 0,25$ cm/s da soma das velocidades da água e do barco, com resolução de 0,1cm/s, sendo a velocidade máxima admissível de ± 20 m/s (RDI, 1996).

O equipamento possui quatro feixes (figura 2), inclinados 20° em relação à vertical, tendo sido acoplado a uma prancha especialmente adaptada que, por sua vez, foi amarrada à lateral de um barco de alumínio. As travessias foram realizadas com auxílio de cabo (dada à pequena largura da seção), sem a utilização de motor. A alimentação do ADCP é feita por uma bateria automotiva de 12 V, e a transmissão de dados via cabo. Os dados foram aquisitados com um *laptop*, através do *software* Winriver.



Figura 2 - Visão geral do ADCP (<http://www.rdinstruments.com/rio.html>)

3.2 Qliner

O Qliner é um perfilador Doppler produzido pela empresa holandesa Qmetrix, destinado à medição de vazão em pequenos rios e canais. O sistema é composto pela associação do perfilador Doppler Aquadopp Profiler adaptado, *palmtop*, transmissor *Bluetooth* e barco de fibra de vidro, conforme figura 3.



Figura 3 - Componentes do sistema Qliner (da esquerda para a direita: Aquadopp Profiler, *palmtop*, transmissor *Bluetooth* e barco)

A frequência do perfilador é de 2.000 kHz, sendo recomendado para profundidades máximas de 12 m. O tamanho das células varia de 10 a 30 cm, com um *blanking* mínimo de 5 cm (sendo recomendado pelo fabricante 10 cm). A velocidade máxima de perfilamento é de 10 m/s, com exatidão de $1\% \pm 0,5 \text{ cm/s}$ (QMETRIX, 2005). O perfilador possui quatro feixes (*beams*),

ilustrados na figura 4: feixes de velocidade (1 e 2), inclinados 25° em relação à vertical e com direções opostas, feixe para baixas velocidades e profundidades (3) inclinado 70° , ecobatímetro para medição das profundidades (4) e sensor de pressão (5) (QMETRIX, 2005). Além dos feixes, o equipamento conta com um sensor de inclinação (*tilt sensor*), bússola (*compass*) e bateria interna. O sensor de inclinação detecta e corrige as oscilações do equipamento no sentido proa-popa (*pitch*) e laterais (*roll*). Já a bússola é utilizada em situações onde não é possível se manter o barco paralelo ao fluxo, sendo os vetores velocidade corrigidos a partir de um ângulo de referência fornecido durante a configuração do equipamento.

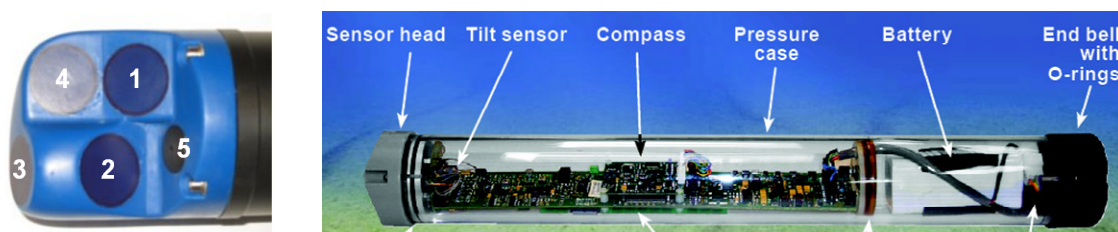


Figura 4 - Feixes e sensores do Qliner (perfilador Aquadopp Profiler adaptado) (QMETRIX, 2005)

O Qliner foi idealizado para medição em pequenos rios, no modo section-by-section, não dispondo de bottom tracking. Outra diferença em relação ao ADCP é a medição de profundidades, que é feita por um feixe dedicado (ecobatímetro), e não apenas pelos feixes de velocidade.

3.3 Caracterização da área de estudo

As medições ocorrerão no Rio Sapucaí, integrante da Bacia do Rio Grande, no distrito de Olegário Maciel-MG. A seção hidrométrica, apresentada na figura 5, apresenta uma largura superficial de 36 m, com profundidade média de 3,6 m. As margens são constituídas de material natural, com pouca vegetação.



Figura 5 – Seção hidrométrica

3.4 Métodos de medição

A realização das medições procurou obedecer às diretrizes do *Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Acoustic Doppler Current Profilers* (OBERG et al., 2005) e do Procedimento Padrão para Garantia de Qualidade das Medições de Descarga Líquida com Equipamentos Acústicos Doppler ADCP e ADP (GAMARO et al., 2008), incluídos aí testes para detecção de fundo móvel, que não foi identificado na seção.

Procurou-se configurar os dois equipamentos de forma semelhante, estando o ADCP no modo 1. As medições foram realizadas pelos alunos da disciplina “Hidrometria Básica” do curso de Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Itajubá, com supervisão dos professores da disciplina, tendo sido realizadas 3 travessias com o Qliner e 8 com o ADCP, tendo sido eliminadas

1 travessia com cada equipamento, baseando-se nos procedimentos de controle de qualidade. Durante as medições, foi monitorado o nível do rio, que não apresentou variações significativas.



Figura 6 – Instalação do ADCP no barco e medição com o Qliner

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após coletados, os dados foram pós-processados nos *softwares* Winriver (ADCP) e Qreview (Qliner), de forma a se averiguar a qualidade destes e identificar incoerências ou erros de configurações ocorridos em campo. Esta análise se baseou, novamente, nos procedimentos propostos por Oberg et al. (2005), além do documento Procedimentos Para Avaliar uma Medição de Vazão Acústica Doppler (Gamaro, 2008). Dentre as principais recomendações e valores limite presentes nessas referências, destacam-se (para o ADCP): variação da vazão de cada travessia inferior a 5% da média das travessias; *bad* e *lost ensembles* inferior a 10% do total de ensembles; *good bins* superior a 75% do total de *bins*. Foram analisadas também as séries temporais de velocidade e trajeto do barco, além do *pitch* e *roll*.

Para o Qliner, além análise da variação da vazão de cada travessia em relação à média das travessias (adotou-se o mesmo padrão do ADCP, 5%), foi realizada a conferência da configuração e a análise da simetria dos perfis de velocidade dos *beams* 1 e 2.

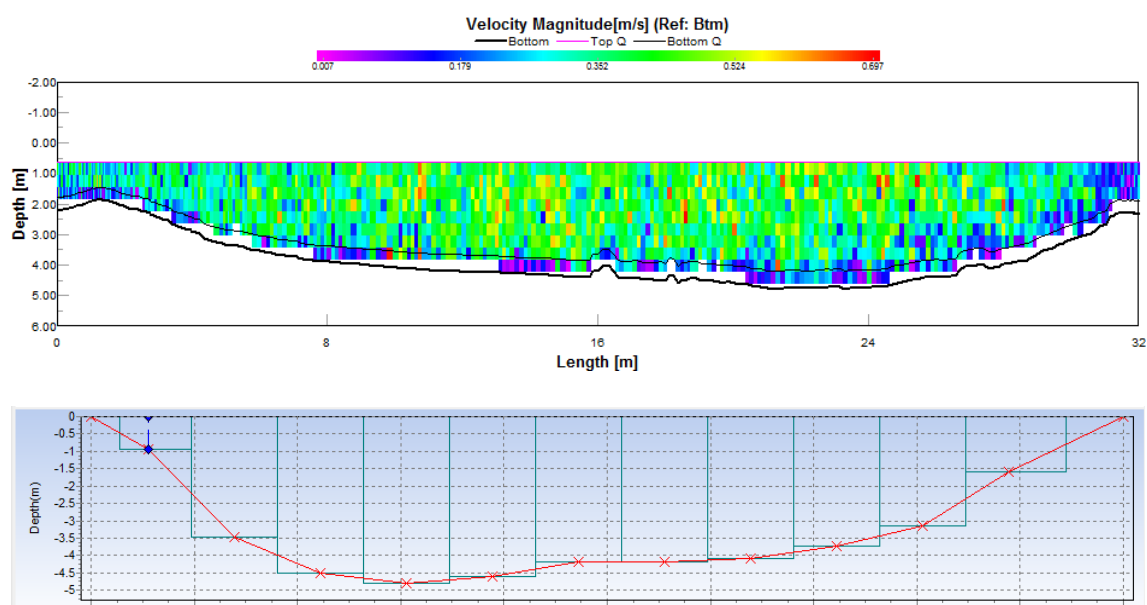


Figura 7 – Seções hidrométricas geradas com o Winriver e Qreview, respectivamente

A tabela 1 apresenta os resultados das travessias com cada equipamento:

Tabela 1 – Resultados das medições

Travessia	Vazão [m³/s]					
	ADCP			Qliner		
	Vazão [m³/s]	Área molhada [m²]	Velocidade média [m/s]	Vazão [m³/s]	Área molhada [m²]	Velocidade média [m/s]
1	40,36	123,70	0,326	39,69	117,71	0,337
2	39,52	121,37	0,326	39,23	118,00	0,332
3	40,00	122,25	0,327	-	-	-
4	39,32	122,64	0,321	-	-	-
5	37,84	122,56	0,309	-	-	-
6	39,44	123,78	0,319	-	-	-
7	38,58	122,05	0,316	-	-	-
Média	39,29	122,62	0,320	39,46	117,85	0,334
ADCP/QLINER [%]	0,43%	-4,04%	4,33%			

Percebe-se na tabela 1 que a diferença das vazões médias das travessias com cada equipamento foi inferior a 1 %, o que indica a validade dos resultados obtidos. As diferenças entre a área molhada calculada pelo ADCP em relação ao Qliner foi de -4%, enquanto a velocidade média teve uma diferença de mesma amplitude, porém positiva. Oberg e Mueller (2007) sugerem, com base em diversas análises experimentais, que uma incerteza de $\pm 5\%$ deve ser considerada em medições de ADCP. Porto (2003) afirma que “do ponto de vista prático na Engenharia, é perfeitamente aceitável variação de resultados na faixa de 5%”, referindo-se a formulações para medição de vazão com vertedores que, geralmente, apresentam características de escoamento mais bem definidas do que aquelas presentes na hidrometria realizada em rios.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados da campanha e nos autores citados, pode-se concluir que tanto o ADCP quanto o Qliner produziram resultados satisfatórios, com diferenças entre as vazões médias das travessias bem abaixo dos limites aceitáveis na hidrometria. Tais resultados comprovaram também a eficácia das normas e procedimentos para garantia de qualidade empregados na coleta e análise dos dados.

A utilização de perfiladores Doppler pode contribuir com a expansão das redes hidrométricas nacionais, incrementando a oferta de dados hidrológicos de boa qualidade necessários à gestão e projetos de sistemas recursos hídricos. Fica claro que tal contribuição se faz possível não somente pela disponibilização de equipamentos modernos, mas, principalmente, pela capacitação de profissionais para sua operação.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais

(FAPEMIG), à Osvaldo de Melo Rodrigues e aos alunos (co-autores do trabalho) da disciplina Hidrometria Básica: Keila Cristina de Oliveira, Maiara Nunes Silva, Vitor Raimundo Pamplona, Hugo Junqueira Villela, Lidiane La Picirelli de Souza, Alessandra Marcondes, André Luis Teixeira Felber, Gustavo Meirelles Lima, Josiane Simão, Hellen Lamoglia, Renata Muranaka, Marcos William Guimarães, Luiz Antônio Andriatta, Samanta Dias de Souza, Dafla Aparecida e Rafael Gianelli.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GAMARO, P. E. M. **Curso de medidores acústicos de vazão Doppler – Módulo avançado**. Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, Agência Nacional de Águas, 2008.

GAMARO, P. E. M. **Curso de medidores acústicos de vazão Doppler – Módulo básico**. Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, Universidade Federal de Itajubá, 2007.

GAMARO, P. E. M.; LISBOA, A.; QUIQUIO, D. **Procedimento padrão para garantia de qualidade das medições de descarga líquida com equipamentos acústicos Doppler ADCP e ADP**. Foz do Iguaçu: Grupo de Estudos Doppler, Comissão de Hidrometria, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2008.

GAMARO, P. E. M. **Procedimentos para avaliar uma medição de vazão acústica Doppler**. Foz do Iguaçu: Grupo de Estudos Doppler, Comissão de Hidrometria, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2008.

HIBAM. **Primeira campanha de medições de vazão com ADCP (correntômetro com efeito Doppler) no Rio Amazonas**. Manacapuru: HiBAm, 1994.

HIRSCH, R. M.; COSTA, J. E. Costa. U.S. Stream Flow Measurement and Data Dissemination Improve. **EOS, Transactions American Geophysical Union**, Washington, v. 21, p. 197-203, 2004.

MORLOCK, S. E. **Evaluation of acoustic Doppler current profiler measurement of river discharge**: Water-Resources Investigations Report 95-4218. Washington: US Geological Survey, 1996.

MUELLER, D. S. Field evaluation of boat-mounted acoustic Doppler instruments used to measure stream flow. In: IEEE Working Conference on Current Measurement Technology, 7., 2003, San Diego. **Anais...** San Diego: IEEE, 2003.

OBERG, K.; MORLOCK, S. E.; CALDEWELL, W. S. **Quality-assurance plan for discharge measurements using acoustic Doppler Current Profilers**: Scientific Investigation Report. Washington: US Geological Survey, 2005.

OBERG, K.; MUELLER, D. S.; ASCE, M. Validation of Streamflow Measurements Made with Acoustic Doppler Current Profilers. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 12, p. 1421-1432, 2007.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 2 ed. São Carlos: EESC-USP, 2003.

QMETRIX, **Qliner User Manual**. Hoofddorp: Qmetrix, 2005.

RD INSTRUMENTS. **Acoustic Doppler Current Profiler**: Principles of operation – A practical primer – Second edition for Broadband ADCPs. San Diego: RDI, 1996.

RD INSTRUMENTS. **Technical Note: RDI's Bottom-Tracking**. San Diego: RDI, 2003.

SIMPSON, M.R.; **Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler**: Open-File Report 01-1. Washington: US Geological Survey, 2001.