

Manual

Técnicas e Procedimentos para Medição
de Descarga Líquida com Perfilador
Acústico Doppler (ADCP)

República Federativa do Brasil

Luiz Inácio Lula da Silva
Presidente da República

Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional

Waldez Góes
Ministro

**Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
Diretoria Colegiada**

Veronica Sánchez da Cruz Rios (Diretora-Presidente)
Ana Carolina Argolo
Marcelo Medeiros (Interino)
Marco Neves (Interino)
Nazareno Araújo (Interino)

Ministério de Minas e Energia

Alexandre Silveira de Oliveira
Ministro

**Serviço Geológico do Brasil
Diretoria Executiva**

Inácio Melo (Diretor-Presidente)
Alice Silva de Castilho
Francisco Valdir Silveira
Cassiano de Souza Alves
Sabrina Soares de Araújo Gois

**Agência Nacional de Águas e
Saneamento Básico**
Ministério da Integração e do
Desenvolvimento Regional

Serviço Geológico do Brasil
Ministério de Minas e Energia

REDE HIDROMETEOROLÓGICA NACIONAL

**Manual: Técnicas e Procedimentos para Medição de
Descarga Líquida com Perfilador Acústico Doppler
(ADCP)**

**Brasília – DF
SGB/CPRM
ANA
2025**

© 2025, Serviço Geológico do Brasil (CPRM)

Setor Bancário Norte, Quadra 2, Blocos H.

CEP: 70040-904, Brasília/DF.

Telefone: (61) 2108-8400

Endereço eletrônico: www.sgb.gov.br

© 2025, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Edifício Sede, Bloco M.

CEP: 70610-200, Brasília/DF.

Telefone: (61) 2109-5400 / 5252

Endereço eletrônico: www.gov.br/ana/pt-br

COMISSÃO DE EDITORAÇÃO

Joaquim Guedes Correa Gondim Filho
(Coordenador)

Humberto Cardoso Gonçalves

Ana Paula Fioreze

Matheus Monteiro de Abreu

(Secretário-Executivo)

CRÉDITOS EDITORIAIS

Coordenação editorial

Andrea de Oliveira Germano

Arthur Moreira de Abreu

Diana Wahrendorff Engel

Wesley Gabrieli de Souza

EQUIPE TÉCNICA

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
(ANA)

Luciana Roberta Sarmiento Silva

Fabrcio Vieira Alves

Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM)

Aldrei Marucci Veiga

Bernardo Luiz Ferreira de Oliveira

Caluan Rodrigues Capozzoli

Roberto Fernandes de Paiva

Vanesca Sartorelli Medeiros

Todos os direitos reservados. É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesta publicação, desde que citada a fonte.

Catálogo na fonte: CEDOC / BIBLIOTECA

A265m

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil).

Manual : técnicas e procedimentos para medição de descarga líquida com perfilador acústico doppler (ADCP) / Serviço Geológico do Brasil, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA, SGB/CPRM, 2025.

92 p. : il.

ISBN digital: 978-65-88101-85-8

ISBN impresso: 978-65-88101-84-1

1. Hidrometria. 2. Vazão - Medição. 3. Efeito Doppler. I. Título. II. Serviço Geológico do Brasil.

CDU 558.08(083.13)

Ficha catalográfica elaborada por: Fernanda Medeiros – CRB-1/1864

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Relação cota-vazão (curva-chave) da estação 58790002 – Santo Antônio de Pádua II | 10 |
| Figura 2 - Representação análoga das características da onda longitudinal | 12 |
| Figura 3 - Movimento da água em relação a um observador..... | 13 |
| Figura 4 - Efeito Doppler acústico no som da sirene de uma ambulância | 13 |
| Figura 5 - Esquema de interação do pulso acústico com sedimentos em suspensão na água..... | 14 |
| Figura 6 - Retorno do pulso emitido pelo <i>ADCP</i> , quando: (a) o transdutor emite pulso inclinado em relação à velocidade da água e (b) o transdutor emite pulso perpendicular à velocidade da água..... | 15 |
| Figura 7 - Decomposição da componente de velocidade da água medida (“vista”) pelo <i>ADCP</i> para obtenção da velocidade da água | 16 |
| Figura 8 - Configuração dos <i>ADCPs</i> de três feixes | 16 |
| Figura 9 - Esquema de discretização de uma vertical para determinação da vazão em células e em áreas em que a vazão não é medida pelo <i>ADCP</i> | 18 |
| Figura 10 - Esquema de rotação nos eixos transversal (<i>pitch</i>) e longitudinal (<i>roll</i>)..... | 19 |
| Figura 11 - (a) Representação da aquisição de verticais (b) Discretização de uma vertical para determinação da vazão em células | 19 |
| Figura 12 - Medidas de laboratório e simulações mostrando a distorção da velocidade horizontal causadas pela presença do <i>ADCP</i> | 21 |
| Figura 13 - Esquema ilustrando as limitações de medidas de velocidade de topo e fundo do <i>ADCP</i> | 22 |
| Figura 14 - Etapas de campo de uma medição. As etapas em verde correspondem aos procedimentos que devem ser realizados antes da medição, em vermelho durante a medição e em amarelo após a medição..... | 26 |
| Figura 15 - Padrões de isolinhas de velocidade em diferentes geometrias de seção transversal (CHOW, 1959). | 28 |
| Figura 16 - Esquema com trajeto real da embarcação e trajeto indicado pelo <i>bottom track</i> de uma travessia em seção com fundo móvel..... | 32 |
| Figura 17 - Esquema com trajeto real da embarcação e trajeto indicado pelo <i>bottom track</i> durante a execução do <i>Loop</i> | 33 |
| Figura 18 - Esquema indicando trajeto do <i>bottom track</i> com fundo móvel, enquanto a embarcação permanece estática no mesmo local | 35 |
| Figura 19 - Margem esquerda de uma seção com fluxo reverso. A escolha de um dos pontos A, B e C, para iniciar/finalizar as travessias, possui implicações distintas na estimativa de vazão nas margens | 40 |
| Figura 20 - Coeficiente de variação (eixo y) em função do tempo de duração da medição (eixo x) para diferentes medições de vazão | 42 |
| Figura 21 - Exemplo de arranjo de M9 no <i>Hydroboard I</i> utilizando uma biruta para auxiliar no alinhamento da prancha | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 22 – Medição no Rio Paraná (local: late Clube) em 14/07/2011. Gráfico de contorno de medição utilizando M9 de 1000/3000 kHz (a) e utilizando <i>Rio Grande</i> de 600 kHz (b) | 46 |
| Figura 23 – <i>Beam 1</i> está atingindo a parede e indicando profundidade em torno de 10 m, enquanto os demais feixes indicam profundidade de aproximadamente 25m | 47 |
| Figura 24 - Trajeto da embarcação (a); série temporal de velocidade do barco e relação velocidade do barco e velocidade da água (b); velocidade de cada uma das componentes (c); erro magnético e código de referência de trajeto (d); e <i>pitch</i> e <i>roll</i> (f) | 53 |
| Figura 25 - Trajeto da embarcação na seção de medição da Estação 14100000 – Manacapuru (a) e trajeto da embarcação na seção de medição da Estação 58795000 – Três Irmãos (b). Em destaque, os vetores de velocidade negativos na margem esquerda do trajeto são coerentes..... | 54 |
| Figura 26 - Seção de medição de Manacapuru, com a distribuição de velocidades dentro do padrão esperado | 55 |
| Figura 27 - Análise da extrapolação no <i>QRev</i> , com indicação do tipo e coeficiente mais adequado..... | 56 |
| Figura 28 - Medidor acústico com <i>pitch</i> excessivo causado pela amarração. | 59 |
| Figura 29 - Medição utilizando esquema de polias com M9 acoplado no <i>Hydroboard II</i> | 60 |
| Figura 30 - À esquerda medição com cabo atravessado utilizando M9 com <i>Hydroboard II</i> acoplado em embarcação tripulada. À direita, M9 acoplado em suporte customizado para embarcação..... | 62 |
| Figura 31 - Embarcação utilizada para medição de vazão em grandes rios. | 64 |
| Figura 32 - Variação do erro de bússola durante a realização de um ciclo | 87 |
| Figura 33 - Trajetória real da embarcação (em azul), largura do rio (w), erro de bússola em cada margem (θ_1 e θ_2) e erro de fechamento (E_f)..... | 87 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Especificações técnicas de alguns <i>ADCPs</i> produzidos em escala comercial | 25 |
| Tabela 2 - Especificações dos testes de fundo móvel | 38 |
| Tabela 3 - Principais requisitos para obtenção de uma medição de vazão válida..... | 43 |
| Tabela 4 - Resumo dos testes do <i>ADCP</i> e situações em que são aplicados..... | 65 |
| Tabela 5 - Resumo dos principais critérios de qualidade de medições acústicas..... | 68 |

Sumário

| | |
|---|----|
| Apresentação | 9 |
| 1 Introdução | 10 |
| 2 Proposta e escopo | 11 |
| 3 Fundamentação teórica | 12 |
| 3.1 Definição de ondas acústicas..... | 12 |
| 3.2 O efeito Doppler | 12 |
| 3.3 Determinação da diferença de frequência Doppler | 14 |
| 3.4 Determinação da velocidade da água pelo método acústico | 16 |
| 3.5 Cálculo da vazão na seção transversal | 17 |
| 3.5.1 Cálculo da vazão medida pelo ADCP (Q_{medida}) ao longo da seção de medição..... | 18 |
| 3.5.2 Estimando a vazão não medida pelo ADCP | 20 |
| 3.5.3 Limitações dos ADCPs para medição de descarga líquida em uma seção de medição..... | 20 |
| 3.5.4 Métodos de estimativas de vazão nas margens e extrapolação de topo e fundo | 22 |
| 4 Especificação dos medidores | 24 |
| 5 Procedimentos de medição de descarga líquida..... | 25 |
| 5.1 Procedimentos antes da medição de descarga líquida | 26 |
| 5.1.1 Seleção do local | 27 |
| 5.1.2 Identificação da medição | 28 |
| 5.1.3 Data e hora | 29 |
| 5.1.4 Diagnóstico do equipamento | 29 |
| 5.1.5 Declinação magnética | 29 |
| 5.1.6 Temperatura da água..... | 29 |
| 5.1.7 Salinidade | 30 |
| 5.1.8 Calibração da bússola..... | 31 |
| 5.1.9 Teste de fundo móvel..... | 32 |
| 5.1.10 Método Loop | 33 |
| 5.1.11 Método estacionário | 34 |
| 5.1.12 Condição e testes de fundo móvel..... | 36 |
| 5.2 Procedimentos durante a medição..... | 38 |
| 5.2.1 Estimativa de margens..... | 38 |
| 5.2.2 Definição de áreas extrapoladas de topo e de fundo..... | 40 |
| 5.2.3 Medições com cota e vazão constantes..... | 41 |
| 5.2.4 Medições em condições adversas | 43 |
| 5.2.5 Medições com variação de cota ou vazão | 43 |
| 5.2.6 Medições com velocidade da água muito baixa | 44 |
| 5.2.7 Medições com velocidade da água muito alta ou com turbulência..... | 45 |
| 5.2.8 Medições com pouca profundidade | 45 |
| 5.2.9 Medições em seções de medição profundas | 45 |
| 5.2.10 Canais com paredes verticais..... | 46 |

| | | |
|--------|--|----|
| 5.2.11 | Medições em leito muito rugoso, irregular ou com vegetação | 47 |
| 5.2.12 | Vento..... | 47 |
| 5.2.13 | Carga de sedimentos elevada | 47 |
| 5.2.14 | Anotações de campo..... | 48 |
| 5.3 | Procedimentos após a medição | 48 |
| 5.3.1 | Identificação e configuração da medição | 49 |
| 5.3.2 | Avaliação das informações de controle e garantia de qualidade (QA/QC)..... | 49 |
| 5.3.3 | Diagnóstico do equipamento..... | 50 |
| 5.3.4 | Verificação da calibração da bússola | 50 |
| 5.3.5 | Verificação da temperatura da água..... | 50 |
| 5.3.6 | Verificação das informações fornecidas pelo usuário..... | 50 |
| 5.3.7 | Avaliação do teste de fundo móvel | 51 |
| 5.3.8 | Análise das medidas de profundidade | 53 |
| 5.3.9 | Análise das medidas de velocidade..... | 54 |
| 5.3.10 | Verificação dos métodos de extrapolação do perfil e de estimativa de vazão das margens | 55 |
| 5.3.11 | Análise do conjunto de travessias..... | 56 |
| 5.3.12 | Comparação da medição com a curva-chave..... | 57 |
| 5.3.13 | Cópia de segurança | 58 |
| 6 | Boas práticas operacionais..... | 58 |
| 6.1 | Arranjos para realização de medições acústicas com barco em movimento..... | 58 |
| 6.2 | Medições sobre ponte..... | 58 |
| 6.2.1 | Medições com prancha operada por sistema de polias fixadas nas margens | 59 |
| 6.2.2 | Medições com embarcação presa a cabo guia | 60 |
| 6.2.3 | Medições com embarcação movida a motor..... | 62 |
| 6.2.4 | Medições em grandes rios | 63 |
| 7 | Controle de qualidade e manutenção | 64 |
| 7.1 | Testes de sistema | 65 |
| 7.2 | Testes de alinhamento dos feixes..... | 66 |
| 7.3 | Checagem da matriz de transformação..... | 66 |
| 7.4 | Comparação das medições..... | 67 |
| 7.5 | Disposições finais | 67 |
| | Referências..... | 71 |
| | Glossário | 74 |
| | Apêndice A - O método LC para o cálculo de fundo móvel pelo teste Loop | 83 |
| | Apêndice B - Limitações do método do <i>loop</i> relacionadas com o erro de bússola | 87 |
| | Apêndice C - O Algoritmo SMBA | 89 |

Apresentação

Os processos hidrológicos moldam nosso ambiente natural e exercem uma influência crucial sobre os modos de vida e as atividades produtivas das sociedades. Eventos extremos, como secas e inundações, exacerbados pelas mudanças climáticas, têm impactado significativamente as atividades econômicas e o desenvolvimento das nações. Propor ações para minimizar esses impactos, como sistemas de alerta, planos de contingência e projetos de infraestrutura hídrica, requer uma compreensão aprofundada desses processos hidrológicos, que só pode ser alcançada por meio dos dados fornecidos pelas redes de monitoramento.

A Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) é a principal fonte de informações hidrológicas no Brasil, monitorando a capacidade, potencial, disponibilidade e qualidade da água nas bacias hidrográficas, além do regime de chuvas em todo o território nacional. A RHN não apenas auxilia os órgãos gestores, mas também todos os envolvidos no Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), bem como a sociedade em geral, fornecendo dados e informações hidrológicas para uma variedade de finalidades, incluindo gestão de recursos hídricos, mitigação de efeitos de eventos hidrológicos extremos, navegação, geração de energia e dimensionamento de estruturas, entre outras.

Esta rede de monitoramento é o maior serviço de monitoramento de águas da América Latina e uma das maiores do mundo, devido principalmente às dimensões continentais do país, à diversidade climática e de biomas, e à distribuição populacional.

No campo da hidrologia, compreender as vazões dos rios é essencial para uma gestão sustentável dos recursos hídricos, pois revela a complexa interação entre as águas superficiais e o meio ambiente. A crescente demanda por informações sobre vazões, devido à intensificação de eventos extremos, torna o uso de novas tecnologias e metodologias padronizadas nas medições indispensável para melhorar a geração e a confiabilidade dos dados de vazão.

Esta publicação apresenta as metodologias empregadas para capturar a essência da dinâmica fluvial, abrangendo desde a coleta e precisão dos dados até sua interpretação, buscando aprimorar a compreensão da complexa rede que conecta os rios ao ciclo hidrológico mais amplo. Mais do que uma simples coleção de esforços científicos, este manual representa um compromisso com a gestão responsável da água. Ao medir e monitorar, contribuimos não apenas para o avanço da ciência hidrológica, mas também para a preservação e o uso sustentável dos recursos hídricos.

Diretorias da ANA e do SGB

1 Introdução

A vazão de um rio é definida como a quantidade de água que passa por uma determinada seção de controle do curso d'água (volume de água por unidade de tempo). De modo geral, a vazão no exutório de uma bacia hidrográfica é resultado do balanço hídrico dos processos de precipitação, infiltração, evapotranspiração e dos escoamentos subsuperficial e subterrâneo, como também das influências antrópicas (ex.: irrigação, barramentos, entre outros).

Desse modo, o estabelecimento de seções de controle e o monitoramento regular da vazão, são fundamentais para o gerenciamento dos recursos hídricos e o entendimento dos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica. A vazão é um dos principais produtos gerados na operação da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) e, diante da sua importância, torna-se imprescindível a padronização dos processos para a sua medição¹.

A medição de descarga líquida pode ser feita de forma direta, na qual se realiza a coleta de volumes de água escoada em um intervalo de tempo representativo da vazão, em um determinado trecho/seção do rio. Porém, esse tipo de medição é inviável em grande parte dos rios e riachos e, portanto, métodos alternativos para medição indireta da descarga líquida devem ser empregados.

As medições de descarga líquida em canais naturais são realizadas de forma indireta, medindo as variáveis que compõem a vazão: área e velocidade da água de acordo com a Equação 1.

$$Q=A.V \text{ (Equação 1)}$$

na qual:

Q : é a vazão (m^3/s);

A : é a área da seção de medição (m^2); e

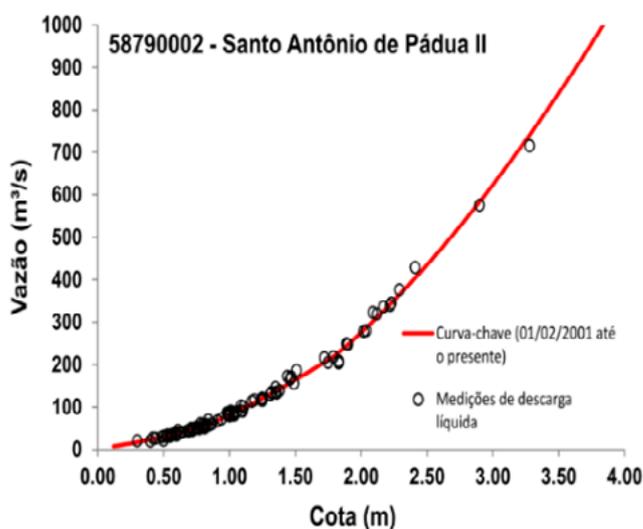
V : velocidade média de escoamento da água na seção de medição ($m s^{-1}$).

A área de uma seção transversal pode ser calculada por métodos topográficos, e a velocidade com o uso de equipamentos como: flutuadores, molinetes hidrométricos, perfiladores acústicos, dentre outros equipamentos.

Uma alternativa robusta, e que produz dados de vazão acurados, é a construção de seções de controle com relação cota x vazão previamente estabelecidas por estudos hidráulicos (ex.: vertedouros, calhas *parshall*, canais). No entanto, em leitos naturais, em que não é possível ou economicamente viável a construção de vertedouros, é necessária a realização de medições de descarga líquida para o estabelecimento da relação cota-vazão do ponto de monitoramento.

A vazão é, então, determinada por meio de uma relação empírica entre o nível da água do rio e as medições de descarga líquida registradas em diferentes níveis; essa relação é conhecida como curva-chave (Figura 1).

Figura 1 - Relação cota-vazão (curva-chave) da estação 58790002 – Santo Antônio de Pádua II.



Fonte: Elaborada pelos autores.

¹ Para fins desse documento, o leitor deve entender os termos “vazão” e “descarga líquida” como sinônimos.

A curva ajustada às medições de descarga líquida realizadas em um posto de monitoramento fluviométrico é relacionada com o nível ou a cota do rio por uma equação. A equação adotada na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) possui a forma mostrada na Equação 2.

$$Q = a(H - H_0)^n \quad (\text{Equação 2})$$

Na qual:

Q : é a vazão (m^3/s);

H : é a cota observada (m);

H_0 : é a cota/parâmetro cuja vazão seja zero (m);

a : é a vazão quando $(H - H_0)$ é igual a 1; e

n : é a parâmetro de inclinação da curva.

O valor de H_0 será a cota em que a vazão é zero (RANTZ, 1982a). Os valores de n variam de acordo com a forma do controle de seção. Em vertedores retangulares de soleira delgada, esse valor é próximo de 1,5; para outras formas de vertedores, os valores de n são, em geral, maiores do que 2. Por outro lado, para seções onde a relação cota-vazão é controlada pelo canal, os valores de n são menores do que 2 e, normalmente, variam entre 1,2 e 1,3 (WMO, 2010).

Assim, é fundamental o monitoramento regular da geometria do canal e a medição sistemática de descarga líquida em vários níveis durante o regime hidrológico, primeiro para determinar a relação cota-vazão e, posteriormente, para detectar qualquer alteração na relação cota-vazão do posto de monitoramento fluviométrico.

O método convencional de medição de descarga líquida utiliza molinete hidrométrico para a determinação das velocidades de fluxo. O molinete é um medidor pontual de velocidade da água, sendo

necessário seu posicionamento em vários pontos na seção transversal para a obtenção de uma amostragem representativa da distribuição do campo de velocidades e para o cálculo da vazão. Diferentes técnicas de amostragem podem ser utilizadas para realizar uma medição de descarga líquida com molinete. A descrição dos métodos pode ser encontrada em (RANTZ, 1982b) e (ANA, 2014).

Posteriormente, foram desenvolvidos equipamentos capazes de medir a velocidade da água utilizando ondas acústicas. Existem três tipos de medidores acústicos: os pontuais, os estáticos e os perfiladores de corrente. O último é mais conhecido como *ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)*.

No Brasil, as primeiras medições com *ADCP* iniciaram-se no início dos anos 1990, com a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), o Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica (DNAEE), a Itaipu Binacional e outras entidades do setor elétrico. Nos anos 2000, com a instituição da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), iniciaram-se os estudos para o uso regular de *ADCPs*. Na última década, as medições de descarga líquida na operação da Rede Hidrometeorológica Nacional são realizadas, majoritariamente, com medidores acústicos.

Este documento trata especificamente da utilização de *ADCPs* para realização de medições de descarga líquida com a embarcação em movimento.

2 Proposta e escopo

A proposta deste documento é descrever as técnicas e métodos de medição de descarga líquida com *ADCP* acoplado à embarcação em movimento a serem utilizadas na operação da RHN.

As descrições e métodos são baseados no documento do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), *Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat*, Capítulo 22, Seção A, Livro 3 (MUELLER et al., 2013), que contempla desde a fundamentação teórica de funcionamento dos ADCPs, rotinas de verificação e armazenamento, até técnicas de medição em diferentes condições hidrológicas.

3 Fundamentação teórica

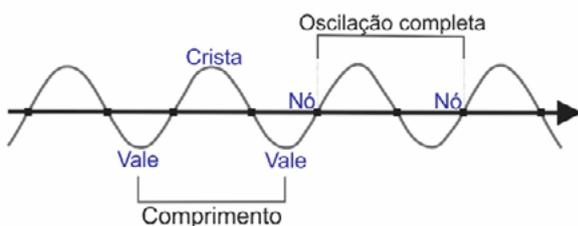
Para realizar medições de descarga líquida com perfiladores acústicos, é necessário conhecer os conceitos físicos básicos envolvidos no funcionamento desse tipo de equipamento.

3.1 Definição de ondas acústicas

As ondas acústicas são oscilações mecânicas que se propagam através de gases, líquidos ou sólidos (meios materiais). Em meios sólidos, podem se propagar transversal e longitudinalmente, enquanto em fluidos (gases e líquidos) apenas em ondas longitudinais.

Uma característica importante de uma onda é a sua frequência (número de oscilações por unidade de tempo), cuja unidade no Sistema Internacional de Unidades é o hertz (Hz). Uma oscilação completa equivale à distância entre três nós consecutivos, os quais representam os pontos extremos de uma onda (Figura 2).

Figura 2 - Representação análoga das características da onda longitudinal.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Logo, quando uma oscilação completa é realizada no intervalo de 1 segundo, equivale a dizer que a onda tem frequência de 1 Hz.

A banda de frequências em que o ouvido humano pode perceber o som está compreendida entre 20 Hz e 20 kHz, as quais são chamadas de sônicas. Já as frequências abaixo de 20 Hz são chamadas de subsônicas, enquanto as acima de 20 kHz de ultrassônicas. O ADCP utiliza a diferença de frequência Doppler das ondas acústicas em frequências ultrassônicas para medir a velocidade da água.

3.2 O efeito Doppler

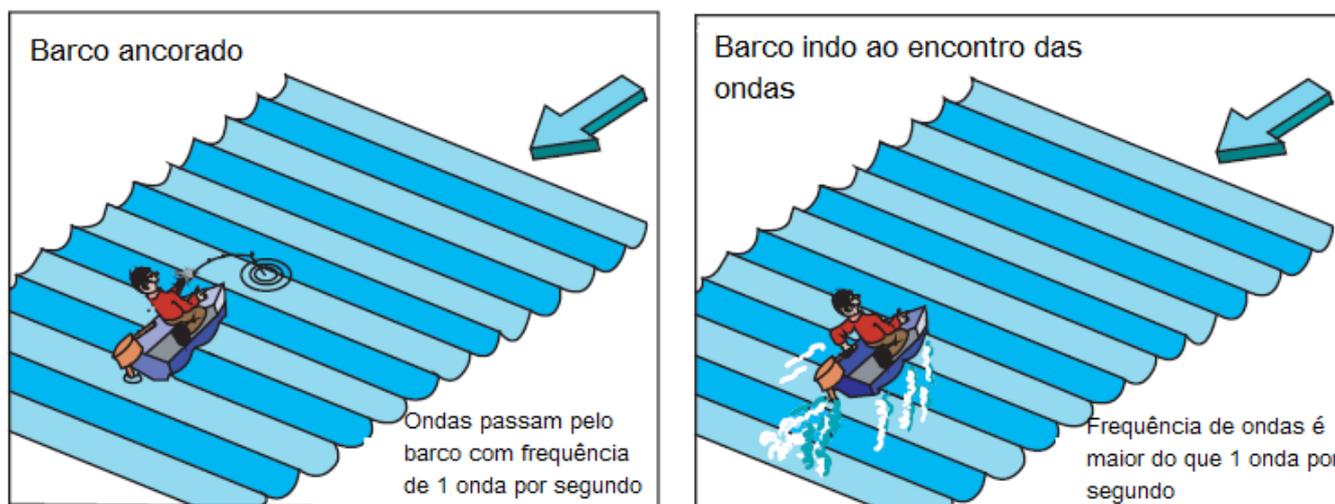
Efeito Doppler é a alteração de frequência recebida por um observador que apresenta movimento relativo à fonte da onda sonora. O princípio Doppler foi descrito na literatura pela primeira vez por Christian Johann Doppler, em 1842. Uma maneira didática de compreender o efeito Doppler é utilizando uma analogia de um barco navegando nas ondas do mar em diferentes condições (Figura 3):

- **Condição 1:** um pescador com seu barco ancorado no mar observa a passagem das ondas pelo seu barco com uma frequência de uma onda por segundo (1 Hz);
- **Condição 2:** o pescador avança com seu barco na mesma direção, mas no sentido oposto ao que as ondas estão se propagando, indo ao encontro da “fonte” das ondas, assim, o pescador terá a percepção de que as ondas passam pelo seu barco em uma frequência maior do que quando ele estava ancorado; e
- **Condição 3:** o pescador navega no mesmo sentido em que as ondas estão se propagando, afastando-se da “fonte” de ondas. Assim, ele terá a

percepção de que as ondas passam pelo seu barco com uma frequência

menor do que quando ele estava ancorado.

Figura 3 - Movimento da água em relação a um observador.

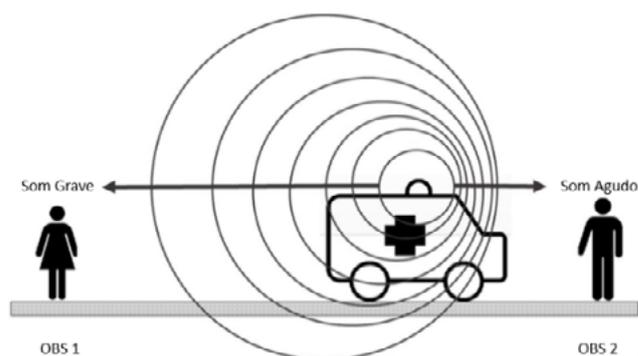


Fonte: Adaptado de SIMPSON (2001).

Nota-se que o movimento relativo de aproximação e afastamento entre o barco e a “fonte de ondas” só ocorre quando há um deslocamento na direção da propagação das ondas. Caso o barco realize um deslocamento na direção perpendicular à propagação das ondas, elas continuariam a atingi-lo na frequência de 1 onda por segundo (1 Hz). Ou seja, nenhuma variação de frequência seria percebida, independentemente do sentido do deslocamento.

Outro exemplo: há dois observadores parados e um veículo com a sirene ligada se afasta do observador 1 e se aproxima do observador 2. Conforme o veículo se movimenta, o observador 1 percebe o som mais grave (frequência menor), enquanto o observador 2 percebe o som mais agudo (frequência maior), como esquematizado pela Figura 4.

Figura 4 - Efeito Doppler acústico no som da sirene de uma ambulância.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Essa variação na frequência, efeito Doppler, recebida por um observador, devido ao movimento relativo da fonte de ondas (como por exemplo a sirene) em relação a ele, pode ser representada pela Equação 3.

$$F_D = F_s \left(\frac{V}{c} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

Na qual:

F_D : é a diferença de frequência Doppler (Hz);

F_s : é a frequência transmitida pela fonte (Hz);

V : é a velocidade relativa entre a fonte e o observador (m/s); e

c : é a velocidade de propagação do som no meio (m/s).

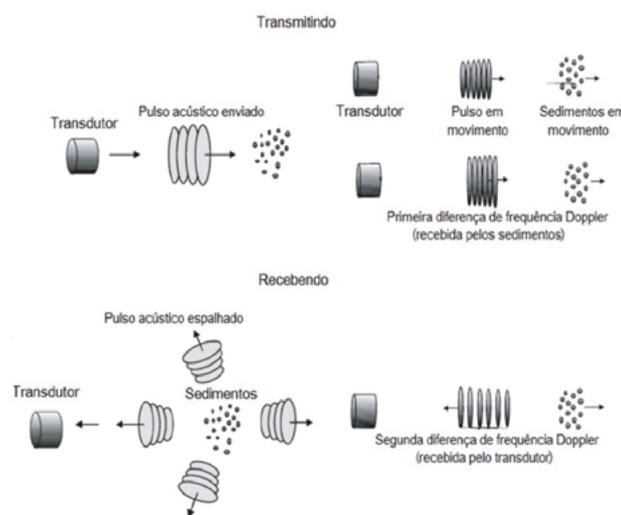
Nota-se que a diferença de frequência Doppler (F_D) é diretamente proporcional à frequência da fonte (F_S) e inversamente proporcional à velocidade de propagação do som no meio (c).

3.3 Determinação da diferença de frequência Doppler

No princípio básico de funcionamento de um *ADCP*, todos os transdutores do equipamento emitem pulsos de on-

das acústicas, que se propagam na água com a mesma frequência. Ainda que o corpo d'água apresente elevada transparência, existem sedimentos e plânctons em suspensão que representam barreiras aos pulsos emitidos pelo equipamento, refletindo as ondas em várias direções (Figura 5). Os pulsos refletidos pelos sólidos em suspensão são espalhados, e uma fração desse espalhamento é recebida de volta pelo *ADCP*. Essa parcela do pulso que retorna ao medidor é recebida com frequência alterada pelo efeito Doppler, gerado pelo movimento relativo entre os sólidos em suspensão e o medidor.

Figura 5 - Esquema de interação do pulso acústico com sedimentos em suspensão na água.



Fonte: Adaptado de SIMPSON (2001).

A diferença de frequência recebida pelo *ADCP* entre o pulso inicial transmitido na água e o pulso retornado para o equipamento após ser refletido pelo material existente na água é dada pela Equação 4:

$$F_D = 2F_S \left(\frac{V}{c} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

Na qual:

F_D : é a diferença de frequência Doppler medida pelo *ADCP* no retorno do pulso acústico (Hz);

F_S : é a frequência transmitida pelo *ADCP* (Hz);

V : é a velocidade relativa entre o *ADCP* e os sólidos em suspensão (m/s); e

c : é a velocidade de propagação do som no meio (m/s).

Uma vez que são conhecidos os valores de F_D , F_S e c , é possível determinar a velocidade V , que será a velocidade relativa entre o *ADCP* e os sólidos que espalharam o pulso.

Para entender a constante 2 na Equação 4, é necessário explicar a relação entre fonte e emissor. Em um primeiro momento, o ADCP é o emissor do pulso que atinge os sólidos em suspensão com uma diferença de frequência Doppler devido ao movimento em relação à fonte do pulso. Em seguida, os sólidos funcionam como um emissor do pulso que foi recebido, e, então, o ADCP trabalhará como um receptor do pulso emitido (refletido) pelos sólidos, com a mesma diferença de frequência Doppler.

Uma premissa importante dos métodos acústicos é que a velocidade das partículas sólidas em suspensão em um determinado ponto é considerada igual à velocidade da água naquele ponto. Dessa forma, a velocidade relativa entre o ADCP e os sólidos em suspensão pode ser considerada equivalente à velocidade relativa entre o ADCP e a água ($V_{\text{água}}$) (Equação 5).

$$V_{\text{água}} = \frac{c F_D}{2F_S} \quad (\text{Equação 5})$$

Na qual:

F_D : é a diferença de frequência Doppler medida pelo ADCP no retorno do pulso acústico (Hz);

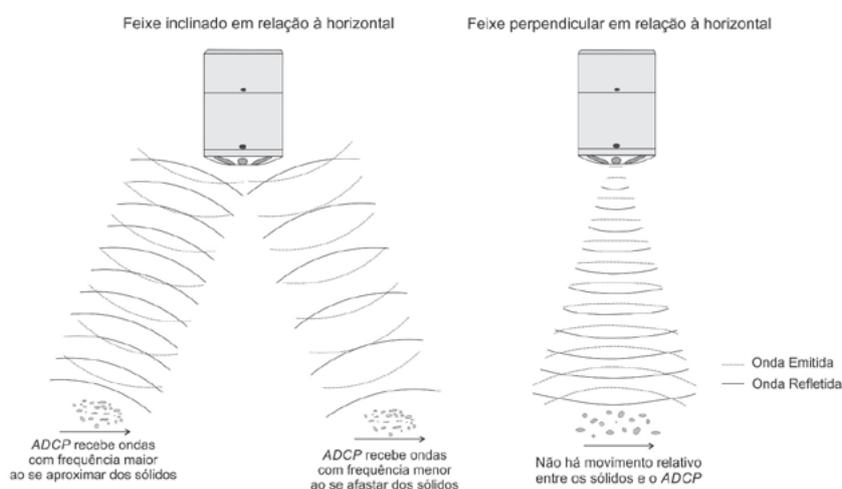
F_S : é a frequência emitida pelo ADCP (Hz);

c : é a velocidade de propagação do som no meio (m/s).

Para simplificação, na dedução da Equação 5, foi considerado um transdutor que emite pulsos na mesma direção do movimento dos sólidos suspensos e, por extensão, da água. Na prática, como não é possível emitir pulsos na mesma direção do movimento da água, os ADCPs possuem transdutores que emitem pulsos inclinados em relação ao plano horizontal (Figura 6), permitindo que haja diferença na frequência recebida pelo ADCP refletida pelos sólidos.

Destaca-se que o perfilador acústico *RiverRay* utiliza a tecnologia *Phased-Array*, na qual a inclinação dos feixes não é física, como mostrado na Figura 6, e sim gerada a partir da emissão de pulsos temporalmente defasados que produzem, por interferência acústica, frentes de onda inclinadas.

Figura 6 - Retorno do pulso emitido pelo ADCP, quando: (a) o transdutor emite pulso inclinado em relação à velocidade da água e (b) o transdutor emite pulso perpendicular à velocidade da água.



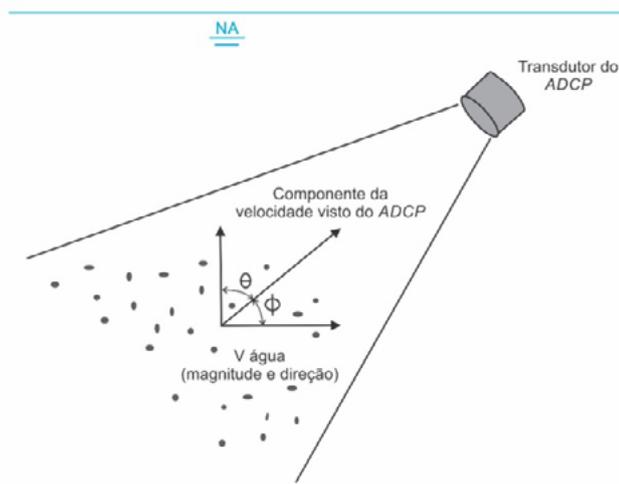
Fonte: Elaborada pelos autores.

Assim, a velocidade calculada pela diferença de frequência medida se refere a

uma componente da velocidade da água

“vista” pelo transdutor do ADCP (Figura 7), denominada velocidade radial.

Figura 7 - Decomposição da componente de velocidade da água medida (“vista”) pelo ADCP para obtenção da velocidade da água.



Fonte: Elaborada pelos autores.

A velocidade da água pode ser calculada adicionando o termo do ângulo na Equação 4 para decomposição da velocidade radial, obtendo a Equação 6.

$$V_{\text{água}} = \frac{c F_D}{2F_s \text{sen}(\theta)} \quad (\text{Equação 6})$$

Na qual:

θ : é o ângulo entre o eixo do transdutor e a vertical (determinado pelo fabricante).

Da Figura 7, observa-se que:

$$\phi = 90 - \theta, \text{ então } \text{sen}(\theta) = \text{cos}(\phi) \quad (\text{Equação 7})$$

3.4 Determinação da velocidade da água pelo método acústico

De modo geral, os ADCPs usam feixes inclinados apontados para diferentes direções e cada feixe mede uma componente radial de velocidade (velocidade medida em coordenadas do transdutor). Conhecendo os ângulos de inclinação dos transdutores com a horizontal e os ângulos de espaçamento entre transdutores, é possível estabelecer relações métricas para converter a velocidade medida em coordenadas do transdutor

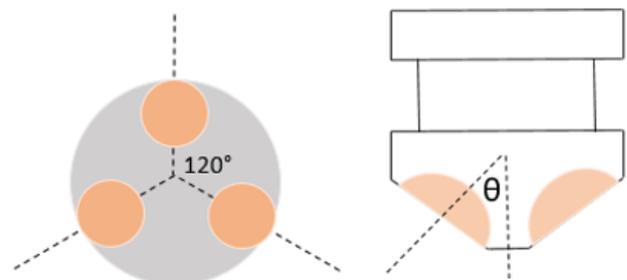
para um sistema de coordenadas tridimensional ortogonal, formado pelos planos horizontal e vertical.

Cada feixe mede uma componente radial da velocidade, portanto, para medir três componentes da velocidade (leste, norte, para cima - *ENU*) são necessários pelo menos três feixes (TELEDYNE RD INSTRUMENTS, 2010).

Para que seja possível estabelecer as relações métricas de conversão de coordenadas de transdutor para coordenadas ortogonais (*xyz*), é tomado como premissa que a mesma velocidade da água é medida pelos feixes (ou seja, não há variação de direção, sentido ou magnitude na velocidade da água durante sua passagem pelos transdutores). Sendo assim, é premissa do método que a velocidade da água seja homogênea na área amostrada pelos feixes do ADCP.

Os ADCPs podem trabalhar com a configuração denominada Janus de quatro feixes ou simples de três feixes. Para a configuração de três feixes, eles são distribuídos em torno do transdutor com um espaçamento de 120° e inclinados em um ângulo conhecido (θ) em relação à vertical, conforme apresentado na Figura 8 (MUELLER *et al.*, 2013).

Figura 8 - Configuração dos ADCPs de três feixes.



Fonte: Elaborada pelos autores.

As equações para os cálculos das componentes tridimensionais do vetor da velocidade da água em um sistema típico de três feixes, com o feixe 1 apontado para a jusante, é:

$$V_x = \frac{T_3 - T_2}{\sqrt{3} \sin(\theta)} \quad (\text{Equação 8})$$

$$V_y = \frac{T_2 + T_3 - 2T_1}{3 \sin(\theta)} \quad (\text{Equação 9})$$

$$V_z = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3 \cos(\theta)} \quad (\text{Equação 10})$$

Na qual:

V_x : é a velocidade ao longo do eixo x, considerando que o eixo x forma um plano horizontal com y e está perpendicular ao fluxo;

V_y : é a velocidade ao longo do eixo y, considerando o eixo y orientado na direção do fluxo;

V_z : é a velocidade ao longo do eixo z, considerando que o eixo z é perpendicular ao plano xy;

T_1 : é a velocidade radial medida pelo transdutor 1;

T_2 : é a velocidade radial medida pelo transdutor 2;

T_3 : é a velocidade radial medida pelo transdutor 3; e

θ : é o ângulo entre o eixo do transdutor e a vertical (determinado pelo fabricante).

Apesar de ser possível determinar a velocidade da água utilizando três transdutores, a maior parte dos equipamentos utilizam quatro, permitindo o cálculo de incerteza e a avaliação da coerência das medidas realizadas entre transdutores. Detalhes a respeito da fundamenta-

ção teórica para determinação do erro de velocidade podem ser encontrados em (SIMPSON, 2001).

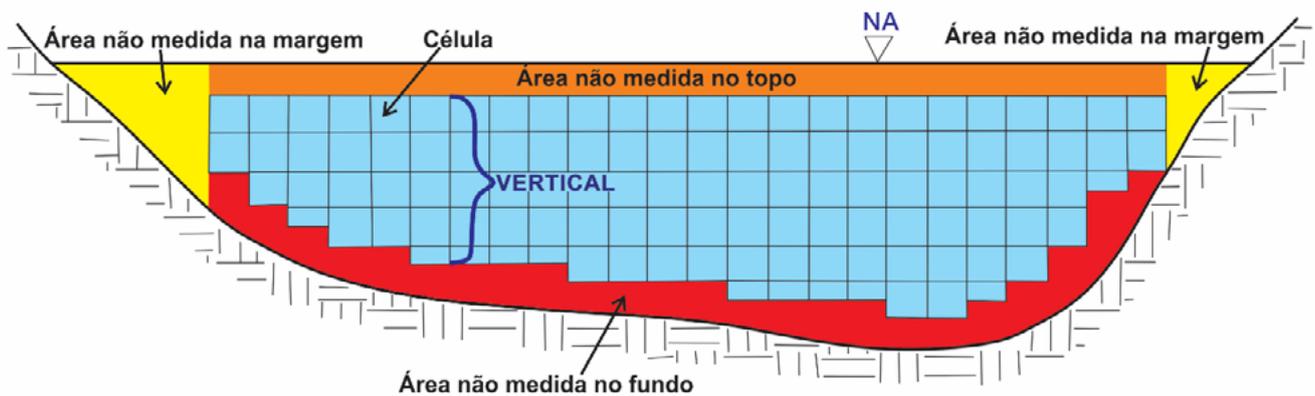
3.5 Cálculo da vazão na seção transversal

A descarga líquida final (Q), calculada pelo ADCP, é composta pela soma da descarga líquida efetivamente medida pelo equipamento na seção transversal e pelas descargas líquidas estimadas correspondentes às margens, ao topo e ao fundo, de acordo com a Equação 11.

Na Figura 9, é apresentado o esquema das células e das verticais de uma medição de descarga líquida com ADCP. Uma célula corresponde a um elemento que possui informações de velocidade da água, posição horizontal, profundidade, comprimento (largura) e altura. As células que estão na mesma posição horizontal são elementos que constituem uma mesma vertical. A discretização ao longo de uma vertical (altura das células) depende do tipo de equipamento acústico utilizado, em especial, da sua frequência e da velocidade da água.

Ainda na Figura 9, é possível observar as áreas não medidas pelo ADCP devido às limitações que podem ocorrer por condições específicas do local de medição, por exemplo, quando o calado da embarcação limita a aproximação até a margem, por limitação do equipamento que não mede a coluna d'água correspondente a sua parte submersa (profundidade do transdutor) ou por limitações da tecnologia utilizada pelo ADCP. Essas limitações serão abordadas neste capítulo.

Figura 9 - Esquema de discretização de uma vertical para determinação da vazão em células e em áreas em que a vazão não é medida pelo ADCP.



Fonte: Adaptado de MOTTA (2016).

3.5.1 Cálculo da vazão medida pelo ADCP (Q_{medida}) ao longo da seção de medição

No processo de medição de descarga líquida, o ADCP é deslocado de uma margem a outra. Durante a travessia, são realizadas medidas de velocidade da água, da velocidade de deslocamento do medidor (denominada neste documento como velocidade do barco) e da profundidade do canal ao longo da seção de medição.

A profundidade é calculada a partir do tempo decorrido entre o instante em que o pulso é emitido até o instante em que é recebido, dividido por 2, multiplicado pela velocidade do som no meio. A emissão do pulso pode ser feita pelo feixe vertical, pela média das profundidades medidas dos feixes inclinados ou, ainda, por um ecobatímetro acoplado ao ADCP.

A velocidade do barco pode ser obtida utilizando a técnica de rastreamento de fundo (*bottom track*) ou receptores GNSS acoplados ao ADCP.

Todos os ADCPs que são destinados para medição de descarga líquida têm a capacidade de calcular a velocidade da

embarcação usando o rastreamento de fundo (Simpson, 2001).

O cálculo da velocidade do barco, realizado pela técnica *bottom track*, é semelhante ao cálculo da velocidade da água. O equipamento emite pulsos mais longos e sua velocidade de deslocamento é determinada pela diferença Doppler do sinal refletido pelo leito.

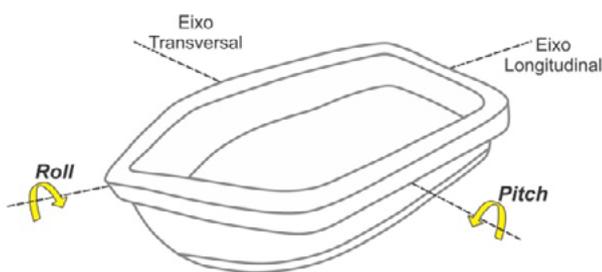
O uso de receptores GNSS permite determinar o deslocamento e a velocidade do barco utilizando sistemas de coordenadas geográficas e referenciais absolutos de altitude. Alguns ADCPs, como o *Rio Grande* da TRDI, admitem a adaptação de receptores GNSS externos, enquanto outros, como o *M9* da *Sontek*, possuem receptores GNSS específicos definidos pelo fabricante. O esquema de utilização de receptores GNSS em equipamentos da TRDI e da *Sontek* é tratado no documento complementar com tutoriais.

A utilização de receptores GNSS é importante para o caso de seções em que os aparelhos têm dificuldade para se posicionar por meio do *bottom track*, como é o caso dos rios que apresentam fundo móvel. A condição de fundo mó-

vel e suas implicações nas medições de descarga líquida são tratadas com mais detalhes na seção 5.1.9.

O ADCP possui bússola e sensores internos para a correção do *pitch* e *roll*, que são movimentos de rotação nos eixos transversal e longitudinal, respectivamente (Figura 10). O *pitch* e o *roll* são corrigidos para produzir o que a TRDI chama de coordenadas do barco (TELEDYNE, 1998).

Figura 10 - Esquema de rotação nos eixos transversal (*pitch*) e longitudinal (*roll*).



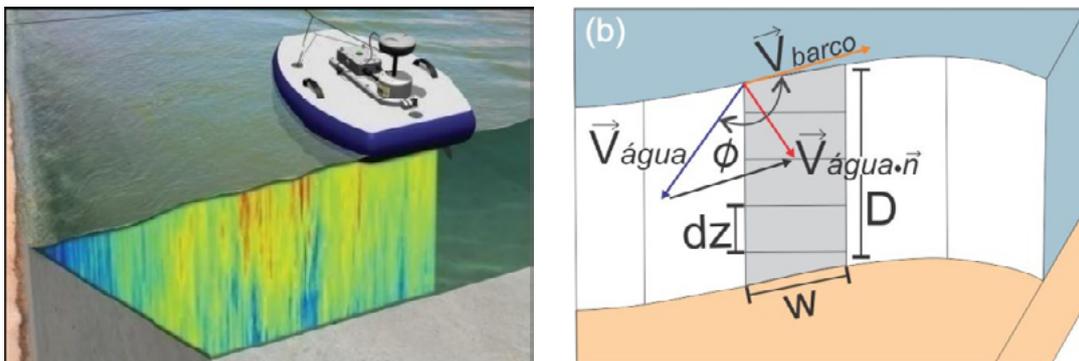
Fonte: Elaborada pelos autores.

Outra transformação é feita para projetar as coordenadas do barco utilizando o rumo medido por uma bússola e resulta em coordenadas *ENU* (*East-North-Up*).

Durante o processo de medição, a seção é discretizada em células ao longo das quais é determinada a velocidade da água perpendicular à seção de medição. Como o ADCP mede as velocidades nas direções X, Y e Z, são conhecidas as velocidades em cada componente, e a velocidade resultante $\vec{V}_{\text{água}}$ é obtida pela soma vetorial de cada componente.

Na Figura 11, é apresentado um esquema que indica as velocidades da água ($\vec{V}_{\text{água}}$) e do barco (\vec{V}_{barco}). A área de cada célula é calculada pelo produto da sua altura (dz) e largura da vertical (w). A altura da célula é definida de acordo com a configuração do equipamento, enquanto a largura é determinada pelo produto da velocidade do barco e o tempo decorrido entre verticais consecutivas.

Figura 11 - (a) Representação da aquisição de verticais (b) Discretização de uma vertical para determinação da vazão em células.



Fonte: Mueller et. al. (2013).

Aplicando a equação da continuidade em uma célula da vertical tem-se:

$$Q_{\text{cel}} = |\vec{V}|A \quad (\text{Equação 12})$$

Na qual:

Q_{cel} : é a vazão da célula;

\vec{V} : é a velocidade da água perpendicular à área da célula; e

A: é a área da célula.

Da Figura 11 tem-se:

$$A = w dz = |\vec{V}_{\text{barco}}| dt dz \quad (\text{Equação 13})$$

Na qual:

w : é a largura da célula;

dz : é a altura da célula;

dt: é o tempo entre dois pulsos.

Logo, substituindo a Equação 13 na Equação 12 tem-se:

$$Q_{cel} = |\vec{V}| |\vec{V}_{barco}| dt dz \quad (\text{Equação 14})$$

Sendo um vetor unitário normal à área da célula, tem-se:

$$\vec{V} = |\vec{V}_{\acute{a}gua}| \cos(\phi - 90^\circ) \cdot \hat{n} \quad (\text{Equação 15})$$

Na qual:

θ : é o ângulo entre $\vec{V}_{\acute{a}gua}$ e \vec{V}_{barco}

Portanto:

$$Q_{cel} = [|\vec{V}_{\acute{a}gua}| \cos(\phi - 90^\circ)] |\vec{V}_{barco}| dt dz \quad (\text{Equação 16})$$

$$Q_{cel} = |\vec{V}_{\acute{a}gua}| |\vec{V}_{barco}| \text{sen } \phi dt dz \quad (\text{Equação 17})$$

Assim, o cálculo da vazão de cada célula é resultado do produto vetorial (produto das magnitudes vetoriais e seno do ângulo) entre a $\vec{V}_{\acute{a}gua}$ e \vec{V}_{barco} multiplicado pela variação do tempo e pela altura da célula:

$$Q_{cel} = |\vec{V}_{\acute{a}gua} \times \vec{V}_b| dt dz \quad (\text{Equação 18})$$

Considerando o plano horizontal XY, a vazão da célula é dada por:

$$Q_{cel} = (V_{\acute{a}guaX} V_{barcoY} - V_{\acute{a}guaY} V_{barcoX}) dt dz \quad (\text{Equação 19})$$

No qual:

$V_{\acute{a}guaX}$ e $V_{\acute{a}guaY}$: são as componentes de velocidade da água; e

V_{barcoX} e V_{barcoY} : são as componentes da velocidade do barco.

A vazão medida pelo ADCP (Q_{medida}), após atravessar a seção de medição, é dada pela soma das vazões de cada uma das i células, que foram coletadas ao longo de j verticais.

$$Q_{medida} = \sum_{j=1}^{verticals} Q_{vertical}^j \quad (\text{Equação 20})$$

$$Q_{vertical}^j = \sum_{i=1}^{células} Q_{cel}^{i,j} \quad (\text{Equação 21})$$

$$Q_{medida} = \sum_{j=1}^{verticals} \sum_{i=1}^{células} Q_{cel}^{i,j} \quad (\text{Equação 22})$$

3.5.2 Estimando a vazão não medida pelo ADCP

Esta seção está subdividida em dois tópicos. O primeiro refere-se aos conceitos relacionados à ocorrência de áreas não medidas, devido às limitações dos ADCPs, e o segundo aborda técnicas de estimativa de vazão nas margens e de extrapolação dos perfis de velocidade para áreas não medidas no topo e no fundo do rio.

3.5.3 Limitações dos ADCPs para medição de descarga líquida em uma seção de medição

A primeira limitação do ADCP é a profundidade mínima de medição associada às margens. Quando a profundidade é pequena, caso a distância até o fundo do canal não permita a formação de pelo menos duas células, o ADCP não medirá a velocidade nessa área. Essa situação pode ocorrer, por exemplo, quando a profundidade reduz acentuadamente (efeito encontrado próximo às margens, por exemplo).

Além da limitação para medição próximo das margens, há ainda limitações para medir velocidades no topo (próximo à superfície da água) e próximo ao leito do rio. A limitação de topo é denominada *draft* e se refere às restrições do aparelho em realizar medições imediatamente abaixo do nível d'água, visto que os transdutores do ADCP devem ficar mergulhados abaixo do nível d'água, em profundidade suficiente para garan-

tir que eles estejam submersos durante todo o processo de medição.

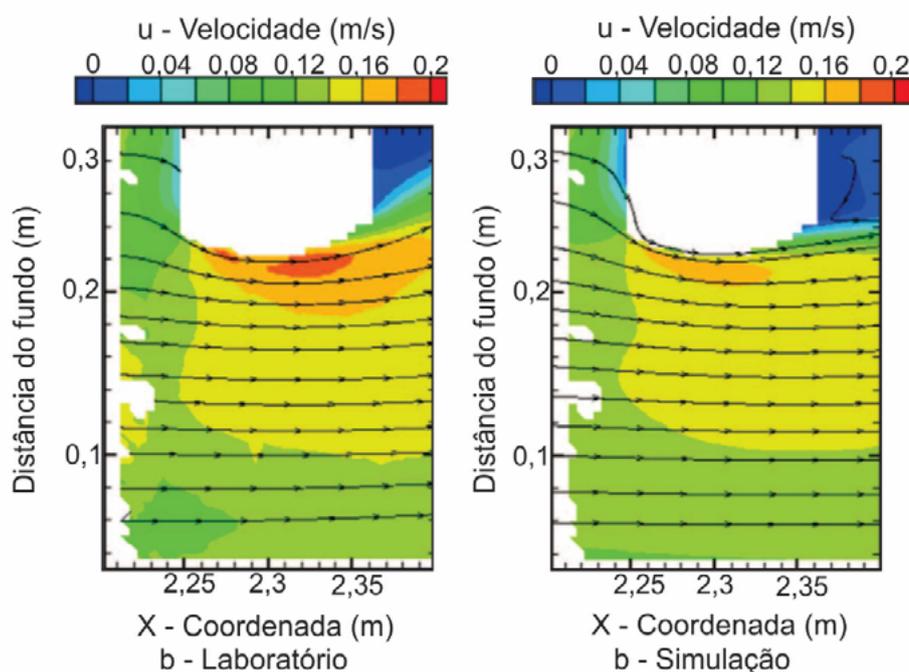
Além do *draft*, há uma região abaixo do transdutor (*blank distance*), onde a vazão medida deve ser desconsiderada devido ao tempo de recuperação do transdutor e à influência dele no padrão de escoamento da água.

Após emitir um pulso, é necessário um tempo para que o transdutor pare de vibrar completamente e tenha condições de receber o retorno (chamado aqui de tempo de recuperação do transdutor). Uma analogia para esse fenômeno é que após bater em um grande gongo, ele permanecerá vibrando por um certo período de tempo. Assim como o gongo, a

parada total do transdutor não é imediata, sendo necessário descartar as medidas realizadas próximas do transdutor. A distância descartada, devido ao tempo de recuperação, varia de acordo com a velocidade de propagação do som no meio, a frequência, o modo de operação e o tamanho da célula (SIMPSON, 2001)

O próprio transdutor também funciona como uma barreira ao escoamento, desviando parte das linhas de corrente superficiais para baixo e passando na zona de medição do transdutor (Figura 12), para mais detalhes ver Mueller *et al.*(2007). As indicações do tamanho da área de influência são informadas pelos fabricantes dos equipamentos.

Figura 12 - Medidas de laboratório e simulações mostrando a distorção da velocidade horizontal causadas pela presença do ADCP.



Fonte: Adaptado de MUELLER *et al.* (2007).

O *software* de operação dos equipamentos da *Sontek (River Surveyor Live)* apresenta, além do campo de informação do *draft*, o campo Região Filtrada. Nesse campo, o usuário pode indicar a área maior a ser desconsiderada devido às condições de operação. O valor mínimo a ser inserido na Região Filtrada é

a soma do *draft* com o *blank*, informada pelo fabricante no manual do equipamento e detalhada no documento complementar com tutoriais.

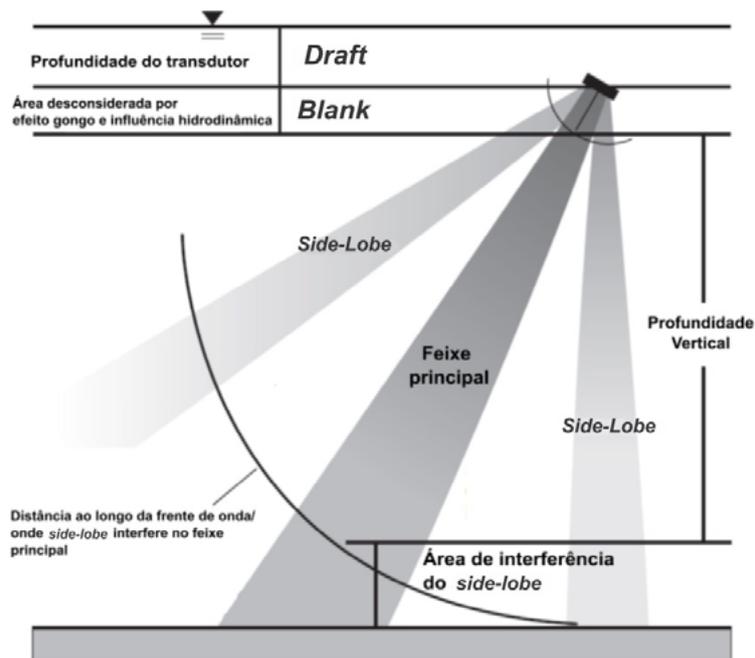
As áreas correspondentes ao *draft* e ao *blank* superficial são mostradas na Figura 13.

Também, no leito e próximo a ele, há uma limitação para realizar leituras de velocidade. O feixe principal emitido por um transdutor gera ruídos laterais (feixes secundários), que, apesar da pouca energia se comparados ao feixe principal, atingem o leito antes do feixe principal e contaminam o sinal de retor-

no refletido pela água próxima ao fundo do canal. Esse efeito é denominado *Side-Lobe*.

Por esse motivo, é desconsiderada uma faixa de profundidade que recebe os sinais que retornam do leito do rio, conforme pode ser verificado na Figura 13.

Figura 13 - Esquema ilustrando as limitações de medidas de velocidade de topo e fundo do ADCP.



Fonte: Adaptado de SIMPSON (2001).

Em condições de medição ideais, o percentual medido por um ADCP pode chegar até 80%. Em geral, o maior percentual extrapolado ocorre devido à extrapolação de fundo, que corresponde a aproximadamente 10% da profundidade total.

3.5.4 Métodos de estimativas de vazão nas margens e extrapolação de topo e fundo

Para realizar a estimativa de vazão nas margens, é utilizada como referência a velocidade da água medida na vertical mais próxima a ela. Também, é necessário informar o tipo de margem do canal (gradual, por exemplo) e a distância do ADCP até ela, para que a área não medida seja calculada. Para o caso de margem do tipo gradual, é utilizado um

coeficiente de forma que aproxima a margem a um triângulo e para margem vertical ou retangular é utilizado o fator de forma que aproxima a margem a um retângulo.

A descarga não medida nas margens é estimada usando o método de interpolação de razão, o qual permite estimar a velocidade em um local não medido entre a margem do rio e a primeira ou última velocidade medida na seção de medição. A estimativa é feita de acordo com a Equação 23 (FULFORD; SAUER, 1986):

$$\frac{V_{x'}}{\sqrt{d_{x'}}} = \frac{V_m}{\sqrt{d_m}} \quad (\text{Equação 23})$$

Na qual:

x' : é o ponto médio entre a margem e a última/primeira vertical;

$V_{x'}$: é a velocidade média estimada em x' ;

$d_{x'}$: é a profundidade em x' ;

V_m : é a velocidade média na última/primeira vertical; e

d_m : é a profundidade na última/primeira vertical.

Considerando que a margem tem um formato triangular, a descarga líquida na margem pode ser estimada da seguinte forma:

$$Q_{\text{margem}} = A_{\text{margem}} V_{x'} = x' d_m V_m \frac{\sqrt{0,5d_m}}{\sqrt{d_m}} \quad (\text{Equação 24})$$

Na Equação 24, o fator de forma utilizado é a própria área da geometria escolhida. Contudo, os fabricantes dos medidores acústicos podem utilizar em seus softwares de processamento e pós-processamento fatores de forma distintos, que levam em consideração a rugosidade do canal e a velocidade da água.

O cálculo da velocidade no topo é comumente realizado aplicando um ajuste de potência, que é dado pela Equação 25:

$$V = a z^b \quad (\text{Equação 25})$$

Na qual:

a é o coeficiente ajustado por mínimos quadrados com dados medidos;

z é a distância entre o leito e a posição do valor de v ; e

b é o expoente de extrapolação, em geral, 1/6 (0,16667).

A equação de potência é uma aproximação da distribuição da velocidade da água semelhante a Manning (MUELLER *et al.*, 2013) e o cálculo da vazão de topo é realizado integrando a Equação 25, conforme pode ser visto na Equação 26.

$$Q_{\text{topo}} = \sum_{i=1}^{\text{verticais}} \frac{a}{b+1} (z_{ws}^{b+1} - z_{tb}^{b+1}) dt \quad (\text{Equação 26})$$

Na qual:

Z_{ws} : é a distância do leito do rio até a superfície da água;

Z_{tb} : é a distância do leito do rio até o topo da primeira célula de superfície válida;

Diferente da estimativa de descarga no topo, onde a velocidade na superfície da água não é conhecida, a velocidade da água no leito do rio é conhecida. A teoria da mecânica dos fluidos indica que a velocidade da água deve ir a zero no leito do rio e que um ajuste logarítmico é uma aproximação razoável do perfil de

velocidade (SCHLICHTING, 1979). Portanto, a equação de potência é normalmente usada para calcular a descarga na parte inferior não medida da coluna de água, conforme Equação 27:

$$Q_{\text{fundo}} = \sum_{j=1}^{\text{verticais}} \frac{a}{b+1} z_{bb}^{b+1} dt \quad (\text{Equação 27})$$

Na qual:

Z_{bb} é a distância do leito ao fundo da célula de fundo válida;

a é o coeficiente ajustado por mínimos quadrados com dados medidos;

b é o expoente de extrapolação, em geral, $1/6$ (0,16667).

Os métodos de cálculo de vazão de margem, de topo e de fundo aqui apresentados constituem uma base geral. Contudo, existem outros métodos de estimativa, que variam de acordo com o *software* utilizado. Como exemplo, o *software* de pós-processamento *QRev* possui três opções de extrapolação de topo e duas de fundo e os fatores de forma utilizados para margens retangulares nos programas da *TRDI* e da *Sontek* são diferentes, sendo necessário observar as particularidades de cada um dos *softwares*. Os métodos utilizados pela *TRDI* e pela *Sontek* são apresentados no documento complementar com tutoriais.

4 Especificação dos medidores

A escolha de um determinado medidor acústico vai depender das condições esperadas do local onde serão realizadas as medições de descarga líquida.

A frequência de operação dos equipamentos é um fator importante na sua escolha. Os equipamentos de menor frequência são destinados a perfilar maiores profundidades, pois emitem sinais de maior alcance devido à maior intensidade do eco. Como a energia emitida é maior, eles estão menos sujeitos a interferências provocadas por altas concentrações de sedimentos.

Condições em que a concentração de sedimentos é suficientemente grande para dissipar completamente o sinal acústico antes que ele atinja a profundidade do canal são muito particulares e não há uma especificação para esses casos.

Na Tabela 1 são apresentadas especificações e características a elas associadas dos principais modelos de equipamentos atualmente utilizados no Brasil. Em termos de acurácia, precisão e resolução da velocidade da água, o desempenho dos medidores é semelhante. Porém, a amplitude de profundidade para medição de descarga líquida é bastante variada entre os medidores.

Tabela 1 - Especificações técnicas de alguns ADCPs produzidos em escala comercial

| Características | Sontek | | Teledyne Marine | | | |
|--|-----------------------------|-------------------------------------|---|--|-------------------------------|-----------------------------|
| | S5 ¹ | M9 ¹ | Work Horse Rio Grande 1200 kHz ² | Work Horse Rio Grande 600 kHz ² | RiverRay 600 kHz ³ | StreamPro ⁴ |
| Tamanho das células (resolução da célula) | 0,02 a 0,5m | 0,02 a 4m | 0,05 a 2m | 0,1 a 4m | > 0,1m | 0,01m a 0,2m |
| Configuração de transdutores | 4 feixes 3,0 MHz | 4 feixes 3,0 MHz e 4 feixes 1,0 MHz | 4 feixes 1,2 MHz | 4 feixes 0,6 MHz | 4 feixes 0,6 MHz | 4 feixes 2MHz |
| | Janus com 25° de inclinação | Janus com 25° de inclinação | Janus com 20° de inclinação | Janus com 20° de inclinação | Janus com 30° de inclinação | Janus com 20° de inclinação |
| | Feixe vertical 1,0 MHz | Feixe vertical 0,5 MHz | Sem feixe vertical | Sem feixe vertical | Feixe vertical | Sem feixe vertical |
| Amplitude de profundidade para medição de descarga líquida (Usando BT) | 0,3 a 5m | 0,3 a 40m | 0,75 a 30m | 0,75 a 100m | 0,40 a 100m | 0,1m a 7m |
| Software de processamento | <i>RiverSurveyor</i> | <i>RiverSurveyor</i> | <i>WinRiver II</i> | <i>WinRiver II</i> | <i>WinRiver II</i> | <i>WinRiver II</i> |

Fonte:

¹<https://www.sontek.com/riversurveyor-s5-m9>

²https://www.comm-tec.com/Prods/mfgs/RDI/brochures/rio_grande_ds_lr.pdf

³http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/riverray_datasheet_lr.pdf

⁴http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/streampro_datasheet_hr.pdf

5 Procedimentos de medição de descarga líquida

Os procedimentos de medição de descarga líquida com ADCP contemplam todas as etapas de campo, que vão desde a escolha do local até orientações e padrões a serem aplicados em campo antes, durante e depois da coleta de dados.

Uma medição de descarga líquida com ADCP deve, necessariamente, conter:

- O teste de sistema válido realizado antes da medição;
- A calibração da bússola válida realizada antes da medição;
- Ao menos um teste de fundo móvel válido realizado, preferencialmente, antes da medição de descarga líquida;
- Os pares de travessias realizados para determinação da vazão; e

- As leituras de cota durante a realização das travessias.

Sobre a leitura de cotas, é conveniente destacar que o profissional de campo deve se certificar que o nivelamento da régua no nível de água está correto. A conferência deve ser realizada, preferencialmente, antes do início da medição de vazão. Os procedimentos de nivelamento de régua linimétricas, adotados na operação da Rede Hidrometeorológica Nacional, não compreendem o escopo deste documento, pois há um manual específico para esse fim (ANA, 2021).

Na Figura 14, são resumidas as etapas para aquisição de uma medição de descarga líquida com ADCP, na ordem em que devem ser executadas, as quais serão detalhadas ao longo deste capítulo. Em verde, vermelho e amarelo encontram-se dispostos os procedimentos que devem ser realizados antes, durante

e após a medição de descarga líquida, respectivamente.

É conveniente destacar que uma boa medição de descarga líquida começa com a utilização de medidores cujas especificações sejam adequadas às condições da seção do canal e que estejam em perfeitas condições de funcionamento. Para isso, é importante que o

medidor seja corretamente armazenado e previamente testado antes de ser levado para o campo.

No Capítulo 7, encontram-se as orientações de controle de qualidade e manutenção que devem ser observadas com o objetivo de garantir que os medidores utilizados em campo estejam funcionando corretamente.

Figura 14 - Etapas de campo de uma medição. As etapas em verde correspondem aos procedimentos que devem ser realizados antes da medição, em vermelho durante a medição e em amarelo após a medição.



Fonte: Elaborada pelos autores.

5.1 Procedimentos antes da medição de descarga líquida

Para a obtenção de um dado de vazão com boa qualidade é necessário realizar e documentar procedimentos prévios

à medição de descarga líquida propriamente dita. A seguir, são descritos os testes e recomendações que devem ser observados antes da coleta de dados e as informações que devem ser inseridas

no arquivo para a identificação da medição.

5.1.1 Seleção do local

Selecionar o local onde a medição de descarga líquida será realizada é uma das etapas críticas para qualidade da medição. Algumas características desejáveis de localização, geometria da seção transversal e velocidade da água devem ser observadas para seleção do local de medição:

- A seção transversal onde ocorrerá a medição de descarga líquida deve estar em um trecho retilíneo do curso d'água, no qual as linhas de corrente são paralelas entre si e com pouca turbulência. Locais com ocorrência de vórtices e muita ondulação devem ser evitados, pois aumentam o erro de velocidade da medição e tornam o perfil de velocidade da seção transversal menos previsível, além disso, ondas podem permitir a entrada de ar abaixo do *ADCP*, prejudicando a coleta de verticais;
- São preferíveis seções de medição simétricas, com geometria parabólica, trapezoidal ou retangular e sem variações abruptas da profundidade. Seções com geometrias conhecidas sem turbulência apresentam padrão de escoamento previsível (Figura 15);
- Ao se deslocar para montante ou para jusante, na busca de uma seção de medição, o profissional de campo deve estar atento se a contribuição afluenta ao posto de monitoramento fluviométrico não está sendo alterada. Caso a contribuição afluenta aumente (ao se deslocar para jusante) ou diminua (ao se deslocar para montante), a medição de descarga líquida pode não ser representativa da relação cota/vazão da estação de monitoramento fluviométrico;
- Durante os períodos de mudança rápida do nível d'água, deve ser observado se o local selecionado é influenciado por efeitos de armazenamento entre a seção de medição e a seção de controle onde está o posto de monitoramento fluviométrico. Caso isso ocorra, a condição de escoamento transiente observada no controle não será detectada na medição de descarga líquida e esta não será representativa da condição observada no posto de monitoramento fluviométrico;
- O leito da seção de medição deve ser o mais uniforme possível, livre de vegetação ou de detritos soltos, pois podem causar ruídos no sinal emitido pelo *ADCP*, causando erros na velocidade medida pelo equipamento;
- A profundidade do canal deve ser adequada ao equipamento que está sendo utilizado. Ao longo de toda a travessia e nos pontos de início e fim em ambas as margens, a profundidade deve permitir ao equipamento amostrar velocidades válidas em, ao menos, duas células. Essa condição garante que os ajustes das curvas das extrapolações do perfil de velocidade para áreas não medidas não sejam realizados utilizando um único ponto;
- A seção de medição deve ser selecionada considerando que a vazão calculada em cada margem deve representar menos de 5% da descarga líquida total da medição;
- Seções com velocidade média menor do que 0,09 m/s devem ser evitadas. Embora os medidores acústicos possuam resolução suficiente para realizar medições de descarga líquida com velocidade da água abaixo de

0,09 m/s, a operação da embarcação nestas condições é complicada, muitas vezes exigindo técnicas especiais de controle do barco (SIMPSON, 2001a);

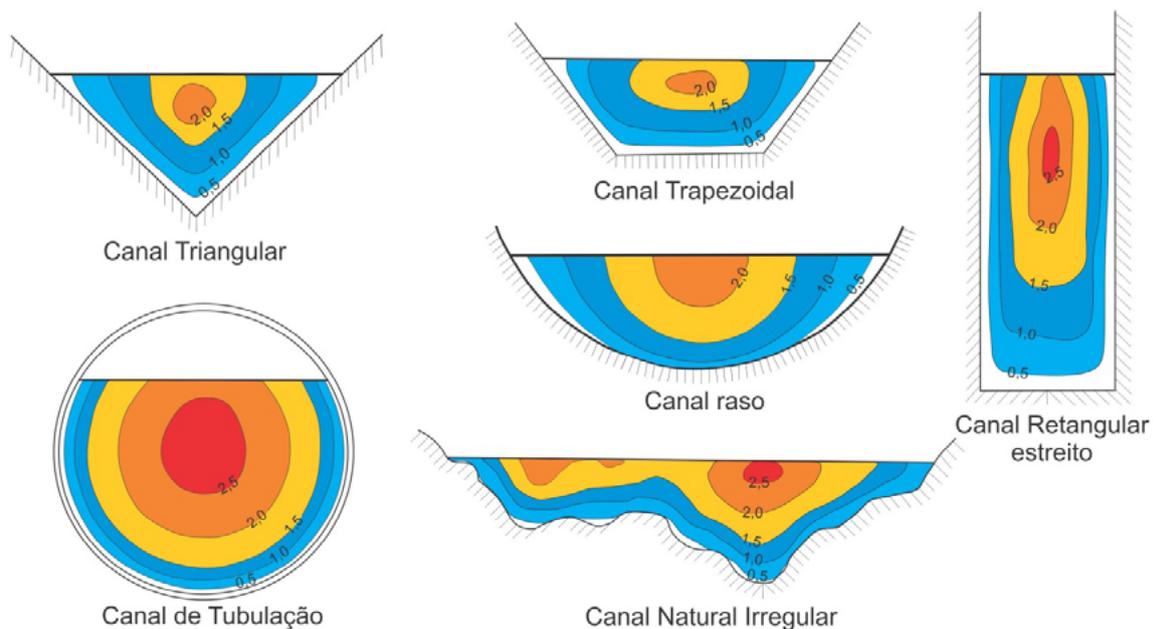
- Evitar seções onde o campo magnético local é diferente do campo magnético terrestre, como próximo a grandes estruturas de aço. Nestes lugares, a variação do campo magnético local pode ocasionar erros de posicionamento no ADCP; e
- Se estiver utilizando um receptor GNSS, evitar locais que possam provocar o efeito do multicaminho ou bloqueio do sinal emitido pelo re-

ceptor GNSS (e.g., vegetação densa, próximo a construções).

As recomendações descritas são um guia para auxiliar na escolha do local onde a medição será realizada. No entanto, em algumas situações não é possível satisfazer todas as recomendações e isso pode ter implicações na qualidade da medição.

Cabe ao profissional de campo ponderar as limitações existentes e suas implicações na qualidade da medição de descarga, documentar detalhadamente as condições encontradas e justificar suas escolhas em formulário de medição de descarga líquida.

Figura 15 – Padrões de isolinhas de velocidade em diferentes geometrias de seção transversal



Fonte: CHOW (1959).

5.1.2 Identificação da medição

Toda medição de descarga líquida deve ser identificada com o nome e o código da estação fluviométrica, o nome do curso d'água, o número da medição, o local da seção de medição (distância em relação à seção de réguas), a data da medição, os nomes dos responsáveis pela coleta dos dados e o modo como a medição foi realizada (medidor acopla-

do ao barco, utilizando prancha ou trimarã com polias, medição de ponte etc).

Os níveis da água observados durante a medição devem ser documentados nas notas de campo e inseridos dentro do campo específico para esse fim no *software* de processamento da medição. É necessário que a cota seja verificada sistematicamente ao final de cada travessia.

No campo de observações do *software* do equipamento, devem-se inserir, resumidamente, informações relevantes para a realização da medição, como condições meteorológicas (vento, chuva etc), condições físicas da seção, interferências inevitáveis ou outras informações que possam influenciar na leitura adequada das variáveis medidas pelo equipamento. O detalhamento dessas condições será tratado no item 5.3.

5.1.3 Data e hora

O relógio interno do *ADCP* deve ser acertado antes de iniciar a medição de descarga. Esse procedimento deve ser realizado antes da realização do teste de diagnóstico do equipamento, da calibração da bússola e da configuração da medição, para que todos os registros eletrônicos de data e hora estejam corretos.

O relógio do *ADCP* deve ser ajustado para coincidir com o horário de Brasília (GMT - 03:00), uma vez que a RHN adotou esse fuso como padrão para seus registros de cotas.

5.1.4 Diagnóstico do equipamento

O teste diagnóstico ou teste de sistema deve ser executado antes de se iniciar a medição, sendo composto por uma série de avaliações discretas que verificam o funcionamento de sensores e a comunicação do *ADCP*. Os *softwares* de medição disponibilizados pelos fabricantes geralmente possuem a ferramenta para o teste do sistema que realiza o diagnóstico do equipamento e apresenta uma interpretação automática do resultado.

O diagnóstico, em geral, contém o número serial do medidor, a versão de configuração do firmware e do *hardware*, a matriz de transformação, o diagnóstico

dos componentes eletrônicos, o teste dos sistemas internos e o teste de verificação dos sensores².

O teste de sistema deve ser realizado antes de cada medição de descarga líquida, conforme orientação do fabricante (descrito no documento complementar com tutoriais).

O resultado do teste é arquivado eletronicamente junto com os dados da medição. Para demais aplicações do teste diagnóstico, especificamente na rotina de controle de qualidade dos equipamentos, consultar o item 7.1.

Nos casos em que o teste não for realizado com sucesso, o *ADCP* não poderá ser utilizado para a medição. O arquivo de teste gerado deverá ser encaminhado para manutenção, juntamente com o equipamento danificado.

5.1.5 Declinação magnética

A declinação magnética deve ser fornecida para que o trajeto do barco e os vetores de velocidade da água calculados pelo *GNSS* sejam orientados corretamente em relação ao norte verdadeiro.

5.1.6 Temperatura da água

A temperatura da água é uma variável fundamental na equação usada para calcular a velocidade de propagação do som. Os *ADCPs* possuem sensores de temperatura embutidos, que medem a temperatura da água na face do transdutor.

Um erro de 5 °C na medição da temperatura da água a 20 °C causará um erro de aproximadamente 3% na descarga medida pelo *ADCP*. Temperaturas mais baixas resultam em erros maiores (MUELLER *et al.*, 2013).

² Os testes realizados variam de acordo com o fabricante. Os equipamentos da *Sontek*, por exemplo, não apresentam todos os itens listados.

Devido à importância da temperatura no cálculo da velocidade de propagação do som na água, a temperatura medida pelo ADCP deve ser comparada com uma medida independente da temperatura da água. O termômetro utilizado para comparação deve ter sua calibração documentada.

A medição deve ser realizada com o termômetro o mais próximo possível da face do transdutor. A temperatura medida pelo sensor do ADCP pode levar até 30 minutos para se estabilizar. Se uma diferença de temperatura de 2 °C ou mais permanecer ao longo desse período, o ADCP não deverá ser utilizado para a realização de medições de descarga.

O medidor acústico que apresentar problemas no registro de temperatura deve ser encaminhado para manutenção o mais breve possível. Medições de descarga líquida com temperatura corrigida manualmente possuem baixa confiabilidade e alto nível de incerteza; a correção de temperatura deve ser o último recurso para viabilizar a medição de descarga líquida, uma vez que as suas variações ao longo da seção não serão consideradas no cálculo de propagação da velocidade do som na água.

Caso seja detectado em campo, no momento da medição de descarga líquida, que o ADCP apresenta problemas no registro de temperatura, é indicado realizá-la com outro medidor ADCP ou molinete. Não havendo possibilidade de utilizar outro medidor, deve-se fazer a medição de descarga líquida com o ADCP, registrar as temperaturas medidas com termômetro independente e registrar nas observações e na ficha de medição que houve problema no sensor de temperatura e o valor da temperatura registrada pelo termômetro independente.

5.1.7 Salinidade

A salinidade do meio também exerce importante influência na velocidade de propagação do som na água. No Brasil, a resolução Conama nº 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e traz diretrizes ambientais para o seu enquadramento. No art. 2º daquele instrumento infralegal, define-se como:

- Água doce: aquela que possuir uma salinidade igual ou inferior a 0,5 partes por mil (‰);
- Água salobra: aquela que possuir uma salinidade entre 0,5 ‰ e 30 ‰; e
- Água salina: aquela que possuir uma salinidade acima de 30‰.

Uma mudança na salinidade de 0 a 5 ‰ a uma temperatura da água de 20 °C resultará em cerca de 1% de alteração na medição de descarga líquida (MUELLER *et al.*, 2013). Portanto, ao medir em águas em que se espera que a salinidade seja superior a 5 ‰, é recomendado avaliar a salinidade próxima à face do transdutor. Caso a salinidade varie com o tempo, podem ser tomadas mais medidas por travessia. Deve-se ter atenção, ainda, para a variação espacial e temporal da salinidade ao longo da medição (MUELLER *et al.*, 2013).

Cabe a cada entidade operadora, em conjunto com a responsável pela RHN, estabelecer e executar uma metodologia de mapeamento e acompanhamento de estações com condições favoráveis para ocorrência de salinidade acima de 5 ‰. Caso haja ao menos uma estação com condições favoráveis para ocorrência de salinidade acima de 5 ‰, deve ser estabelecida metodologia para medição da salinidade durante as medições de descarga líquida.

5.1.8 Calibração da bússola

A calibração da bússola é necessária para compensar a influência dos campos magnéticos específicos do local da medição. Se as distorções do campo magnético não forem corrigidas, erros de rumo podem ser gerados nos dados de direcionamento do *ADCP*.

A bússola do *ADCP* vem calibrada de fábrica, contudo, uma calibração nas mesmas condições de medição é exigida para remover qualquer interferência magnética local em toda medição de descarga líquida realizada com *ADCP*.

A calibração da bússola é imprescindível sempre que um receptor *GNSS* for utilizado como referência de navegação e/ou para realizar um teste de fundo móvel utilizando o método do *loop*.

Em geral, o procedimento consiste em um ou dois giros totais para que o equipamento se ajuste ao campo magnético local. Cada fabricante determina procedimentos específicos para calibração da bússola e os procedimentos devem ser sempre verificados e seguidos. A documentação específica para os equipamentos da *Sontek* e da *TRDI* é apresentada no documento complementar com tutoriais. Apesar das particularidades de cada equipamento, algumas orientações gerais devem ser observadas para obter calibrações de bússola bem-sucedidas:

- Minimizar a influência de materiais ferromagnéticos (e.g., ferro e outros atraídos por ímã) e a interferência de campos magnéticos (e.g., linhas de alta tensão) nas proximidades do *ADCP*, uma vez que podem afetar negativamente o desempenho da bússola magnética do equipamento;
- É desejável que o erro total da bússola não seja maior do que o indicado

para cada equipamento (1 grau para *Rio Grande* e *RiverRay* e 0,2 grau para o M9 da *Sontek*, equipado com bússola de terceira geração);

- Caso não haja indicação diferente pelo fabricante do equipamento, a rotação do equipamento deve ser feita com *pitch-roll* (inclinação e rolamento) semelhante ao movimento esperado da embarcação durante a medição de descarga líquida;
- Velocidades de rotação de até 5 graus por segundo (72 segundos a cada volta) conduzem a resultados melhores; e
- A calibração da bússola deve ser feita no local mais próximo possível da seção onde será realizada a medição de descarga, e em condição semelhante à da medição de descarga líquida.

No caso de medições de descarga líquida utilizando o equipamento instalado em sua prancha/*board* e acoplado a uma embarcação tripulada, para que as condições de calibração sejam as mais próximas possíveis das condições de medição, é importante que a embarcação seja rotacionada junto com o equipamento e, se possível, induzido *pitch-roll* esperado durante as travessias.

Convém destacar que qualquer alteração na disposição dos equipamentos, tanto durante a calibração da bússola quanto durante a medição, implica em alteração do campo magnético ao qual o *ADCP* está submetido. Por exemplo, se o equipamento montado em sua prancha foi calibrado junto a uma embarcação tripulada e durante a medição o equipamento se afasta ou é reposicionado na embarcação, o campo magnético atuante sobre o *ADCP* será diferente daquele em que foi realizada a calibração de sua bússola.

5.1.9 Teste de fundo móvel

Em algumas condições, o transporte de altas concentrações de sedimento de fundo pode acabar contaminando o espalhamento das ondas acústicas de tal modo que o rastreamento de fundo realizado na técnica do *bottom track* é interpretado como se estivesse ocorrendo um movimento no sentido oposto ao do transporte de sedimentos. Essa condição recebe o nome de “fundo móvel”.

Para esses casos, a vazão final computada pelo *ADCP* terá um viés negativo, pois será subtraída dos cálculos de velocidade da água uma componente irreal de deslocamento para montante (Figura 16).

Figura 16 – Esquema com trajeto real da embarcação e trajeto indicado pelo *bottom track* de uma travessia em seção com fundo móvel.



Fonte: Adaptado de Mueller e Wagner (2006).

As condições que propiciam a ocorrência de fundo móvel podem variar sensivelmente em função das características fisiográficas da bacia hidrográfica, do ciclo sazonal e das características de escoamento da bacia. Além disso, equipamentos diferentes ou com configurações de medição diferentes (por exemplo, frequência e tamanho da célula), medindo nas mesmas condições, podem detectar ou não a condição de fundo móvel. Dessa forma, mesmo que

uma determinada seção não apresente um histórico de ocorrência de fundo móvel, ele não é suficiente para garantir que não será detectado fundo móvel em medições futuras.

Também é importante salientar que a medição de descarga líquida com rastreamento *GNSS* está sujeita a problemas com a qualidade do seu sinal (multicaminho, aumento do *HDOP*, etc), que não estão no controle do operador do equipamento e que só serão identificados no pós-processamento, sendo essencial um teste de fundo móvel válido, sempre associado à medição de descarga líquida, de forma a garantir alternativas de boa qualidade para o pós-processamento.

Diante do apresentado, toda medição de descarga líquida com *ADCP* deve ter ao menos um teste de fundo móvel válido. É fortemente recomendado que o teste de fundo móvel seja realizado antes de iniciar as travessias para medição de descarga líquida. Caso o profissional não conheça a seção de medição, sugere-se realizar uma travessia exploratória para reconhecimento das condições da seção de medição antes de realizar o teste de fundo móvel.

Existem duas maneiras possíveis de se realizar um teste de fundo móvel: o método *Loope* e o método estacionário (com auxílio do *GNSS* ou sem *GNSS*) (HUANG, 2019). Todos os métodos descritos neste documento podem ser utilizados para avaliação da ocorrência de fundo móvel em uma determinada seção.

É fortemente recomendado que o método do *Loop*, descrito no item 5.1.10, seja utilizado sempre que as condições permitirem, sobretudo quando o resultado do teste de fundo móvel for utilizado para correção da vazão medida. Isso se justifica, pois esse método proporciona correções mais representativas

da vazão medida ao se comparar com os demais métodos, uma vez que realiza o rastreamento quase total da seção de medição.

A utilização do método estacionário para detecção do fundo móvel deve ser justificada no relatório de medição, devido a problemas na aplicação do método *Loop*. É necessário arquivar junto com a medição tanto o teste válido, quanto os testes inválidos para sustentar a justificativa de uso do método estacionário.

Nos casos em que os testes detectarem fundo móvel, é importante considerar que o rastreamento da embarcação seja obtido via *GNSS*, uma vez que a navegação e o trajeto por *GNSS* não sofrerão interferência da movimentação de sedimentos no leito. Nos casos em que for apontada a ocorrência de fundo móvel e os dados de *GNSS* se apresentarem inadequados, os resultados dos testes de fundo móvel podem ser utilizados para a correção dos dados de vazão obtidos, apesar de apresentarem menor precisão.

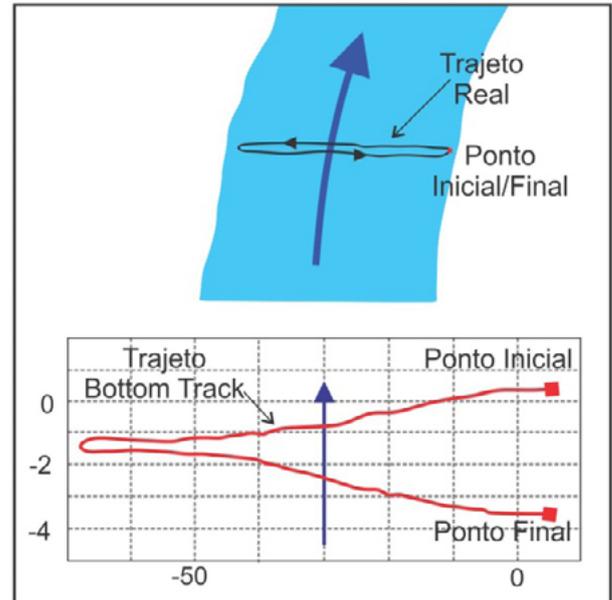
5.1.10 Método Loop

O método *Loop* tem como base o entendimento de que um *ADCP*, ao realizar uma travessia de ida e volta, saindo e retornando para um mesmo ponto, em uma seção transversal com fundo móvel, apresentará distorções, pois o fundo móvel faz com que a navegação por *bottom track* indique que o equipamento retornou para um ponto a montante do ponto inicial (Figura 17).

Nesse teste, a velocidade de fundo móvel é determinada a partir da distância em que o *ADCP* parece ter se movido para montante da posição inicial (erro de fechamento do *Loop*) e o tempo necessário para completar o *Loop*. Quando a velocidade de fundo móvel é maior que 0,012 m/s ou é igual ou maior do que

1% da velocidade média da água durante o trajeto, considera-se que existe fundo móvel (MUELLER *et al.*, 2013).

Figura 17 – Esquema com trajeto real da embarcação e trajeto indicado pelo *bottom track* durante a execução do *Loop*.



Fonte: Adaptado de Mueller e Wagner (2006).

O detalhamento da rotina LC utilizada pelo *WinRiver II* e *RiverSurveyor Live* para determinação da velocidade de fundo móvel pelo método *Loop* é apresentado no Apêndice A. Para realização do método *Loop* devem ser seguidos os seguintes passos:

- Calibrar adequadamente a bússola (ver item 5.1.8 para calibração da bússola de *ADCPs*);
- Estabelecer previamente o ponto de início e fim do *Loop*, com alguma forma de identificação visual (uma boia ancorada, por exemplo). Antes de sair e ao retornar, observar se a profundidade ao longo de todo o *Loop* permite a aquisição de verticais com pelo menos duas células de profundidade;
- Assegurar que o *ADCP* está na posição correta para iniciar o teste. Uma vez iniciado o teste, manter a velocidade do barco constante;

- 
- d. Planejar o *Loop* para que a manobra de mudança de direção na margem oposta seja suave e constante. Permanecer muito tempo próximo da margem não é indicado, pois pode minimizar o efeito do fundo móvel;
 - e. Manter a velocidade constante e suficientemente baixa para que o teste tenha duração mínima de 3 minutos e para rios de largura superior a 55 metros, velocidade da embarcação menor que 0,7 m/s (MUELLER; WAGNER, 2016). Quanto maior a duração do teste, menor será a influência dos erros de orientação da bússola no cálculo da velocidade de fundo móvel. Os testes *Loop* que não atendam a esses critérios podem apresentar erros de fechamento causados por erros de direção da bússola, e não necessariamente pela existência do fundo móvel;
 - f. Finalizar o *Loop* precisamente no ponto onde ele foi iniciado. Quanto maior o tempo de execução, melhor deve ser a precisão de retorno ao ponto inicial.

A acurácia do *Loop* pode não ser adequada quando a velocidade da água é menor do que 0,24 m/s e, nesse caso, o teste estacionário pode ser mais adequado (MUELLER; WAGNER, 2016).

Destaca-se que as recomendações apresentadas por (MUELLER; WAGNER, 2016), indicadas no item “e” supracitado, baseiam-se em condições que não correspondem à realidade da Bacia Amazônica, onde resultados do *Loop* têm se mostrado viáveis na região, mesmo não atendendo às recomendações de velocidade estabelecidas (MUELLER; EAST, 2018).

A experiência da atuação da ANA, SGB-CPRM e USGS na Bacia Amazônica

mostrou que os erros da bússola normalmente se apresentam bem menores do que 1 grau, devido a uma série de fatores: o baixo ângulo de mergulho do campo magnético da Terra, a baixa interferência do campo magnético nessa região, a baixa variação da direção da embarcação ao longo da seção e as características das embarcações regionais normalmente usadas nas medições, que são fabricadas de madeira (MUELLER; EAST, 2018).

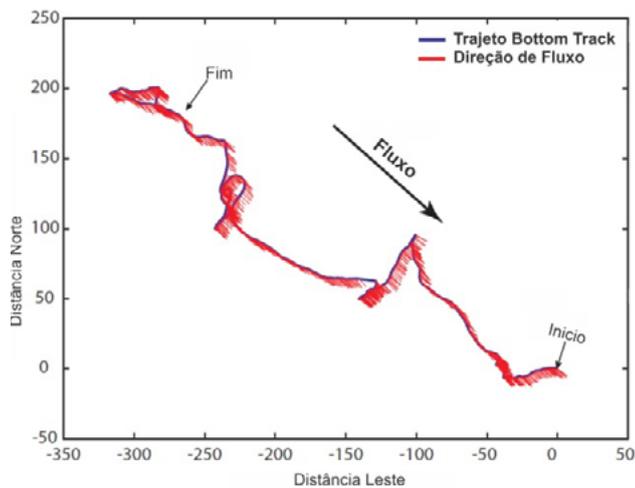
Sendo assim, apenas para rios da Bacia Amazônica, cuja dimensão entre margens e condições hidrológicas inviabilize a execução do *Loop* com velocidade inferior a 0,7 m/s, serão aceitos testes *Loop* com velocidade superior a 0,7 m/s.

O método adotado para realização do teste de *Loop* nos rios da Bacia Amazônica está descrito no Apêndice B.

5.1.11 Método estacionário

No caso da impossibilidade de realização do método *Loop*, que contempla toda a seção transversal a ser medida, é possível a realização do teste de fundo móvel utilizando-se o método estacionário. Nesse método, a embarcação permanece parada em um determinado local da seção enquanto coleta verticais. Caso o *bottom track* indique que a embarcação está se deslocando para montante durante a coleta das verticais, significa que o fundo móvel está sendo detectado naquele local (Figura 18).

Figura 18 – Esquema indicando trajeto do bottom track com fundo móvel, enquanto a embarcação permanece estática no mesmo local.



Fonte: Adaptado de Mueller (2016).

Nesse caso, será testada a existência de fundo móvel em pontos específicos da seção. O número de vezes que o teste deverá ser repetido ao longo da seção dependerá das condições do fluxo de água, dos equipamentos utilizados e, principalmente, se o resultado do teste será utilizado apenas para confirmar ou não a presença do fundo móvel, ou se será também utilizado na correção dos dados de vazão.

A realização dos testes estacionários deve ser iniciada no ponto da seção onde se prevê que haja o maior potencial para ocorrência de fundo móvel, o que normalmente depende do produto velocidade x profundidade. É fortemente recomendado realizar uma travessia exploratória prévia para a escolha da posição do teste. Se nessa vertical de maior probabilidade não for detectado fundo móvel, considera-se que não está presente em toda a seção.

Caso o profissional de campo com conhecimento prévio da seção perceba a necessidade de coletar mais verticais para determinar a condição de fundo móvel, deverá escolher a quantidade de verticais a serem testadas.

No caso de ocorrência de fundo móvel na primeira vertical, o teste deve ser realizado, no mínimo, em mais dois pontos distribuídos ao longo da seção para a obtenção de um comportamento médio. No caso de falha no rastreamento via GNSS ao longo das medições, o resultado desse teste poderá ser utilizado para correção da vazão final da medição de descarga líquida.

Tanto no *WinRiver II* quanto no *RiverSurveyor Live*, o teste de fundo móvel é executado utilizando a rotina *SMBA* (MUELLER, 2008). Outras técnicas de detecção de fundo móvel pelo método estacionário são descritas na literatura (MUELLER *et al.*, 2013), contudo, somente o teste com a rotina *SMBA* pode ser realizado utilizando os softwares de medição de descarga líquida da operação da RHN.

Nessa rotina, a velocidade média de fundo móvel é dada pela média do produto escalar entre velocidade do barco e velocidade da água das verticais adotadas no teste estacionário. Caso seja necessário corrigir a vazão final, a rotina *SMBA* utilizada nos programas *WinRiver II* e *RiverSurveyor Live* distribui a velocidade média de fundo móvel ao longo de todas as verticais da medição.

Destaca-se também que o método de correção distribuída de velocidades de fundo móvel utilizado no *SMBA* produz resultados de vazão melhores do que a correção simples pela vazão média de fundo móvel calculada em função da velocidade média da água e da área da seção (MUELLER, 2008).

Desse modo, só serão aceitos como testes estacionários válidos de detecção e eventual correção da vazão os que foram realizados utilizando a rotina *SMBA*. Mais detalhes sobre a metodologia dessa rotina são apresentados no Apêndice C.

O teste de fundo móvel estacionário pode ser executado das seguintes maneiras, sempre garantindo que a posição da embarcação não mude durante a execução do teste:

- Estabilizando a embarcação com o uso de cordas ou âncoras, por exemplo;
- Utilizando um receptor *GNSS* como referência, sem a fixação da embarcação; e
- Sem embarcação fixada e sem auxílio do *GNSS*.

Utiliza-se o método estacionário com posição fixa, quando é possível estabilizar o aparelho em um ponto que garanta que não haverá variações durante a execução do teste de fundo móvel, seja ancorando a embarcação ao fundo do rio, seja utilizando amarração de cordas a um ponto de apoio. Nesse caso, assegura-se que toda a movimentação no sentido de montante, apontada pelo *bottom track* durante a realização do teste, está associada à existência de fundo móvel.

No método estacionário com posição fixa, a duração requerida do teste é de 5 minutos (300 segundos). Quando a velocidade de fundo móvel for maior ou igual a 1% da velocidade média da água, será considerado que há fundo móvel na vertical.

No caso de impossibilidade de fixação do medidor fisicamente em um ponto específico, é possível a realização do teste de fundo móvel estacionário com auxílio do posicionamento dado por um receptor *GNSS* como referência de posição. As medições de vazões em grandes rios utilizados como hidrovias são exemplos de impossibilidade de fixação das embarcações.

Para realização desse teste, é necessário manter a embarcação, na qual o aparelho está acoplado, em posição estacionária, por exemplo, ligando o motor do barco em uma velocidade equivalente ao do fluxo, porém em direção contrária, enquanto o ADCP está coletando amostras usando o *bottom track*.

De igual modo, o teste estacionário utilizando o receptor *GNSS* deverá ter uma duração de pelo menos 5 minutos (300 segundos). Quando a velocidade de fundo móvel for maior ou igual a 1% da velocidade média da água, será considerado que há fundo móvel na vertical.

O método estacionário sem auxílio de *GNSS* e sem posição fixa da embarcação é equivalente ao método anterior, mas em situações que não há um *GNSS* disponível. Nesse caso, como no teste anterior, é necessário que a embarcação mantenha uma posição fixa, por meio da operação do motor, funcionando contra a corrente.

Nessas condições, não é possível garantir a manutenção do posicionamento da embarcação durante o teste de fundo móvel e, por esse motivo, ele deve ser configurado para ter duração de pelo menos 10 minutos (600 segundos). O fundo móvel é detectado quando a sua velocidade é maior ou igual a 2% da velocidade da água.

5.1.12 Condição e testes de fundo móvel

Para a realização do teste de fundo móvel, devem ser empregados equipamentos complementares adequados às condições locais observadas no momento de sua execução, como boias de marcação de referências, âncoras, motor com potência compatível com as velocidades requeridas, entre outros.

A hierarquia a seguir deve ser observada para a tomada de decisão a respeito dos referenciais de travessia primária e do uso de testes de fundo móvel para a correção da vazão final:

- Quando o resultado do teste indicar a ausência de fundo móvel, o *bottom track* é a referência de navegação primária preferencial para executar as travessias;
- Caso o resultado indique a presença de fundo móvel, o rastreamento do *GNSS* deve ser utilizado como referência primária de trajeto para executar as travessias;
- Quando os dados de *GNSS* não estiverem disponíveis, a próxima opção é utilizar o teste pelo método *Loop* para correção da vazão final de travessias realizadas com o *bottom track* como referência primária;
- Caso não seja possível executar um teste *Loop*, utiliza-se o teste estacionário *SMBA* com localização fixa;
- Na impossibilidade de fixar a embarcação, deve ser executado o teste de fundo móvel estacionário *SMBA* com uso de receptor *GNSS* como referência para manutenção do posicionamento; e
- O último recurso para viabilizar a medição é realizar o teste de fundo móvel

estacionário *SMBA* sem referência para manutenção de posição (sem *GNSS* e sem posição fixa) e utilizar o seu resultado para correção da vazão final.

A respeito da escolha da referência primária de trajeto, destaca-se que a *VTG* é uma alternativa válida para o cálculo da vazão em ambientes com existência de fundo móvel, no entanto, a medição de descarga pode ser imprecisa quando a velocidade do barco for inferior a 0,24 m/s (MUELLER; WAGNER, 2016).

Para que os resultados do teste estacionário *SMBA* (qualquer um deles) sejam utilizados para a correção da vazão, este deve ser realizado em várias verticais que sejam representativas do comportamento da seção como um todo.

O programa (ou a função do programa) adequado deve ser utilizado para auxiliar no cálculo dos testes de fundo móvel. Não são admitidos testes de fundo móvel calculados manualmente ou com o auxílio de planilhas e programas que não sejam os programas de processamento e pós-processamento de medições acústicas com *ADCP*.

Na Tabela 2, encontram-se resumidas as características e os requisitos dos testes de fundo móvel apresentados.

Tabela 2 - Especificações dos testes de fundo móvel

| Método de detecção de fundo móvel | Condições | Limiar de detecção | Duração mínima do teste |
|--|--|--|--|
| <i>Loop</i> | <ul style="list-style-type: none"> • Início e final exatamente na mesma posição; • Orientação precisa da bússola; • Velocidade média da água > 0,24 m/s; • Velocidade do barco constante. | Velocidade do fundo móvel > 0,012 m/s e > 1% da velocidade média da água | 3 min (180 s) |
| <i>Loop</i> em rios com largura superior a 55 metros | <ul style="list-style-type: none"> • Início e final exatamente na mesma posição; • Orientação precisa da bússola; • Velocidade média da água > 0,24 m/s; • Velocidade do barco menor que 0,7 m/s. | Velocidade do fundo móvel > 0,012 m/s e > 1% da velocidade média da água | Determinada pela velocidade do barco, que deve ser menor que 0,7 m/s |
| <i>Loop</i> em rios da Bacia Amazônica | <ul style="list-style-type: none"> • Início e final exatamente na mesma posição; • Orientação precisa da bússola; • Velocidade média da água > 0,24 m/s. | Velocidade do fundo móvel > 0,012 m/s e > 1% da velocidade média da água | Não há |
| Estacionário com GNSS ou embarcação fixa | ADCP com receptor GNSS ou embarcação ancorada/fixada com mínima movimentação. | Velocidade do fundo móvel > 1% da velocidade média da água | 5 min (300 s) |
| Estacionário sem GNSS ou embarcação fixa | Barco tripulado sem âncora ou GPS. | Velocidade do fundo móvel > 2% da velocidade média da água | 10 min (600 s) |

Fonte: Adaptado de Mueller *et al*, 2013.

5.2 Procedimentos durante a medição

Este item apresenta os requisitos que devem ser observados durante a etapa de medição de descarga líquida. É conveniente lembrar que essa medição é a segunda das três etapas do procedimento de campo, que envolve ainda os procedimentos anteriores (item 5.1) e posteriores (item 5.3) à sua realização. O primeiro critério que deve ser observado durante a execução das travessias é a recomendação de que a vazão medida durante uma travessia seja de pelo menos 50% da vazão total. Caso esse percentual não seja atingido, deve-se avaliar o motivo e a adequação do equipamento às condições de medição, além de documentar o fato. Os demais requisitos estão estruturados nos seguintes tópicos: estimativas de margens, medição com cota e vazão constante, medições em condições adversas e anotações de campo.

5.2.1 Estimativa de margens

Mesmo em boas seções de medição, em geral próximo das margens, não há profundidade suficiente para medir velocidade

des e, por esse motivo, a vazão é estimada. Os pontos de início/fim das travessias correspondem aos pontos onde serão coletadas as verticais (*pings*) para extrapolação da vazão das margens (ver subitem 3.5.2). Para determinar os pontos de início e fim da travessia na seção de medição, os seguintes critérios devem ser observados:

- Nos pontos de início e fim da travessia, a profundidade deve ser suficiente para que o ADCP construa uma vertical com pelo menos duas células válidas (considerar realizar uma travessia exploratória caso não conheça a seção);
- A vazão estimada em cada uma das margens não deve exceder 5% da vazão total da seção; e
- O local deve ser representativo do escoamento que de fato ocorre na margem do canal.

Uma vez determinados os pontos de início e fim, é necessário medir a distância deles até a margem. É fundamental que a distância entre o ponto inicial/final da travessia e a margem (denominada distância da margem) seja tomada com precisão adequa-

da para as dimensões do curso d'água que está sendo medido.

É imprescindível que a distância da margem seja medida por equipamento com precisão de pelo menos 2% da distância da margem. Desse modo, para uma distância da margem de 10 m, o instrumento utilizado deve ter precisão de pelo menos 0,2 m.

Recomenda-se que sejam adotados distanciômetros ou trenas a laser que atendam aos requisitos supracitados. É vedada a utilização de trenas, fita métricas ou cabos graduados suspensos pelas pontas em condições em que o cabo ou trena possa se curvar pela ação da força de seu próprio peso.

A definição e a sinalização dos pontos de início/fim da travessia, bem como a determinação da distância até a margem, devem ser realizadas antes de se iniciar o processo de medição de descarga líquida. Algumas alternativas de sinalização são possíveis e dependem do arranjo utilizado para realizar a medição de descarga líquida. Para mais informações, ver item 6.

Apesar de ser possível e, algumas vezes, necessário alterar o ponto de início e fim das travessias (por exemplo, se a cota estiver variando e, conseqüentemente, a distância até a margem) o ideal é manter os mesmos pontos para todas as travessias e registrar a alteração da distância das margens.

Para a extrapolação da vazão das margens, é necessário que o *ADCP* fique parado e sejam coletadas, pelo menos, 10 verticais válidas em cada travessia, tanto na margem inicial quanto na final.

Alguns tipos de medidores possuem configurações que permitem alterar a geometria utilizada para a extrapolação das margens (margem gradual ou parede vertical) e utilizam o perfil de velocidade e a pro-

fundidade média para estimar a vazão nas margens.

Em um canal com margem do tipo parede vertical, é recomendado que o ponto de início/fim da travessia esteja a uma distância maior ou igual à profundidade do canal. Essa medida garante que não haja interferências acústicas provenientes da colisão dos feixes com a parede.

A respeito da seleção do ponto de início/fim das travessias, um caso que merece atenção ocorre quando as margens possuem velocidade negativa (velocidade apontando para montante). Idealmente, deveria ser selecionada uma seção de medição que não apresente esse tipo de situação, porém, se essa condição for inevitável, alguns cuidados devem ser tomados e todas as decisões devem ser devidamente documentadas no formulário de medição.

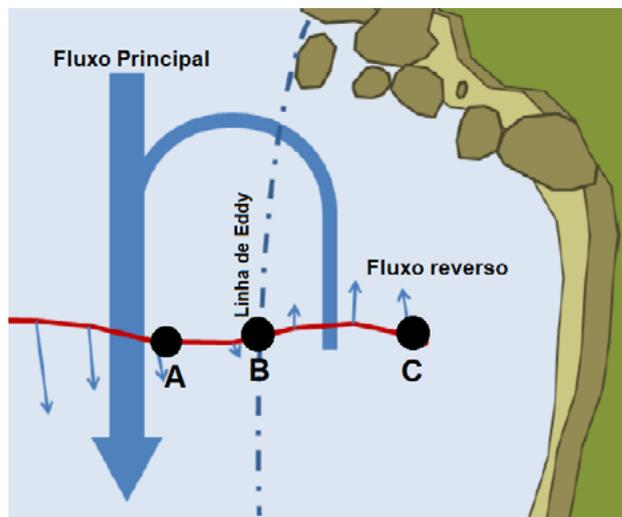
A Figura 19 mostra um trecho de uma seção de medição no qual a margem esquerda apresenta velocidades negativas. Os pontos A, B, e C são locais hipotéticos de início e fim de travessias que conduzirão a diferentes estimativas de vazão e, conseqüentemente, a um cálculo final de vazão diferente também.

No ponto A, os vetores de velocidade da água são positivos e, caso seja o ponto considerado para iniciar/finalizar travessias, a vazão da margem seria superestimada, implicando em superestimativa da vazão final. Já o ponto B, está em uma região com ocorrência de vórtices, onde a direção do fluxo não é bem definida. Nessa região, possivelmente, ocorrerão velocidades próximas de zero e com vetores com baixa correlação, que não são uma boa representação da velocidade que está efetivamente ocorrendo nas margens. Por fim, o ponto C está inserido na região onde as velocidades estão direcionadas para montante. No local, a velocidade negativa resultará em uma vazão estimada nas

margens também negativa. Nesse caso, a vazão negativa é a mais representativa da

condição que de fato está ocorrendo na seção.

Figura 19 - Margem esquerda de uma seção com fluxo reverso. A escolha de um dos pontos A, B e C, para iniciar/finalizar as travessias, possui implicações distintas na estimativa de vazão nas margens.



Fonte: Adaptado de MUELLER *et al.* (2013).

O exemplo ilustra a importância da realização de travessias exploratórias e da observação, pelo profissional de campo, das condições operacionais para coleta de verticais representativas da vazão nas margens. Em alguns casos, a coleta de verticais representativas nas margens pode não ser simples em função do excesso de vegetação no local ou quando o calado da embarcação limita a aproximação.

Quando as margens são tomadas por vegetação que impede o avanço do barco e a coleta de verticais em pontos representativos do escoamento que ocorre nas margens, deve-se priorizar a mudança do local de medição ou limpar a vegetação existente de modo a permitir o avanço da embarcação.

Algumas interfaces de equipamentos acústicos permitem, além das opções de margem gradual e retangular, a entrada manual de valores de vazão nas margens. Desse modo, a vazão nas margens pode ser medida, utilizando outro equipamento, e inserida manualmente na medição do ADCP. Essa opção pode ser particularmente interessante para a estimativa de vazões

em casos de extravasamento em planícies de inundação.

Convém destacar que, apesar da maioria dos equipamentos apresentarem a possibilidade de inserção manual de valores de vazão para margens, a utilização desses recursos aumenta as incertezas da medição de descarga líquida. Portanto, não corresponde ao padrão esperado nas medições de descarga líquida com ADCPs no âmbito da operação da RHN e deve ser utilizada como último recurso para viabilizar a medição de descarga líquida.

É conveniente lembrar que sempre deve ser priorizada a busca por seções de medição que reduzam a necessidade de extrapolações e que, dentro das condições apresentadas em campo, satisfaçam as recomendações apresentadas no item 5.1.1.

5.2.2 Definição de áreas extrapoladas de topo e de fundo

A área extrapolada no topo da área da seção de medição depende da distância dos transdutores do ADCP até o nível da água e, também, da distância associada ao tem-

po de recuperação do transdutor (ver subitem 3.5.3). Essas duas distâncias são denominadas, respectivamente, *draft* e *blank* (SIMPSON, 2001).

Para definir a profundidade de instalação do ADCP (*draft*), o profissional de campo deve levar em conta as profundidades mínima e máxima que ocorrerão durante a travessia e as possíveis influências e vieses que poderão advir de acordo com a posição do equipamento. Posicionar o equipamento mais próximo da superfície pode ser interessante para maximizar a coleta de verticais, no entanto, ondulações e turbulências podem emergir os transdutores e as linhas de corrente podem ser distorcidas pelo calado da embarcação.

Em relação à área extrapolada no fundo, como padrão, os equipamentos utilizados na operação da RHN descartam os últimos 10% das medidas realizadas, devido ao efeito *side-lobe* e, a menos que seja apresentada uma justificativa, essa configuração deve ser mantida.

5.2.3 Medições com cota e vazão constantes

Durante a medição de descarga líquida, o ADCP é levado de uma margem a outra do rio em um trajeto perpendicular às margens (seção de medição) e ao fluxo da água. Os *softwares* de visualização da medição permitem verificar o trajeto da embarcação no plano horizontal, conjuntamente com os vetores de velocidade da água, o que pode auxiliar na verificação da ortogonalidade da travessia em relação ao fluxo da água.

Antes de iniciar a realização de travessias, a opção de trajeto composto deve ser desabilitada. O trajeto composto é uma ferramenta disponível em alguns *softwares* de medição de descarga líquida que altera automaticamente a referência de trajeto do ADCP, caso a referência primária

escolhida para medição esteja inválida. A mudança realizada pela função do trajeto composto pode comprometer o julgamento do profissional de campo acerca da qualidade das verticais coletadas, uma vez que algumas são calculadas utilizando-se uma referência de trajeto diferente daquela que o profissional de campo originalmente selecionou como primária para medição de descarga líquida.

Uma medição de descarga líquida é composta por pares de travessias consecutivas em uma mesma seção de medição, com margem inicial alternada. A realização de pares de travessias com margens alternadas tem como objetivo minimizar a possibilidade de que o resultado da medição seja influenciado por viés direcional. Desse modo, o número mínimo aceitável é de duas travessias consecutivas com margem inicial alternada.

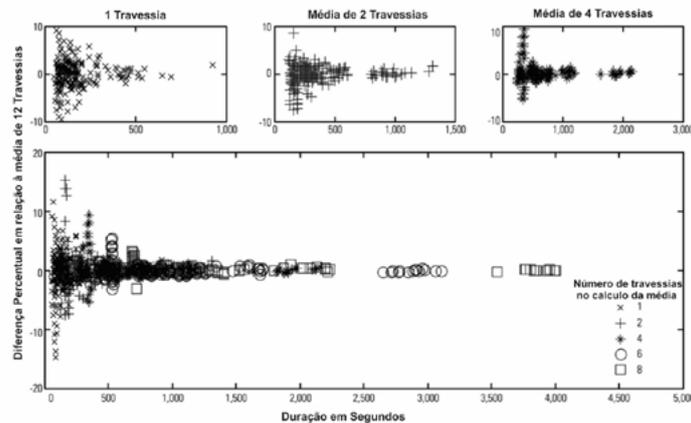
O tempo mínimo de duração de uma medição é de 12 minutos de travessias consecutivas, que corresponde ao tempo mínimo de exposição necessário para que as variações aleatórias sejam minimizadas (OBERG; MUELLER, 2007). O tempo mínimo refere-se ao tempo total de exposição do ADCP coletando amostras durante uma travessia e não inclui o tempo realizando outras tarefas, tais como testes de fundo móvel e calibração de bússola. Ainda que os *softwares* de medição registrem o tempo de medição incluindo o tempo de coleta de verticais para extrapolação de margens, destaca-se que o tempo coletando velocidades no ponto inicial/final da travessia para extrapolação da vazão nas margens também não deve ser considerado na duração da travessia.

A Figura 20 apresenta os valores de coeficiente de variação (razão entre o desvio padrão e a vazão média) para medições com diferentes quantidades de travessias, em função do tempo de exposição total da

medição, para diferentes seções de medição em cursos d'água de portes variados. Ainda na Figura 20, é possível observar que as diferenças ocasionadas por erros aleatórios diminuem em função do tempo de exposição do equipamento. Os erros ob-

servados em medições com pelo menos 12 minutos de duração (720 segundos) são satisfatoriamente pequenos, ou seja, devem ser feitos tantos pares de travessias quanto forem necessários para que se atinja o tempo mínimo de 12 minutos.

Figura 20 - Coeficiente de variação (eixo y) em função do tempo de duração da medição (eixo x) para diferentes medições de vazão.



Fonte: OBERG; MUELLER (2007).

Em um exemplo prático: se o tempo para realizar uma travessia é de 5 minutos, então, três travessias seriam suficientes para atender o critério de tempo mínimo. Porém, como é necessário que as medições sejam compostas por pares de travessias, ao menos mais uma deve ser realizada para se obter uma medição válida.

Durante a execução de uma travessia, é fundamental que a velocidade do barco seja a mais constante possível, evitando acelerações e desacelerações bruscas; variações abruptas na velocidade do barco podem não ser medidas corretamente pelo *ADCP* e, por sua vez, comprometer a determinação do trajeto, a área e a velocidade da água. Também, é desejável que a velocidade do barco seja menor que a velocidade da água.

Realizar travessias tão lentas quanto possível é especificamente importante quando um receptor *GNSS* é utilizado como referência de trajeto. Nesse caso, os erros de leitura da bússola aumentam

com o aumento da velocidade do barco, podendo comprometer a qualidade dos dados coletados com auxílio do receptor *GNSS* (MUELLER et al., 2013). As velocidades mínimas devem ainda ser compatíveis com a velocidade mínima de deslocamento recomendada para o receptor *GNSS* utilizado.

É importante considerar que referência de trajeto VTG pode ser imprecisa quando a velocidade do barco for inferior a 0,24 m/s (MUELLER; WAGNER, 2016).

As características dos receptores *GNSS* utilizados nos medidores da *Sontek* e da *TRDI* são tratados no documento complementar com tutoriais.

Para atender a esses critérios, é importante que o método utilizado para realizar travessias (barco com motor, barco com cabo, prancha /trimarã com roldanas, ponte, entre outros) seja adequado às condições de campo. Na Tabela 3, encontram-se resumidos os principais requisitos que devem ser cumpridos durante a medição de vazão para uma

medição válida. Medições que não atendam aos critérios estabelecidos devem

apresentar justificativas documentadas no relatório de medição de vazão.

Tabela 3 - Principais requisitos para obtenção de uma medição de vazão válida.

| Requisito | Critério |
|---|---|
| Percentual de vazão medida | No mínimo 50% da vazão total |
| Número de travessias | Sempre em pares (no mínimo, um par consecutivo de travessias) |
| Duração da medição | Mínimo de 720 segundos |
| Extrapolação de vazão em cada margem | No máximo 5% da vazão total |
| Número de verticais válidas na margem | Ao menos 10 verticais com pelo menos duas células válidas |
| Velocidade do barco durante a travessia | Constante, preferencialmente menor que a da água, realizando movimentos de aceleração e de desaceleração suaves |

Fonte: Elaborada pelos autores.

5.2.4 Medições em condições adversas

Durante a execução de medições de descarga líquida com *ADCP*, o profissional de campo deve sempre ter como objetivo a realização de medições dentro do padrão esperado para obtenção de uma medição válida. Contudo, em algumas circunstâncias a medição não pode ser realizada dentro das condições ideais. Este item compreende algumas das condições possíveis e apresenta orientações que devem ser observadas nesses casos, com o objetivo de adquirir o dado com a melhor qualidade possível dentro das condições apresentadas.

É conveniente destacar que caso as situações aqui descritas possam ser evitadas alterando o local da seção de medição, esta deve ser a primeira medida a ser considerada pelo profissional de campo antes de realizar uma medição de descarga líquida que não atenda plenamente aos requisitos de qualidade apresentados.

5.2.5 Medições com variação de

cota ou vazão

Realizar medições de descarga líquida em cotas altas é importante para diminuir a necessidade de extrapolações da curva-chave. Porém, em alguns rios, a duração do pico de cheia é muito rápida e podem ocorrer variações de cotas consideráveis entre uma travessia e outra. Em rios regulados por barramentos, o fechamento ou a abertura de comportas pode provocar variações rápidas no nível da água.

Ainda que não seja possível cumprir o requisito de tempo para medição, devem-se buscar, ao menos, pares consecutivos de travessias de modo a reduzir o viés direcional. Se essa abordagem não for viável, é possível utilizar travessias individuais como representantes de uma medição.

É importante, nessas condições, que se faça um registro detalhado das variações de cota no formulário de medição. Caso haja um registrador automático (por exemplo, estação telemétrica) acurado registrando as leituras da régua

linimétrica da estação, é desejável manter o relógio do *ADCP* sincronizado com o do registrador de nível.

A apresentação de medições de descarga com uma única travessia ou com combinações de travessias com tempo de exposição menor de 720 segundos deve, necessariamente, ter sua justificativa documentada no relatório de medição e armazenada junto com as medições. Fazer um registro detalhado (textos, fotos e até mesmo filmagens) das condições de fluxo, das limitações encontradas e das possíveis fontes de incerteza para medição é imprescindível para sustentar as justificativas apresentadas pelo profissional de campo.

5.2.6 Medições com velocidade da água muito baixa

Uma das condições mais complexas para realização de medições de descarga líquida com *ADCP* ocorre em fluxos com velocidade baixa. Nessa situação, erros aleatórios e falta de acurácia podem se tornar relevantes, se tiverem magnitude comparável com as velocidades medidas pelo *ADCP*.

As leituras do *ADCP* podem ser mais sensíveis à atuação de fatores externos, como o atrito do vento na superfície da água, os distúrbios causados pela embarcação utilizada para medição de descarga líquida ou por embarcações que estão transitando próximas à seção de medição.

Para reduzir o efeito de erros aleatórios, uma possibilidade é configurar o instrumento no modo de pulso coerente (opção disponível somente nos equipamentos da *TRDI*). Além disso, pode-se recorrer a sistemas de polias, barco com cabo ou outros arranjos que permitam manejar a embarcação e o *ADCP* com suavidade ao longo da seção de medição (ver item 6).

Ao utilizar prancha, permita que ela se alinhe e se acomode ao fluxo sem interferências externas. Evite fazer alterações na trajetória para ajustar o seu posicionamento. Não devem ser utilizadas amarrações para fixar o posicionamento da prancha, isto causará mais quebras nos padrões de escoamentos, que já são fracos em condições de velocidade baixa.

Teste diferentes posicionamentos das quilhas da prancha ou uma biruta (Figura 21) para ajudar a estabilizar a orientação da prancha. Realize mais travessias para garantir uma média representativa e, também, para permitir a identificação de tendências cíclicas do padrão de escoamento.

Uma possível aproximação para estimativa do erro aleatório associado à média pode ser obtida dividindo o desvio-padrão da medição pela raiz quadrada do número de travessias (BELL, 2001). O profissional de campo deve alterar a seção de medição ou o método de medição, caso a magnitude do erro aleatório tenha a mesma ordem de grandeza da variação observada entre as medições.

Figura 21 - Exemplo de arranjo de M9 no Hydroboard I utilizando uma biruta para auxiliar no alinhamento da prancha.



Fonte: Mueller *et al* (2013).

5.2.7 Medições com velocidade da água muito alta ou com turbulência

Realizar medições de descarga líquida com velocidade da água muito alta, antes de tudo, requer cuidado com a integridade física da equipe de campo. Pranchas amarradas, quando submersas, podem aumentar repentinamente o arrasto e colocar em risco a equipe e os equipamentos.

As condições encontradas em medições com velocidade alta podem levar ao limite as especificações dos equipamentos e dificultar, consideravelmente, a coleta de dados com qualidade.

Ondas e variações de *pitch/roll* muito fortes podem ocasionar a entrada de ar sob o ADCP e comprometer a aquisição de dados do equipamento, assim como podem mudar a área de influência hidrodinâmica, aumentando a incerteza. Da mesma forma, uma velocidade alta de deslocamento pode implicar em um *pitch* sistemático ao manter o equipamento constantemente inclinado em relação ao plano horizontal.

Em geral, as altas velocidades estão associadas a eventos de cheia que aumentam a descarga de sedimentos, ocasionam fundo móvel e podem carrear detritos de maiores proporções e elevar o número de verticais inválidas do *bottom track*.

Em condições turbulentas, a premissa de meio homogêneo da água que o ADCP assume pode não ser válida durante todo o tempo, no entanto, pode ser válida, em média, ao longo da seção transversal e resultar em medições acuradas (MUELLER *et al.*, 2013).

Desse modo, durante a coleta de dados, é necessária atenção para a ocorrência de verticais inválidas. Para minimizar a

perda de verticais, considere as seguintes alternativas:

- Alterar a seção de medição buscando um local com menor turbulência;
- Aumentar a área de *draft* (aumentando a profundidade de instalação do equipamento) de forma a diminuir a entrada de bolhas de ar embaixo do transdutor;
- Aumentar a área de extrapolação de topo e fundo para remover erros nas medidas tomadas por conta da turbulência, e que causam perda de verticais.

5.2.8 Medições com pouca profundidade

A principal questão envolvida em realizar medições em seções com pouca profundidade é que a área medida será limitada e, como consequência, os valores de referência para ajuste das extrapolações de perfil, em áreas não medidas, também serão limitados, podendo o percentual medido ser inferior a 50%. Nesse sentido, é importante buscar uma configuração que permita uma boa representação da área para aumentar o percentual de vazão medida.

Algumas condições são particularmente problemáticas, por exemplo, em uma seção de pouca profundidade com fundo muito rugoso. Nesse caso, as poucas células coletadas devido à profundidade pequena, podem não ser suficientes para ajustar as extrapolações de topo e fundo.

Convém destacar que a escolha de boas seções de medição e de instrumentação adequada é fundamental para uma coleta de dados com qualidade.

5.2.9 Medições em seções de medição profundas

Os equipamentos acústicos possuem limitações de profundidade que estão

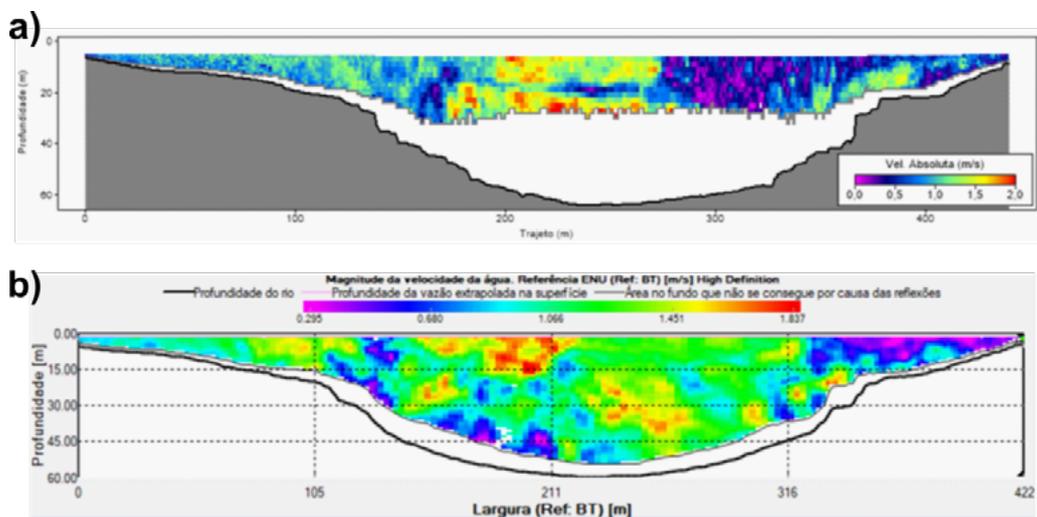
associadas à faixa de frequência em que trabalham (ver item 4). Além disso, a concentração de sedimentos e a velocidade do escoamento influenciam na dispersão da energia do sinal acústico e podem limitar as medições de descarga líquida em seções muito profundas.

Em geral, ADCPs de alta frequência apresentam limitações para coleta de dados de velocidade e/ou de profundidade em seções de medição com elevadas pro-

fundidades devido à atenuação do sinal acústico.

Um exemplo é apresentado na Figura 19, em que se observa que o ADCP operando com frequências de 1000/3000 MHz apresentou medições de velocidades limitadas a profundidades máximas entre 20 e 40 m. Para a mesma seção, um ADCP operando com frequência de 600kHz foi capaz de realizar as medições de velocidade e profundidade ao longo de toda a coluna de água (Figura 22).

Figura 22 – Medição no Rio Paraná (local: late Clube) em 14/07/2011. Gráfico de contorno de medição utilizando M9 de 1000/3000 kHz (a) e utilizando Rio Grande de 600 kHz (b).



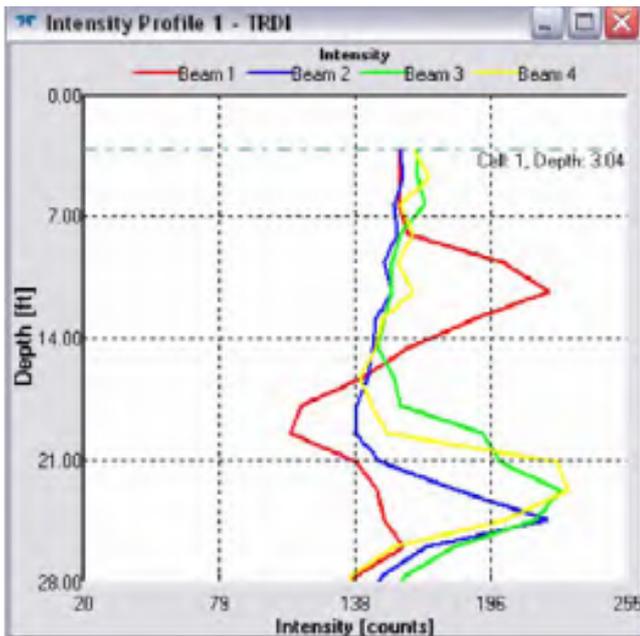
Fonte: elaborado pelos autores.

Nesse sentido, para as seções profundas, é recomendado que se escolha, previamente, o equipamento com base nos limites máximos e mínimos estabelecidos pelos fabricantes (Tabela 1), em comparação com as condições da seção de medição escolhida. Deve-se avaliar, ao longo de toda a travessia, a ocorrência de um comportamento similar ao apresentado na Figura 22a, o que indicaria a necessidade de mudança de medidor de vazão.

5.2.10 Canais com paredes verticais

Canais com paredes verticais apresentam a vantagem da geometria bem definida, simétrica, geralmente com um perfil de escoamento previsível. Porém, por conta da inclinação dos sensores, é preciso ter atenção ao se aproximar demais das paredes verticais, uma vez que o feixe pode ser refletido na parede do canal e contaminar a aquisição de dados (Figura 23).

Figura 23 – *Beam 1* está atingindo a parede e indicando profundidade em torno de 10 m, enquanto os demais feixes indicam profundidade de aproximadamente 25m.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Como regra prática, para evitar a reflexão do feixe na parede vertical dos canais, deve-se manter uma distância mínima da parede vertical igual à profundidade do canal.

5.2.11 Medições em leito muito rugoso, irregular ou com vegetação

Leitos irregulares e com alta rugosidade implicam em aumento na incerteza da extrapolação e são potencialmente propensos a verticais inválidas com *bottom track*, uma vez que o padrão de escoamento nessas condições pode ocasionar velocidades verticais e aumentar o erro de velocidade. A ocorrência de vegetação de fundo pode implicar em *bottom track* inválido e leituras incorretas.

A melhor solução nessas condições é buscar um local mais adequado para medição. Se for inevitável realizar a medição em uma seção de leito rugoso ou com presença de vegetação, deslocamentos lentos poderão ser interessantes para manter os dados coletados pelo *bottom track* válidos e um maior número

de travessias pode reduzir a incerteza da medição.

5.2.12 Vento

Em determinadas circunstâncias, o vento pode afetar o padrão de escoamento e o perfil de velocidades esperado em uma medição de descarga líquida. Esse efeito tende a ser mais pronunciado quando a velocidade de escoamento é baixa.

Coletar dados o mais próximo possível da superfície da água (sem desprezar a região em que a perturbação causada pelo próprio instrumento de medição é considerável) é importante para representação dos efeitos do vento no perfil de velocidade da água.

Anotações de campo detalhadas, indicando a direção e as variações de direção e, se possível, a velocidade do vento durante a medição de descarga líquida, são importantes. Essas informações são interessantes para a interpretação do efeito do vento no perfil de velocidades ao longo da seção de medição, especialmente para auxiliar na seleção dos métodos de extrapolação de topo.

5.2.13 Carga de sedimentos elevada

Em algumas condições, pode não ser possível realizar medições com determinado modelo de *ADCP*, por conta da alta concentração de sedimentos, visto que ela dificulta o acesso a maiores profundidades. Os *ADCPs* de baixa frequência são recomendados quando a concentração de sedimentos é alta, pois a dissipação de energia em medidores de baixa frequência é menor, permitindo que as ondas atinjam profundidades mais elevadas. O uso de um ecobatímetro e de um receptor *GNSS*, em equipamentos com essa possibilidade, pode



ajudar na obtenção de boas medições de descarga líquida nessas condições.

As altas concentrações de sedimentos, tipicamente, resultam em fundo móvel e o receptor *GNSS* pode ser utilizado como referência de trajeto. Quando a concentração de sedimentos é muito alta, o ecobatímetro de baixa frequência terá condições de detectar o fundo melhor do que o *bottom track*, possibilitando uma medição acurada, dentro das condições apresentadas.

5.2.14 Anotações de campo

Ainda que o processo de anotação esteja indicado na etapa de medição de descarga líquida, destaca-se que as anotações devem fazer parte de todo procedimento de medição. É importante que sejam feitos registros das condições de campo, explanando as justificativas para as decisões tomadas e as configurações utilizadas.

Especificamente durante a medição, deve-se ter atenção e registrar eventuais fatores que possam afetar a qualidade do dado que está sendo coletado, tais como:

- Arranjo utilizado para realizar a medição (medição de ponte, barco com motor etc.);
- Direção e sentido (e, se possível, a magnitude) da velocidade do vento;
- Anomalias no padrão de escoamento da água;
- Ondulações na superfície da água;
- Tráfego de embarcações;
- Variações no nível da água;
- Travessias descartadas (é desejável que se consiga identificar o motivo da travessia descartada);

- Problemas de comunicação com o *ADCP*.

Também é importante que seja registrado o tipo de controle hidráulico no momento da medição. Para o caso de controle de seção, é fundamental que seja realizado um registro detalhado de sua localização e condições (existências de obstruções, tipo de obstrução etc.), observando sempre se não estão mudando durante a medição.

Em uma seção de medição com controle de seção, as condições do controle são essenciais na determinação da relação cota/vazão. Caso sejam percebidas alterações nas condições do controle, além do registro detalhado, é fortemente recomendado realizar uma nova medição de descarga líquida.

É imprescindível que as medições de descarga líquida que, por quaisquer motivos, não cumpram todos os requisitos de uma medição válida, apresentem registros, de forma inequívoca e objetiva, das condições de campo, limitações do resultado da medição realizada e justificativa para as decisões tomadas durante a execução da medição.

Por fim, convém destacar que caso uma determinada estação apresente, sistematicamente, limitações para atender os requisitos mínimos de uma medição de descarga líquida válida, o local da estação deve ser reavaliado considerando os objetivos e diretrizes do monitoramento hidrológico definidos para a RHN, e ações devem ser tomadas para que o monitoramento atenda aos padrões esperados dentro da operação da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN).

5.3 Procedimentos após a medição

Após a realização da coleta de dados pelo *ADCP*, deve ser realizado o cálculo

da vazão e a avaliação da qualidade da medição obtida. A avaliação da vazão deve ser elaborada em campo, no local da medição, de modo a permitir a detecção de eventuais problemas ou falhas e sua correção, inclusive promovendo outras travessias ou uma nova medição. Essa etapa tem como propósito assegurar a garantia da qualidade das informações medidas em campo.

Os problemas identificados durante as medições permitem não só a redução das incertezas dos dados medidos, como o entendimento do comportamento hidrodinâmico do local, permitindo encontrar seções e adotar métodos que resultem em melhores resultados. A seguir, é apresentado um resumo das etapas necessárias para o cálculo e análise da medição de descarga líquida.

5.3.1 Identificação e configuração da medição

As informações de identificação da medição de descarga líquida são inseridas durante a etapa de configuração nos softwares (*RiverSurveyor Live* ou *Win-River II*). É importante, antes de finalizar a medição, confirmar no arquivo se as seguintes informações estão corretas: nome e código da estação fluviométrica, nome do curso d'água, local da seção de medição (distância em relação à seção de réguas linimétricas da estação fluviométrica), data, hora, cotas e nomes dos profissionais de campo que participaram da medição de descarga líquida.

5.3.2 Avaliação das informações de controle e garantia de qualidade (QA/QC)

As informações de qualidade e controle devem ser avaliadas para garantir que o equipamento está funcionando corretamente e que todos os procedimentos

necessários para uma medição de descarga líquida válida foram executados.

No momento, deve ser analisado se foram realizados o diagnóstico do equipamento, a calibração da bússola, o teste de fundo móvel e a medição independente da temperatura da água. Deve-se analisar, ainda, o funcionamento de periféricos, a qualidade da referência de trajeto das amostras de velocidade coletadas, o percentual de amostras coletadas e as vazões extrapoladas (topo, fundo) e estimadas nas margens.

As análises das medições de descarga líquida devem ser feitas utilizando o *software* de pós-processamento (por exemplo o *QRev*). A utilização de ferramentas para análise é requerida, uma vez que apresentam, de maneira sistemática e em um fluxo organizado, o grande volume de informações geradas durante a medição de descarga líquida. A transcrição para o português do manual técnico do *QRev* é apresentada no documento complementar com tutoriais. Uma vez que o *QRev* seja utilizado para análise das medições de descarga líquida, é necessário anotar no relatório de medição de descarga a incerteza da medição e os coeficientes de extrapolação adotados.

A impossibilidade de utilizar um *software* de pós-processamento para avaliação da medição deve ser justificada. Nesses casos, os seguintes itens devem ser analisados, necessariamente na ordem em que estão listados, pelo profissional de campo responsável pela medição de descarga líquida:

- Diagnóstico do equipamento;
- Calibração da bússola;
- Informações fornecidas pelo usuário;
- Teste de fundo móvel;
- Trajeto e velocidade do barco;



- Profundidade;
- Velocidade da água;
- Extrapolação do perfil de velocidades e estimativa de vazão nas margens; e
- Análise do conjunto de travessias.

A ordem foi definida de acordo com o nível de interdependência entre as informações coletadas pelo *ADCP* durante a medição de descarga líquida. As extrapolações dependem da velocidade da água, e seu cálculo depende dos dados de profundidade e de trajeto coletados. A seleção do trajeto está associada com a detecção ou não de fundo móvel e todos os dados coletados pelo *ADCP* dependem do bom funcionamento dos sensores, que é mostrado no diagnóstico do equipamento.

É conveniente destacar que o *WinRiver II* e o *RiverSurveyor Live* possuem critérios diferentes de filtros de qualidade das informações de medições. A maior parte das análises a seguir, ainda que permitam detectar erros grosseiros nas medições de descarga líquida, são majoritariamente qualitativas e baseadas na análise visual de gráficos apresentados nos *softwares* de medição. Desse modo, estão sujeitas a julgamentos subjetivos do profissional de campo. Reforça-se a importância do uso de um *software* de pós-processamento para realizar uma avaliação sistemática e embasada nos critérios e limiares quantitativos de qualidade apresentados no presente manual.

5.3.3 Diagnóstico do equipamento

As informações contidas no arquivo digital gerado pelo *software* de medição são de difícil interpretação e reforçam a necessidade do *software* de pós-processamento para apoiar a análise. Na falta, o profissional de campo deve verificar

se as mensagens geradas pelo *software* de medição de descarga líquida indicam que os testes discretos foram realizados com sucesso, no caso dos equipamentos da *Sontek*, ou se o *ADCP* passou em todos os testes (*PT - PASS*), no caso dos equipamentos da *TRDI*.

5.3.4 Verificação da calibração da bússola

Deve-se verificar se o erro da calibração da bússola é inferior ao máximo tolerável para o equipamento que está sendo utilizado. Caso seja maior, é necessário checar se o não atendimento desse critério está descrito nas notas de campo. A bússola bem calibrada é essencial nos casos em que sistema de posicionamento *GNSS* for utilizado como referência de navegação e quando for utilizado o teste *loop* para verificar a condição do fundo móvel.

5.3.5 Verificação da temperatura da água

Verificar se a diferença de temperatura média da água medida pelo equipamento está dentro do limite (2°Celsius) estabelecido por esse manual, quando comparada com a temperatura medida por um termômetro independente.

5.3.6 Verificação das informações fornecidas pelo usuário

Antes de realizar o cálculo da vazão, é importante verificar se os seguintes dados inseridos pelo profissional de campo estão corretos:

- Profundidade do transdutor (*draft*);
- Região filtrada (quando o equipamento solicitar);
- Salinidade (quando necessário);
- Tipos de margem;

- Distância da margem em cada travessia;
- Margem inicial (esquerda ou direita); e
- Declinação magnética.

Nessa etapa, são comuns erros de casa decimal ou de digitação, que devem ser corrigidos antes de prosseguir com a avaliação dos demais itens.

5.3.7 Avaliação do teste de fundo móvel

Nessa etapa de verificação, é importante garantir que haja ao menos um teste de fundo móvel válido. No caso de confirmação da existência de fundo móvel, deve-se ainda verificar se os dados de rastreamento GNSS estão válidos para serem utilizados como referência de deslocamento da embarcação. Caso contrário, é essencial uma verificação minuciosa da qualidade do teste de fundo móvel realizado, já que este poderá ser utilizado para a correção dos dados de vazão.

Os critérios de verificação do trajeto, da profundidade e da velocidade que devem ser analisados no teste *loop* são os mesmos que são utilizados na verificação das travessias das medições. Esses critérios serão desenvolvidos nas próximas três seções.

Para testes estacionários, é necessário verificar se o tempo mínimo de coleta de cada vertical foi respeitado, se o percentual de verticais inválidas não é superior a 5% e se não houve deslocamento da embarcação durante a execução de cada uma das verticais que compõem o teste estacionário.

É necessário destacar que o *WinRiver II* e o *RiverSurveyor Live* possuem critérios diferentes de filtros de qualidade das informações de medições e que a verificação manual da qualidade do teste de fundo móvel, sobretudo do teste

loop, é uma tarefa extremamente complexa, que envolve a avaliação das velocidades de deslocamento e da água medidas ao longo das verticais, a avaliação de desempenho de funcionamento do receptor GNSS e a avaliação da bússola, simultaneamente.

Em virtude dessas diferenças, os critérios específicos de avaliação de testes de fundo móvel com *WinRiver II* e com *RiverSurveyor Live* são explanados na documentação específica para operação destes equipamentos e estão dispostas no documento complementar com tutoriais.

A análise do trajeto deve iniciar-se com a referência escolhida para execução das travessias (referência primária). O *WinRiver II* dispõe de filtros para estabelecer a qualidade dos dados de trajeto coletados. Já o *RiverSurveyor Live* não apresenta nenhum tipo de filtro de qualidade. O procedimento específico para análise de trajeto e velocidade do barco para cada um dos equipamentos é tratado no documento complementar com tutoriais.

Quando a referência primária for o *bottom track*, deve ser analisado o gráfico da travessia no plano horizontal e a série temporal de velocidade do barco (Figura 24). O objetivo da análise é avaliar se houve problemas na condução da embarcação.

É possível comparar qualitativamente o trajeto da embarcação levantado pelo *bottom track* com o do receptor GNSS. Caso não haja fundo móvel, é esperado que os trajetos indicados pelo *bottom track* e pelo rastreamento GNSS sejam semelhantes ao longo da travessia. A série temporal de velocidade da embarcação deve mostrar um trajeto sem variações bruscas de velocidade e com velocidade média, preferencialmente, menor



que a velocidade da água. Na Figura 24, é mostrado o trajeto no plano horizontal e a série temporal de algumas variáveis de interesse para avaliação do trajeto da embarcação durante uma travessia.

No exemplo da Figura 24, observa-se que os trajetos do barco com as diferentes referências de navegação são consistentes entre si, quase paralelos ao eixo norte-sul. A componente de velocidade com maior magnitude é a norte (N). Não é esperado que haja componentes de velocidade vertical (componente *U*), e as componentes horizontais (*E* e *N*) devem ser coerentes com a orientação do trajeto. Deste modo, a série temporal de componentes é coerente com o sentido do trajeto do barco.

Na Figura 24, também, é mostrada a série temporal do código de referência de trajeto, que indica se a referência primária (neste caso, *bottom track*) foi utilizada durante todo o percurso. Caso haja alterações de referência, deve-se considerar alterar a referência primária.

A série temporal do erro magnético indica se a faixa da calibração é mantida durante toda a travessia, sendo necessária atenção para variações acima de 10%.

A série temporal de *pitch* e *roll* permite avaliar se, durante a travessia, os valores ficaram dentro do limite da calibração. No caso apresentado na Figura 24, é possível notar *roll* sistemático em torno de -2 graus. Isso pode ter ocorrido por problemas no posicionamento do *ADCP* na embarcação (no M9, esse tipo de problema, geralmente, está associado à amarração do *Hydroboard* na lateral da embarcação). Outra disfunção comum

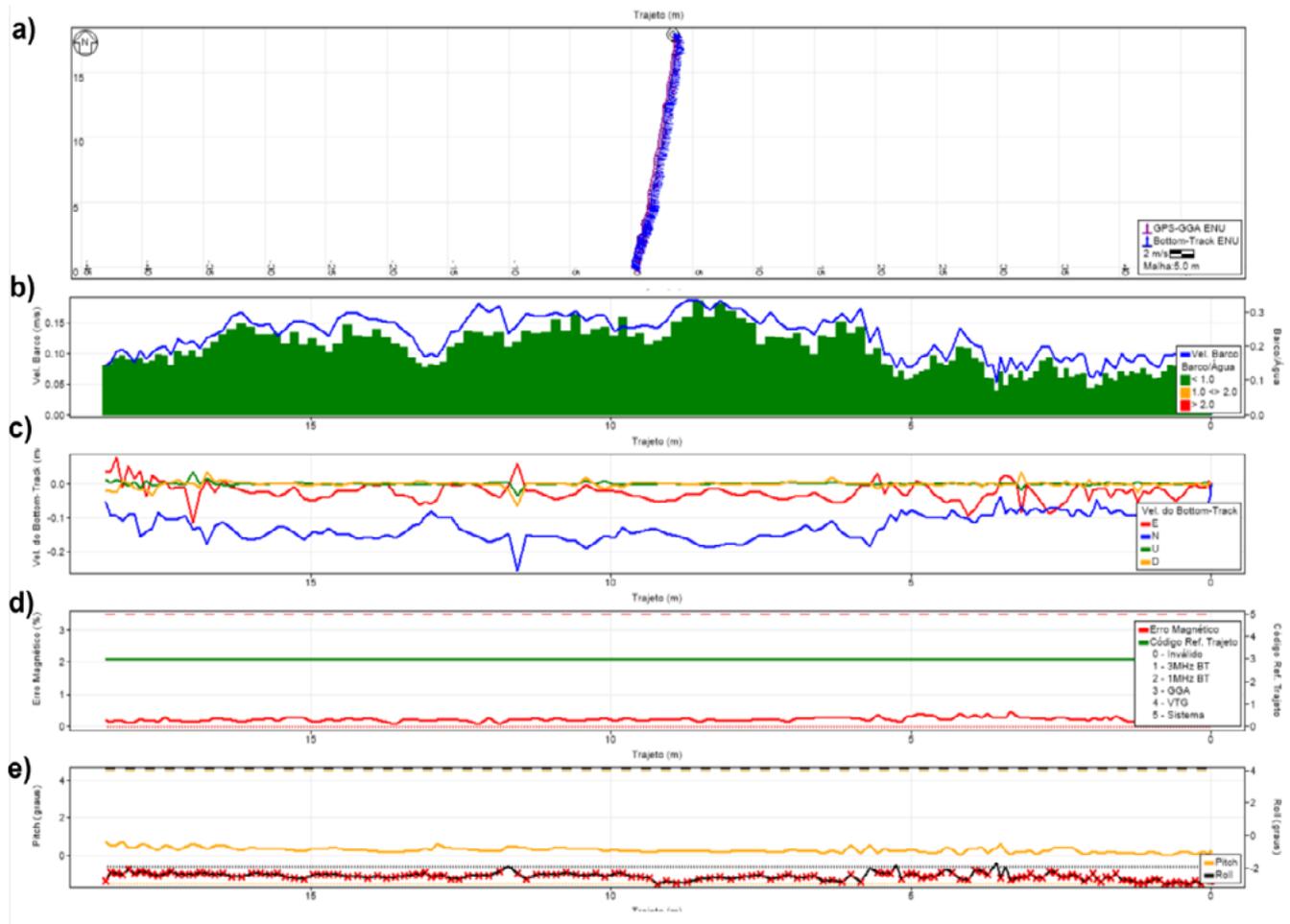
em medições de descarga líquida é o *pitch* sistemático, que ocorre quando a prancha ou *hydroboard* é amarrada pela ponta e a velocidade da água faz com que ela se incline. Sugestões de arranjos do *ADCP* no barco ou em pranchas, para minimizar ou evitar este tipo de problema, são mostrados no item 6.

Variações rápidas nas séries temporais de *pitch* e *roll* também podem indicar que o *ADCP* está medindo em um ambiente irregular, em condições turbulentas, ou que há movimento de pessoas ou equipamentos durante a medição de descarga líquida. Grandes variações de *pitch* e *roll* ao longo da medição de descarga líquida podem levar a uma perda do sinal acústico e resultar em várias verticais inválidas.

Quando o rastreamento *GNSS* é utilizado como referência de trajeto, não há a necessidade de avaliar a velocidade do *bottom track*, mas devem ser avaliadas as variáveis de interesse para o sinal do receptor *GNSS*:

- Qualidade do sinal (*GGA*) mínima de 2, indica que houve correção diferencial;
- Altitude com variação máxima de +/- 3 metros em relação à altitude média da travessia;
- *HDOP* igual ou inferior a 4 e o erro de bússola (verificar limites de acordo com o medidor) (MUELLER et al., 2013);
- Quando a sentença *VTG* for utilizada como referência primária, a velocidade do barco deve ser superior a 0,24 m/s (MUELLER; WAGNER, 2016).

Figura 24 - Trajeto da embarcação (a); série temporal de velocidade do barco e relação velocidade do barco e velocidade da água (b); velocidade de cada uma das componentes (c); erro magnético e código de referência de trajeto (d); e *pitch* e *roll* (f).



Fonte: Elaborada pelos autores.

As variáveis indicadas e os limiares aqui definidos seguem o padrão do filtro *GNSS* do *QRev*. Mais detalhes sobre os critérios apresentados estão na tradução do manual técnico do *QRev*, disposto no documento complementar com tutoriais.

Ao analisar as séries temporais das variáveis em questão, o profissional deve avaliar a quantidade de verticais que não atendem ao menos um dos requisitos de qualidade, buscando entender se há concentração de verticais com problema em locais específicos da travessia ou se está associado à condução da embarcação. Mais uma vez, destaca-se que a análise pode ser mais bem organizada utilizando um *software* de pós-processamento como apoio.

Caso os problemas detectados no trajeto estejam associados à condução da embarcação, deverão ser discutidos com o operador para correção. A movimentação irregular do barco cria aceleração horizontal do *ADCP*, a qual aumenta o ruído na medição da velocidade do barco e podem reduzir a qualidade da medição de velocidade da água. A causa mais comum de movimentação irregular do barco é devido à aceleração e à desaceleração do motor da embarcação.

5.3.8 Análise das medidas de profundidade

A profundidade da água pode ser determinada a partir da média das quatro profundidades medidas pelos quatro feixes inclinados ou da profundidade do feixe vertical.

Podem ocorrer “picos” nas profundidades medidas tanto pelos feixes inclinados quanto pelo feixe vertical. Esses picos podem diminuir a profundidade real, quando ocasionados pela passagem de peixes ou por detritos em algum lugar da coluna d’água ou podem aumentar a profundidade real, quando causados por multicaminho do pulso emitido pelo ADCP.

O *Winriver II* possui recursos para filtrar anomalias na profundidade, já o *RiverSurveyor Live* não. Para o caso do *RiverSurveyor*, a única opção é alterar a referência de profundidade (para mais informações sobre a determinação de profundidade do *RiverSurveyor Live* e do *WinRiver II*, verificar documentação no documento complementar com tutoriais).

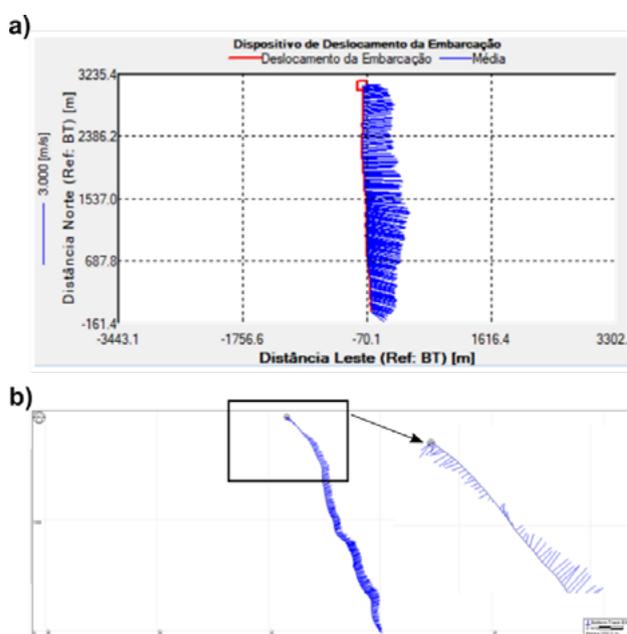
5.3.9 Análise das medidas de velocidade

As distribuições dos vetores de velocidade variam ao longo da seção transversal. Os *softwares* de medição de descarga líquida apresentam as velocidades de duas maneiras: no plano horizontal, junto com o trajeto da embarcação, e no plano vertical da seção transversal.

O objetivo da análise no plano horizontal é verificar qualitativamente se as direções e magnitudes da velocidade da água e da embarcação medidas pelo ADCP estão de acordo com as condições hidrológicas locais, atentando para a perpendicularidade das travessias em relação ao escoamento do canal. A presença de uma angulação sistemática ao longo de toda a seção indica que ela não é perpendicular ao fluxo, ocasionando problemas na determinação das componentes horizontais de velocidade e superestimativa da área da seção transversal.

Se forem identificados comportamentos fora do padrão, eles precisam ser investigados para determinar sua causa. Na Figura 25, é mostrada a distribuição de velocidades na seção de medição das estações Manacapuru e Três Irmãos. Para o caso da estação fluviométrica de Manacapuru (código 14100000), as velocidades são positivas ao longo de todo o trajeto; enquanto na estação Três Irmãos (código 58795000) ocorre remanso na margem esquerda, corretamente representado pelos vetores de velocidade no sentido oposto na região em destaque na Figura 25. Em ambos os casos, os vetores de velocidade representados graficamente estão de acordo com as condições hidrológicas observadas no local.

Figura 25 - Trajeto da embarcação na seção de medição da Estação 14100000 – Manacapuru (a) e trajeto da embarcação na seção de medição da Estação 58795000 – Três Irmãos (b). Em destaque, os vetores de velocidade negativos na margem esquerda do trajeto são coerentes.



Fonte: Elaborada pelos autores.

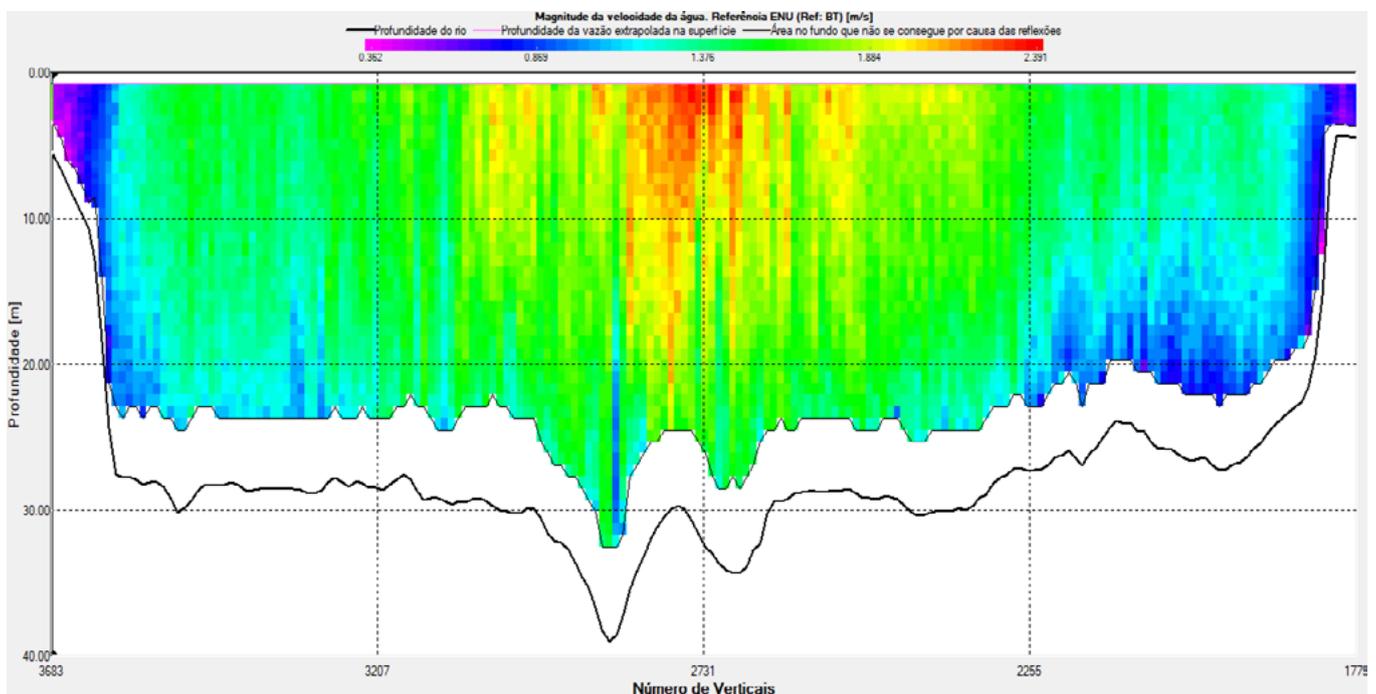
Outra informação que pode ser visualizada é a distribuição das velocidades no plano vertical ao longo da transversal. Geralmente, nas margens e no fundo, as velocidades são menores devido à rugosidade e às maiores velocidades si-

tuadas nas verticais próximas das linhas de talvegue do rio, conforme é mostrado na seção de medição da estação Manacapuru (Figura 26).

O *WinRiver II* dispõe de filtros com base no cálculo do erro de velocidade, na solução de três feixes e da velocidade vertical, e remove as verticais que não estejam dentro do critério de qualidade estabelecido (verificar documentação específica sobre o *WinRiver II* no documento complementar com tutoriais

para mais informações sobre os filtros de qualidade disponíveis). Uma boa medição possui no máximo 5% de verticais inválidas após a aplicação dos filtros. Também é importante que as verticais inválidas não estejam concentradas em um mesmo local da seção de medição, caso contrário, o cálculo da descarga líquida final pode ser sub ou superestimado. O *RiverSurveyor Live* não dispõe de filtros semelhantes para avaliação das velocidades medidas.

Figura 26 - Seção de medição de Manacapuru, com a distribuição de velocidades dentro do padrão esperado.



Fonte: Elaborada pelos autores.

5.3.10 Verificação dos métodos de extrapolação do perfil e de estimativa de vazão das margens

Os softwares *WinRiver II* e *RiverSurveyor Live*, até o momento, possuem severas limitações para auxiliar o usuário na avaliação do perfil de velocidades. Assim, para verificar se o método de extrapolação de fundo e de superfície está adequado, é necessário utilizar um software de análise da qualidade dos dados. Para a tarefa, recomenda-se fortemente o uso do programa *QRev*, que calcula um

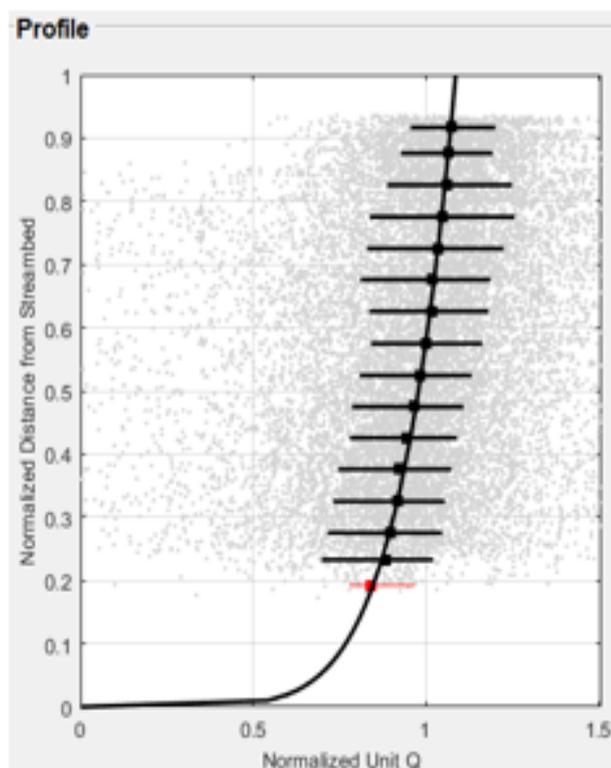
perfil médio ajustado aos dados observados na medição (Figura 27).

Caso seja verificada a necessidade de alterar o método para extrapolação do perfil, este deverá ser alterado e os novos coeficientes e métodos de extrapolação anotados no relatório de medição de descarga líquida. Se possível, também, identificar o motivo da mudança do perfil de escoamento. Velocidade do vento e irregularidades no fundo são as causas mais frequentes de não ajuste do perfil de velocidades à lei de potência.

Quanto à estimativa de margens, as principais ocorrências que devem ser observadas são as seguintes:

- Menos de 10 verticais válidas para extrapolação;
- Verticais inválidas devido à reduzida profundidade (verticais com uma ou nenhuma célula); e

- Operador inicia o movimento da embarcação antes de sinalizar no *software* para encerrar a coleta de verticais de margem e iniciar travessia. São coletadas verticais de margem com o barco iniciando movimento (problema semelhante, também, pode ocorrer na finalização da travessia).



| Discharge Sensitivity | | | |
|-----------------------|--------------|---------------|------------------|
| Top | Bottom | Exponent | % Difference |
| Power | Power | 0.1667 | -0.45 |
| Power | Power | 0.1508 | Reference |
| Constant | No Slip | 0.1667 | -0.22 |
| Constant | No Slip | 0.1053 | 1.04 |
| 3-Point | No Slip | 0.1667 | 0.12 |
| 3-Point | No Slip | 0.1053 | 1.37 |

Fonte: Elaborada pelos autores.

Caso as travessias utilizadas para medição de descarga líquida apresentem ao menos uma das ocorrências supracitadas, a medição estará fora dos padrões de qualidade exigidos na operação da RHN e deve ser refeita, ou apresentadas no relatório de medição de descarga líquida as justificativas para as ocorrências.

O tipo de margem encontrada na medição deve estar de acordo com a configurada. Caso seja diferente, o arquivo deverá ser reprocessado com o tipo de margem correta.

5.3.11 Análise do conjunto de travessias

Os *softwares* de medição apresentam na sua interface um resumo de medição que consiste em uma compilação dos dados básicos de cada travessia, da média e do coeficiente de variação. No resumo, é possível observar se a medição atendeu a alguns dos critérios estabelecidos neste manual e se há algum dado fora da média sem que haja uma interpretação plausível. As principais informações que devem ser observadas no resumo são:

- Se a medição é composta por pares de travessias recíprocos;

- Se o tempo de medição é superior a 720 segundos (12 minutos);
- Se a vazão, área, *DMG*, largura, velocidade média do barco, velocidade média da água, tempo de cada travessia e vazão nas margens têm coeficiente de variação máximo de 5% entre travessias;
- Se a vazão de cada margem tem sinal (positivo ou negativo) coerente entre travessias e não apresenta valores superiores a 5% na vazão total.

É importante observar que falhas nas marcações de início e fim da travessia geram travessias inconsistentes quanto à área e à largura. Medições de profundidades em fundos muito irregulares podem influenciar na área da seção transversal e, conseqüentemente, na precisão da descarga líquida.

5.3.12 Comparação da medição com a curva-chave

Após a análise da qualidade da medição e o cálculo da vazão final, o resultado deve ser comparado com a curva-chave da estação de monitoramento. Caso haja uma divergência entre a vazão da medição de descarga líquida e a calculada com curva-chave da estação de monitoramento, com valor superior ao limite pré-estabelecido nas diretrizes de monitoramento hidrológico da RHN (ANA; CPRM, 2017), deverá ser realizada ao menos mais uma medição de descarga líquida.

A nova medição de descarga líquida deve ser feita com outro medidor e, preferencialmente, em outra seção de medição. Caso não seja possível realizar a medição de descarga líquida com outro medidor, o equipamento deverá ser reiniciado para fazer a medição de descarga líquida em outra seção. Se a divergência permanecer, esta deve ser docu-

mentada nos relatórios de medição de descarga líquida com as justificativas sobre a impossibilidade de usar outro medidor.

Caso as novas medições de descarga líquida confirmem a mudança de tendência, o profissional de campo deve identificar, se possível, as condições que possam justificar o desvio da medição ou que indiquem mudança na relação cota-vazão da estação.

A relação cota-vazão das estações de monitoramento fluviométrico pode apresentar instabilidades que são naturais, por exemplo, leito muito arenoso que passa por regimes de erosão e sedimentação cíclica, controle de seção variável ou muito sensível a pequenas obstruções naturais (tais como galhos, folhas e deposição de sedimentos), barramentos construídos por animais, afluentes hidraulicamente sensíveis à variação de cota no canal principal a jusante, regime sazonal de enchente e vazante e efeito de maré. Ou, ainda, instabilidades causadas pela ação humana, como a construção de barramentos permanentes ou provisórios, operação de reservatórios e retificações do canal.

Tanto as alterações naturais quanto as antrópicas podem ser momentâneas ou permanentes. Independente da causa da alteração ou se é uma alteração efêmera ou perene, é fundamental que o profissional de campo confirme que a sua medição de descarga líquida está correta, e, também, busque entender e relatar detalhadamente, no relatório de medição, os motivos que ocasionaram a mudança relação cota-vazão. Caso as mudanças não possam ser completamente explicadas, um relato detalhado das condições de campo é o primeiro passo para entendimento dos processos hidrológicos que levaram à altera-

ção da relação cota-vazão capturada na medição de descarga líquida. Para que o profissional possa realizar um julgamento adequado, é primordial que esteja munido de curva-chave bem estabelecida, atualizada e com medições anteriores aderentes.

5.3.13 Cópia de segurança

O último passo a ser realizado no campo é a realização de cópia de segurança de todas as informações levantadas, as quais deverão ser encaminhadas ao escritório da entidade operadora o mais rápido possível. É requerido, a partir da publicação deste manual, que cada entidade operadora, em conjunto com a entidade responsável pela RHN, estabeleça e divulgue sua rotina de envio e recebimento de informações de campo, considerando que essa rotina deve garantir a disponibilidade tempestiva dos dados coletados em campo.

6 Boas práticas operacionais

Neste manual, define-se como “boas práticas operacionais” a aplicação dos procedimentos descritos neste documento, assim como a adoção das medidas para a conservação dos equipamentos e para a garantia da qualidade dos dados coletados, além da segurança da equipe de campo durante a medição de descarga líquida.

A conservação do equipamento envolve a guarda e o transporte, que devem ocorrer sempre dentro de sua maleta original de fábrica (*case*). Os equipamentos devem ser guardados limpos e sem umidade. Para um melhor desempenho dos conectores, recomenda-se o uso de graxa dielétrica após o término da campanha de medição, principalmente nos cabos de comunicação do *ADCP* com o computador.

Com relação à segurança dos técnicos em campo, é indispensável o uso de todos os EPIs, de acordo com as normas internas estabelecidas pelo setor de saúde e segurança ocupacional da empresa.

Caso a seção de medição esteja submetida ao mesmo controle hidráulico das réguas, uma régua de apoio provisória, na margem oposta, é útil quando não é possível verificar (ou não há um auxiliar para verificar) a cota da margem oposta à seção de réguas.

6.1 Arranjos para realização de medições acústicas com barco em movimento

Neste item são descritas algumas possibilidades de arranjos de equipamentos acústicos para a realização de medições com barco em movimento. O objetivo dessa descrição é apresentar algumas das possibilidades existentes, considerando as limitações e potencialidades de cada um dos possíveis arranjos. Nenhuma das técnicas apresentadas deve ser considerada prioritária ou preferível em relação às demais, sendo a escolha de um método o resultado do julgamento do profissional de campo a respeito das condições encontradas no momento de realizar a medição em uma determinada seção.

6.2 Medições sobre ponte

Consiste na operação do *ADCP* acoplado a uma prancha, que é controlada utilizando cordas ou cabos a partir de uma ponte. O método é interessante para a realização de medições em condição de cheia, pois preserva o operador do contato direto com a água para a realização das travessias.

Antes de qualquer outra recomendação, certifique-se de que a amarração do equipamento acústico é segura, para evitar que se solte ou que as cordas ou cabos utilizados arrebentem e o equipamento seja levado rio abaixo. Pranchas amarra-

das, quando submersas, podem aumentar repentinamente o arrasto e colocar em risco a equipe e os equipamentos. Algumas considerações a respeito desse método:

- O controle da velocidade e da trajetória da prancha, a delimitação da distância das margens e o *pitch* excessivo dela podem ser questionáveis de acordo com as condições da seção de medição (Figura 28);
- A presença de pilares que ocasionam vórtices na água, também, pode representar um problema para esse tipo de técnica;
- O profissional deve testar o posicionamento das quilhas que possibilite a condução mais precisa da prancha ao longo da seção;
- Marcações na ponte podem ser úteis na determinação de ponto inicial e final da medição de descarga líquida;
- O profissional deve acessar as margens para colocar ou retirar o equipamento da água. Excepcionalmente, em situações de impossibilidade de acesso pelas margens, o equipamento poderá ser movimentado verticalmente a partir da ponte, evitando movimentos bruscos e com cuidado para não haver impactos;
- A calibração da bússola deve ser realizada próximo da seção de medição, em uma das margens do rio.

Figura 28 - Medidor acústico com *pitch* excessivo causado pela amarração.



Fonte: [https://experimental-hydrology.net/wiki/index.php?title=Discharge_-_ADCP_\(SonTek_River-Surveyor\)](https://experimental-hydrology.net/wiki/index.php?title=Discharge_-_ADCP_(SonTek_River-Surveyor)).

6.2.1 Medições com prancha operada por sistema de polias fixadas nas margens

Na medição de descarga líquida utilizando prancha deslocada por sistema de polias, o equipamento acústico é acoplado na prancha e amarrado a um sistema de duas polias, uma em cada margem, sendo utilizadas para condu-

ção do equipamento ao longo da seção. Alternativamente ao sistema de polias, um auxiliar pode ficar na margem oposta fazendo parte da condução da prancha (Figura 29).

Antes de qualquer outra recomendação, certifique-se de que a amarração do equipamento acústico é suficiente para evitar que ele se solte ou que as cor-

das ou cabos utilizados arrebentem e o equipamento seja levado rio abaixo.

Caso a medição seja realizada com um auxiliar controlando a corda na margem oposta, é fundamental que haja boa comunicação entre os (as) envolvidos (as) para controle das velocidades e, principalmente, para determinação do momento de início e fim das travessias.

Algumas considerações gerais sobre a medição com prancha operada por sistema de polias são:

- Para velocidades intermediárias, o método permite bom controle da velocidade e da trajetória da prancha. As distâncias de início e fim das travessias podem ser marcadas no próprio cabo utilizado para deslocar o ADCP, conferindo boa precisão na delimitação dos posicionamentos de início e fim das travessias;
- É importante, sobretudo em rios mais largos, que se tenha atenção para que os cabos ou cordas estejam e se mantenham bem tensionadas durante toda a medição, garantindo o bom controle da prancha;
- Travessias finalizadas ou iniciadas fora do ponto demarcado para início e fim das travessias são um problema comum nesse tipo de técnica, ocasionado, principalmente, por falta de comunicação entre os operadores em margens opostas;

Figura 29 - Medição utilizando esquema de polias com M9 acoplado no *Hydroboard II*.



Fonte: Elaborada pelos autores.

- Será necessária ao menos uma corda com o dobro da largura do rio para aplicar esse arranjo;
- O sistema de roldanas pode ser fixado no solo ou, então, utilizando cintas para amarração em árvores;
- O profissional deve testar o posicionamento das quilhas que possibilite a condução mais precisa da prancha ao longo da seção;
- A velocidade muito alta da água pode causar *pitch* excessivo ao utilizar a prancha;
- A calibração da bússola deve ser realizada próximo da seção de medição, em uma das margens do rio.

6.2.2 Medições com embarcação presa a cabo guia

A medição de descarga líquida em embarcação presa em cabo é realizada quando as travessias são executadas

com auxílio de uma embarcação guiada por um cabo de extremidades presas nas margens. Duas alternativas são possíveis nesse arranjo: o *ADCP* pode ser fixado à embarcação utilizando um suporte adaptado, ou o *ADCP* em sua prancha (ou *hydroboard*) é amarrado na lateral da embarcação (Figura 30).

Essa técnica permite controle preciso da velocidade e do posicionamento da embarcação nos pontos de início e fim das travessias. É importante que se tenha atenção para que o cabo ou corda utilizado esteja bem fixado e se mantenha bem tensionado durante toda a medição, garantindo o bom controle da embarcação. É recomendado que as distâncias da margem sejam definidas e medidas antes do início das travessias.

A calibração da bússola pode não ser uma tarefa fácil. Será necessário que todo o conjunto formado pelo barco, *ADCP* e prancha seja rotacionado com o *ADCP* na posição em que ele estará durante a medição (mesmo utilizando o *ADCP* na prancha, não basta apenas rotacioná-la, é necessário girar todo o conjunto de embarcação, *ADCP* e prancha). Caso haja um motor no barco, ele não poderá ser utilizado para auxiliar na rotação, uma vez que a calibração da bússola deve ser feita em condições iguais às de medição de descarga líquida.

É importante ter segurança de que o arranjo realizado é adequado para medição de descarga líquida antes de calibrar a bússola: caso seja imperativo alterar a configuração do arranjo primário do conjunto (embarcação, prancha e *ADCP*), após a calibração inicial da bússola,

uma nova calibração do equipamento será necessária.

A presença de materiais que possam interferir no campo magnético e prejudicar o funcionamento da bússola deve ser minimizada. Especificamente o suporte de *ADCP* adaptado ao barco deve ser constituído de materiais que causem mínima interferência magnética, por exemplo, alumínio e materiais plásticos.

Certifique-se de que a prancha ou o suporte estejam bem fixados e que não vibrem ou façam pequenos deslocamentos sistemáticos devido a junções com folga ou amarrações frouxas.

Um aspecto comum aos métodos de embarcação (em especial as voadeiras) é que o número de tripulantes deve ser reduzido para evitar o bloqueio do sinal *GNSS*. Também, deve-se ter atenção se o uso de guarda-sol compromete a exposição do receptor *GNSS*.

Para o caso da prancha amarrada à embarcação, é comum que ocorram movimentos paralelos à ela, mas estes devem ser evitados. Um efeito prático do deslocamento é observado no teste de fundo móvel. Caso a prancha se mova paralelamente ao barco durante um teste de fundo móvel, poderá acusar problemas de deslocamento para jusante (teste inválido por diferenças na posição inicial e final), não detectar um fundo móvel existente ou indicar erroneamente a existência de fundo móvel.

Assim como nas outras configurações que utilizam prancha ou *hydroboard*, o profissional de campo deve ficar atento se a velocidade da água causará *pitch* excessivo.

Figura 30 - À esquerda medição com cabo atravessado utilizando M9 com *Hydroboard* II acoplado em embarcação tripulada. À direita, M9 acoplado em suporte customizado para embarcação.



Fonte: Elaborada pelos autores.

6.2.3 Medições com embarcação movida a motor

Neste arranjo, as travessias são realizadas com auxílio de uma embarcação movida a motor, sendo o *ADCP* fixado ao lado da embarcação. Duas alternativas são possíveis, as quais serão apresentadas abaixo.

O *ADCP* pode ser instalado em um suporte adaptado ou na sua própria prancha (ou *hydroboard*). Em ambas as configurações, o perfilador acústico encontra-se fixado na lateral da embarcação.

Destaca-se que a presença de materiais que possam interferir no campo magnético e prejudicar o funcionamento da bússola deve ser minimizada. Especificamente, o suporte de *ADCP* adaptado ao barco deve ser constituído de materiais que causem mínima interferência magnética, por exemplo, alumínio e materiais plásticos.

Além disso, alguns procedimentos ou cuidados operacionais devem ser levados em consideração, a saber:

- O condutor da embarcação não terá uma referência física da linha da seção de medição. É necessário que se estabeleçam referências visuais para manter a embarcação na seção de medição. A utilização de boias é uma boa alternativa para demarcar referências visuais e indicar os pontos de início e fim de travessias, bem como para realizar o teste de fundo móvel. O acompanhamento do deslocamento da embarcação, indicado pelo *software* de medição de descarga líquida, também é uma boa referência para avaliar se a trajetória percorrida é perpendicular ao fluxo da água;
- Toda a equipe envolvida na medição de descarga líquida deve ser informada sobre as referências utilizadas (naturais ou artificiais) para delimitação da seção transversal (início e fim);
- O estabelecimento de uma boa comunicação entre os membros da equipe de medição de descarga líquida é essencial para o bom desenvol-



vimento da atividade, minimizando a ocorrência de erros operacionais;

- Âncoras também podem ser úteis para a manutenção da posição horizontal durante a coleta de verticais nas margens ou para a realização do teste de fundo móvel estacionário;
- Para realizar a calibração da bússola é necessário que todo o conjunto formado pelo barco, *ADCP*, prancha e motor seja rotacionado. Mesmo utilizando o *ADCP* na prancha, não basta apenas rotacioná-los isoladamente, sendo necessário girar a embarcação toda;
- Destaca-se que após a realização do processo de calibração da bússola, a posição de instalação do *ADCP* na embarcação não pode ser alterada;
- O controle da velocidade da embarcação pode não ser uma tarefa fácil ao aplicar essa técnica, sendo necessário que a trajetória seja percorrida em velocidade constante e que a condução seja bem suave, de forma que não sejam observadas variações bruscas ao longo da travessia;
- Em condições operacionais nas quais a velocidade da água esteja muito alta, pode-se observar uma inclinação ou *pitch* excessivo ao utilizar a prancha amarrada ao lado do equipamento;
- Ao realizar deslocamentos que não sejam travessia, teste de fundo móvel, calibração de bússola, entre outros associados à medição de descarga líquida, os equipamentos devem ser dispostos em uma posição segura dentro da embarcação, preferencialmente dentro da maleta de armazenamento e transporte.

6.2.4 Medições em grandes rios

Normalmente, as medições de descarga líquida em grandes rios são feitas em barcos tripulados de grandes dimensões que conferem estabilidade ao equipamento, considerando as grandes distâncias a serem percorridas ou as altas velocidades de escoamento (Figura 31). Nessa condição, a bússola sofre a interferência magnética dos componentes da embarcação, como o motor central e os geradores de energia. Portanto, é imprescindível que a calibração da bússola seja realizada com o equipamento instalado na embarcação, de forma que o ciclo de calibração seja realizado com a influência de todos os equipamentos do barco.

A instalação do *ADCP* deve ser feita na lateral do barco, a uma distância central entre a proa e a popa, pois é o ponto mais estável da embarcação, onde ela sofre menor influência do *pitch* e *roll*. Também, é importante que o transdutor esteja em uma profundidade que não sofra influência hidrodinâmica do casco do barco. Nos casos em que não é possível eliminar a influência dele, recomenda-se, quando o equipamento permitir, aumentar a região filtrada de topo da medição de descarga líquida.

Como os motores das grandes embarcações são potentes, pode não ser possível manter a velocidade de deslocamento menor do que a velocidade da água. Neste caso, recomenda-se que o deslocamento seja realizado com a velocidade constante.

A antena do receptor *GNSS* deve ser instalada na parte superior do barco, onde terá uma maior exposição aos satélites disponíveis na órbita. O receptor deve ser instalado alinhado com o transdutor, de forma que o dado coletado represente a mesma vertical coletada. Nos

casos em que não for possível o arranjo recomendado do GPS, as distâncias X e Y de instalação do equipamento com relação ao transdutor devem ser inseridas no *software*, antes de realizar a medição de descarga líquida.

É extremamente importante que um tripulante fique responsável pela segurança do equipamento durante toda a medição, evitando que algum

material suspenso possa se chocar com o *ADCP*. O estabelecimento de uma boa comunicação entre os membros da equipe de medição de descarga líquida, especialmente, entre o operador da medição e o piloto da embarcação, é essencial para o bom desenvolvimento da atividade, minimizando a ocorrência de erros operacionais.

Figura 31 - Embarcação utilizada para medição de vazão em grandes rios.



Fonte: Alves (2018).

7 Controle de qualidade e manutenção

A qualidade de uma medição de descarga líquida realizada com um equipamento acústico está associada ao adequado funcionamento da instrumentação do *ADCP*, *software* e *hardware* utilizados. Deste modo, os procedimentos indicados nesta seção são, fundamentalmente, um guia para auxiliar na identificação de irregularidades no comportamento do *ADCP*, que podem ter implicações na qualidade da medição de descarga líquida.

Deve ser mantido um histórico de cada um dos *ADCPs* utilizados, contendo, minimamente:

- As atualizações de *firmware*;
- Manutenções preventivas e corretivas;
- Ocorrências de eventos (tais como quedas, acidentes, problemas em campo) e testes realizados.

Na Tabela 4, são resumidos as situações e os testes que devem ser realizados para controle de qualidade dos medidores acústicos e que serão explanados nos itens seguintes. A documentação e os arquivos gerados durante a realização dos testes devem ser armazenados permanentemente e indicados no histórico do equipamento.

Tabela 4 - Resumo dos testes do ADCP e situações em que são aplicados.

| Situação | Teste de controle de qualidade | | | |
|--|--------------------------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | Testes de sistema | Alinhamento dos feixes | Checagem da matriz de transformação | Comparação de medições |
| Equipamento novo | Necessário | Desejável | Necessário | Necessário |
| Antes e depois da campanha de medição de descarga líquida | Necessário | | | |
| Reparo/manutenção ou atualização de <i>hardware</i> do transdutor | Necessário | Desejável | Necessário | Necessário |
| Reparo/manutenção ou atualização de <i>hardware</i> fora do transdutor | Necessário | | Necessário | Necessário |
| Atualização de <i>firmware</i> | Necessário | | Necessário | |
| Ao menos uma vez a cada 3 anos | | | | Necessário (Desejável a cada ano) |

7.1 Testes de sistema

O manual dos equipamentos da *Sontek* descreve o teste de sistema de seus medidores M9 e S5 como uma forma de verificar se todos os componentes de *hardware* estão funcionando. No teste é verificado o funcionamento da bússola, sensor de temperatura, cartão de memória e tensão da bateria.

Nos equipamentos da *TRDI* são executados testes de memória RAM e ROM, de comunicação, de bússola e retorna resultados relacionados ao funcionamento dos transdutores do *ADCP*.

Cada fabricante possui procedimentos específicos para realização dos testes em cada um dos equipamentos, bem como orientações para interpretação dos resultados quando necessário. Independente do equipamento utilizado, estabelece-se como regra que os testes de sistemas deverão ser realizados:

a. Em campo, antes de realizar uma medição de vazão;

- b. Antes de iniciar uma campanha de medição de vazão;
- c. Ao final de uma campanha de medição de vazão;
- d. Em equipamentos novos, assim que recebidos;
- e. Em equipamentos que retornaram da manutenção, assim que recebidos; e
- f. Após a atualização de *firmware*.

O teste do item (a) está previsto nos procedimentos anteriores à medição de vazão (item 5.1). Nesse caso, o teste de sistema é armazenado junto com a medição de descarga líquida correspondente. O teste de sistema antes de realizar uma medição de vazão deve ser executado conforme descrito no item 5.1.4.

Nos demais casos (itens b até f), os testes de sistema não necessariamente possuem uma medição de descarga líquida associada e devem ser armazenados junto com o histórico do equipamento. É fortemente recomendado que

sejam realizados na água com profundidade suficiente para a formação de verticais, com pelo menos duas células de profundidade.

Na impossibilidade de realizar o teste completo, ele deve ser efetuado dentro das condições existentes. Reforça-se que a limitação na realização dos testes de sistema pode implicar na falta de verificação de problemas que só serão expostos quando for feito um teste de sistema completo, provavelmente ao utilizar o equipamento para realização de uma medição de descarga líquida em campo.

7.2 Testes de alinhamento dos feixes

O teste de alinhamento dos feixes tem como objetivo verificar se todos os feixes do *ADCP* estão dentro do alinhamento esperado.

De modo geral, o teste de alinhamento dos feixes tem como objetivo verificar se o trajeto corrigido indicado pelo *bottom track (DMG)*, considerando diferentes alinhamentos dos transdutores em relação ao eixo do caminho percorrido, é coerente com o trajeto efetivamente realizado pelo *ADCP*. O teste pode ser realizado em campo ou em laboratório, e para o caso do teste de campo, é exigida instrumentação de precisão adequada para aferição do trajeto real e equipe experiente para conduzi-lo.

De acordo com a versão vigente do documento A3-22 de métodos e técnicas para águas superficiais do *USGS*, esse teste é requerido em equipamentos recém-adquiridos (novos) ou quando o equipamento retorna da manutenção. Atualmente, não é aplicado nos equipamentos *StreamPro* e para o feixe de 3 MHz do M9.

Deve ser solicitada, ao fornecedor, a apresentação do teste validado de alinhamento dos feixes para o equipamento adquirido. No caso de equipamentos enviados à manutenção, também é orientado que a empresa prestadora do serviço apresente o teste de alinhamento dos feixes do equipamento reparado.

No âmbito da operação da Rede Hidrometeorológica Nacional, é desejável que o teste de alinhamento dos feixes seja realizado em equipamentos novos e após o retorno da manutenção. O resultado deve ser registrado no histórico do equipamento, e arquivado juntamente com a documentação original (relatórios, arquivos gerados pelo *ADCP* durante o teste). O procedimento para realização de testes de alinhamento em campo encontra-se em elaboração e será publicado no documento complementar com tutoriais.

7.3 Checagem da matriz de transformação

Este teste tem como objetivo verificar se a matriz de transformação das velocidades medidas pelos feixes em velocidades ortogonais está correta. Ele deve ser aplicado quando ocorrem mudanças no equipamento que não impliquem em alterações na configuração física dos feixes, por exemplo, quando são realizadas atualizações de *firmware*. Também, é requerida a checagem da matriz dos equipamentos novos, bem como dos equipamentos que retornam da manutenção.

O acesso à matriz de transformação é diferente para cada tipo de equipamento e pode ser feita com auxílio do programa *RSMatrix* do *USGS*. Um tutorial específico para cada um dos equipamentos utilizados, bem como as orientações para interpretação dos resultados, estão disponíveis no FTP de documentações

da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

7.4 Comparação das medições

Comparar medições de descarga líquida é uma maneira de avaliar as condições de funcionamento de um determinado equipamento. Isso pode ser feito comparando a medição realizada com o equipamento que está sendo avaliado a outra medida independente.

A comparação dos resultados de medições de descarga líquida deve ser feita entre medições realizadas simultaneamente: um resultado mais consistente pode ser obtido com equipamentos diferentes, em locais em que a relação cota-vazão é bem estabelecida. Essa comparação pode ser realizada utilizando medidores convencionais de corrente (molinete) ou outro equipamento acústico, desde que resguardadas as características e limitações de cada um dos equipamentos e das seções de medição.

Para efeito de comparação entre medições realizadas simultaneamente, são aceitáveis diferenças de até 5% entre os valores medidos. É requerido que sejam realizadas várias medidas consecutivas, em condições que permitam explorar os diferentes modos de operação de cada um dos equipamentos e que forneçam resultados com significância estatística. Destaca-se que, mesmo dentro do limite de 5%, caso seja verificada a ocorrência de um viés sistemático na vazão final, o equipamento que o apresentou deve ser reportado e analisado.

É requerido que, no mínimo a cada três anos, os equipamentos passem por um procedimento de comparação entre medições de descarga líquida. Cabe a cada entidade operadora, de acordo com suas particularidades, estabelecer metodologia para comparação entre

medições. A metodologia utilizada deve ser documentada de forma clara, embasada na literatura e deve representar fielmente a prática realizada em campo. O resultado das comparações deve ser arquivado em formato de relatório, contendo a metodologia, resultados, memorial de cálculo e arquivos originais das medições de campo.

7.5 Disposições finais

Neste documento, foram apresentados os critérios de qualidade mínimos exigidos para as medições de descarga líquida com ADCPs acoplados a embarcações em movimento, no âmbito da operação da Rede Hidrometeorológica Nacional.

A partir da data de publicação deste manual, caberá aos escritórios regionais das operadoras, além de orientar as rotinas de medição de descarga líquida para atendimento dos critérios de qualidade, encaminhar os seguintes itens:

- Definição de estações com potencial condição de salinidade;
- Definição de metodologia para determinação de salinidade;
- Estabelecimento de metodologia para comparação entre medições;
- Estabelecimento de rotina de envio e recebimento de informações de campo, considerando que essa deve garantir a disponibilidade tempestiva dos dados coletados, nesse caso, dos dados de medição de descarga líquida; e
- Estabelecimento de rotina de avaliação de equipamentos acústicos de acordo com o requisitado no item 7 deste documento, contemplando, inclusive, a rotina de documentação das avaliações realizadas.

Um resumo dos principais critérios de qualidade e orientações elencados neste documento é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo dos principais critérios de qualidade de medições acústicas. Fonte: Elaborada pelos autores.

| Resumo de critérios de qualidade requeridos em medições acústicas com barco em movimento | | |
|---|-------------------------------------|---|
| Controle de qualidade e manutenção | Teste de sistema | Antes de sair para campanha de medição |
| | | Imediatamente ao retornar da campanha de medição |
| | | Em equipamentos novos ou retornados da manutenção |
| | | Após atualização de <i>firmware</i> |
| | Teste de alinhamento dos feixes | Em equipamentos novos ou retornados da manutenção |
| | Checagem da matriz de transformação | Em equipamentos novos ou retornados da manutenção |
| | | Após atualização de <i>firmware</i> |
| | Comparação entre medições | Em equipamentos novos ou retornados da manutenção |
| Após atualização de <i>firmware</i> | | |
| Ao menos uma vez a cada 3 anos | | |
| Local da seção de medição | Condição do trecho | Retilíneo |
| | Fluxo | Sem turbulência, com linhas de corrente paralelas |
| | Geometria da seção | Simétrica, geometria bem definida |
| | Leito | Uniforme, sem vegetação ou detritos soltos |
| | Velocidade mínima | 0,09 m/s |
| | Influência magnética | Longe de estruturas de metais e materiais ferromagnéticos |
| | Para uso de GPS | Evitar locais onde possa ocorrer o efeito do multicaminho |
| | Cota | Registrar cota |
| Relógio do <i>ADCP</i> | | Sincronizado com hora de Brasília (GMT-3) |
| Teste de diagnóstico | | Antes da medição, próximo à seção de medição |
| Temperatura da água registrada com <i>ADCP</i> | | No máximo 2 °C de diferença para medida independente |
| Salinidade | | Máximo de 5 ‰ para que não sejam necessárias correções na vazão |



| Resumo de critérios de qualidade requeridos em medições acústicas com barco em movimento | | |
|--|---|--|
| Calibração da bússola | Geral | Ao menos uma calibração válida |
| | Influência magnética | Longe de estruturas de metais e materiais ferromagnéticos |
| | Pitch-Roll | Igual ao esperado durante a medição |
| | Velocidade de rotação | 5 graus por segundo |
| | Local de calibração | Próximo da seção de medição |
| Longe de estruturas de metais e materiais ferromagnéticos | | |
| ADCP instalado da forma como será utilizado para realizar medição | | |
| Extrapolações de topo e fundo | Topo | Verificar influência da embarcação e recomendação de região filtrada pelo fabricante |
| | Fundo | 10% da profundidade (ou recomendado pelo fabricante) |
| Teste de fundo móvel | Geral | Ao menos um teste válido por medição |
| | | Realizar preferencialmente o teste antes da medição |
| | Loop | Velocidade da embarcação < 0,7 m/s |
| | | Duração mínima 3 minutos ou 1,5 vezes a velocidade da água |
| | | Velocidade da água > 0,24 m/s |
| | Estacionário com GPS | Duração mínima 5 minutos por vertical |
| Estacionário sem GPS | Ancorado ou amarrado em cabo: duração mínima 5 minutos por vertical | |
| | Sem amarração (barco tripulado mantendo posição com uso do motor): duração mínima 10 minutos por vertical | |
| Margens | Máximo de vazão extrapolada | 5% da vazão total (para cada margem) |
| | Número de verticais válidas | No mínimo 10 verticais, com pelo menos 2 células |
| | Margem retangular (parede vertical) | Distância mínima de fechamento da travessia deve ser igual à profundidade no ponto de fechamento |



| Resumo de critérios de qualidade requeridos em medições acústicas com barco em movimento | | |
|--|----------------------------------|---|
| Travessia | Configuração | Desabilitar a opção de trajeto composto antes da medição |
| | Número de travessias | Pares (no mínimo um par) |
| | Duração da medição | No mínimo 12 minutos |
| | Velocidade do barco na travessia | Constante, preferencialmente menor que a velocidade da água |
| | Características das travessias | Duração, vazão medida, vazão extrapolada e área da seção são parâmetros que devem ser coerentes entre as travessias realizadas |
| Pós-processamento | Geral | Realizar em campo, imediatamente após a medição |
| | | Utilizar <i>software</i> de pós-processamento |
| Vazão medida pelo ADCP | | Ao menos 50% da vazão total (medida + estimada) |
| Coeficiente de variação da vazão média menor que 5% | | |
| Comparação da medição de descarga líquida com a curva-chave | | Conforme as orientações do “Relato do planejamento da RHNR e a definição das estratégias de implementação para os próximos anos (5 anos) ”. |

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Medição de descarga líquida em grandes rios: manual técnico**. Brasília: ANA, 2014a. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2014/MedicaoDeDescargaLiquidaEmGrandesRios-ManualTecnico2ed.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Lista de termos para o thesaurus de recursos hídricos da Agência Nacional de Águas**. Brasília: ANA, 2014b. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20150406034300_Portaria_149-2015.pdf. Acesso em: 20 jan. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Levantamentos topobatimétricos e geodésicos aplicados na Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN)**. 1. ed. [S.l.]: ANA, 2021. Acesso em: 20 jan. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil); SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência – RHNR: relato do planejamento da RHNR e a definição das estratégias de implementação para os próximos anos (5 anos). Grupo de Trabalho ANA-SGB**. Brasília: ANA, 2017.
- ALVES, L. G. S. **Aprimoramentos de série de dados de vazão em regimes sob efeito de remanso hidráulico variável: impactos na modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia Amazônica**. 2018. 76 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018. Acesso em: 20 jan. 2025.
- BELL, S. A. A beginner's guide to uncertainty of measurement. 2. ed. [S.l.]: **National Physical Laboratory**, 2001. Acesso em: 20 jan. 2025.
- CHOW, V. T. **Open channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill Education, 1959. Acesso em: 20 jan. 2025.
- FORÇA AÉREA BRASILEIRA. **Glossário do departamento de controle do espaço aéreo**. 2020. Disponível em: <https://www.decea.mil.br/index.cfm?i=utilidades&p=glossario&single=2240>. Acesso em: 20 jan. 2025. Acesso em: 20 jan. 2025.
- FULFORD, J. M.; SAUER, V. B. Comparison of velocity interpolation methods for computing open-channel discharge. In: **Selected papers in the hydrologic sciences 1**. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 1986. p. 154. Acesso em: 20 jan. 2025.
- HUANG, H. The importance of ADCP alignment with GPS in moving-boat stream-flow measurements. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 67, p. 33–40, 2019. Acesso em: 20 jan. 2025.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2008. Acesso em: 20 jan. 2025.
- MOTTA, B. G. da. **Determinação do limite de aplicação entre os métodos dinâmico e estacionário em medições de vazão utilizando ADCP**. 2016. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Acesso em: 20 jan. 2025.

MUELLER, D. S. et al. Errors in acoustic Doppler profiler velocity measurements caused by flow disturbance. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 133, n. 12, p. 1411–1420, 2007a. Acesso em: 20 jan. 2025.

MUELLER, D. S. **Algorithms used in SMBA**. 2008. Disponível em: https://hydroacoustics.usgs.gov/publications/SMBA_Algorithms.pdf. Acesso em: 20 jan. 2025.

MUELLER, D. S. et al. Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat. In: JEWEL, S.; KIMBALL, S. M. (ed.). **U.S. Geological Survey Techniques and Methods**. 1. ed. [S.l.]: U.S. Geological Survey, 2013. p. 95. Acesso em: 20 jan. 2025.

MUELLER, D. S. OSW Informational and Technical Note 2016.17. **U.S. Geological Survey**, v. 1, p. 10, 2016. Acesso em: 20 jan. 2025.

MUELLER, D. S.; EAST, J. W. **Analysis of procedures for measurement streamflow with an acoustic Doppler current profiler from a moving boat in the Amazon river basin**. 2018. Acesso em: 20 jan. 2025.

MUELLER, D. S.; WAGNER, C. R. Development of a simple loop method for correcting acoustic Doppler current profiler discharge measurements biased by sediment transport. **Scientific Investigations Report**, v. 1, p. 5079, 2016. Acesso em: 20 jan. 2025.

BERG, K. A.; MUELLER, D. S. Validation of streamflow measurements made with acoustic Doppler current profilers. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 133, n. 12, p. 1421–1432, 2007. Acesso em: 20 jan. 2025.

RANTZ, S. E. **Measurement of stage and discharge: computation of discharge. Volume 1: Measurement of Stage and Discharge**. 2. ed. Washington D.C.: USGS: Water Supply Paper, 1982a. Acesso em: 20 jan. 2025.

RANTZ, S. E. **Measurement of stage and discharge: computation of discharge. Volume 2: Computation of discharge**. 2. ed. Washington D.C.: USGS: Water Supply Paper, 1982b. Acesso em: 20 jan. 2025.

SCHLICHTING, H. **Boundary-layer theory**. 7. ed. New York: McGraw-Hill Education, 1979. Acesso em: 20 jan. 2025.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Glossário geológico ilustrado**. 2012. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SIMPSON, M. R. **Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler**. 2001. p. 134. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr0101/text.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2025.

TELEDYNE RD INSTRUMENTS. **ADCP coordinate transformation: formulas and calculations**. San Diego: Teledyne RD Instruments, 1998. Acesso em: 20 jan. 2025.

TELEDYNE RD INSTRUMENTS. **ADCP coordinate transformation: formulas and calculations**. Technical manual. [S.l.]: Teledyne RD Instruments, 2010. Acesso em: 20 jan. 2025.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Manual on stream gauging**. [S.l.]: WMO, [s.d.]. Acesso em: 20 jan. 2025.

Glossário

ADCP – Da sigla em inglês *Acoustic Doppler Current Profiler*. O nome Perfilador de Correntes por Efeito Doppler Acústico é usado para identificar qualquer tipo de instrumento que obtenha perfis de velocidade da água, transmitindo onda acústica de frequência conhecida na água e medindo a diferença Doppler da reflexão dessa onda por sólidos suspensos, que se presume estarem se movendo com a mesma velocidade da água (MUELLER *et al.*, 2013).

Ambiguidade (Ambiguity) – Propriedade do resultado de cálculo da diferença Doppler, a partir da mudança de fase da função senoidal representativa do movimento de uma onda. Como a fase angular é periódica entre picos e vales de uma onda, mais de um valor pode se apresentar como solução para o cálculo e, sem informações complementares, essa solução será ambígua (MUELLER *et al.*, 2013).

Ângulo de mergulho magnético – Valor de inclinação da agulha da bússola em relação ao plano horizontal, gerada pelo campo magnético terrestre, que pode influenciar na leitura adequada da declinação magnética. Essa influência na horizontalidade da agulha da bússola varia ao longo do globo terrestre, sendo nula na Linha do Equador e praticamente vertical nos polos (CPRM, 2012).

Amplitude de sinal bruto (Counts) – Valores de amplitude do sinal bruto que ainda não foi regularizado. Os valores variam de 0 a 255 (MUELLER *et al.*, 2013).

Área de influência hidrodinâmica – Região próxima ao transdutor na qual o próprio equipamento funciona como uma barreira ao escoamento, desviando parte das linhas de corrente superficiais para baixo, alterando o padrão real de escoamento.

Bacia hidrográfica – Espaço geográfico delimitado pelo respectivo divisor de águas, cujo escoamento superficial converge para seu interior, sendo captado pela rede de drenagem que lhe concerne (ANA, 2015).

Backscatter (Pulso de Retorno) – (1) Porção de uma onda acústica que é refletida diretamente pela dispersão de partículas para a fonte transmissora. (2) Medição qualitativa da concentração de sólidos em suspensão. *Backscatter* é a intensidade da energia devolvida normalizada para absorção de som, propagação de feixe, temperatura da água *etc.* e fornece meios de rastrear a concentração relativa de partículas de dispersão (MUELLER *et al.*, 2013).

Barramento – Estrutura construída em um curso d'água, transversalmente à direção de escoamento, alterando as condições de escoamento natural, com a finalidade de obter a elevação do nível de água ou objetivando a formação de um reservatório a montante (ANA, 2014b).

Blank – A distância mensurada a partir da face do transdutor do perfilador acústico, que abrange a área de influência hidrodinâmica e a distância percorrida pelo pulso



acústico durante o tempo de recuperação do efeito gongo. Os dados coletados dentro dessa região amostral podem ser contaminados pelos efeitos de vibrações residuais do pulso transmitido e, normalmente, terão um viés de baixa (MUELLER *et al.*, 2013). Essa informação é fornecida pelo fabricante de cada equipamento.

Bottom track (Rastreo de fundo) – Método de processamento para medir a diferença Doppler de um sinal que retornou do fundo (leito do rio) com o objetivo de determinar a velocidade do *ADCP* (barco).

Calado de embarcação – Distância que vai da superfície da água até a parte inferior da embarcação, representando a parte da embarcação que fica sempre submersa.

Célula (Bin) – Menor unidade de área em uma vertical da seção de medição para a qual são determinados valores de descarga líquida, os quais são medidos pelo *ADCP*.

Configuração Janus – Transdutor com quatro feixes acústicos. Essa configuração é chamada de “Janus”, em homenagem ao deus grego de mesmo nome, que possuía duas faces e podia olhar simultaneamente para frente e para trás.

Controle de canal – Condição de um curso d’água cuja seção de monitoramento encontra-se em um trecho longo que não possui nenhum elemento capaz de alterar abruptamente a relação cota-vazão da estação de monitoramento fluviométrico.

Controle de seção – Elemento, natural ou artificial, que orienta a relação cota-vazão de uma estação de monitoramento fluviométrico.

Coordenadas ENU (Earth coordinates) – Dados de localização terrestre num sistema ortogonal, correspondentes à intersecção da superfície terrestre com planos hipotéticos, contendo o eixo de rotação terrestre, sendo o eixo horizontal uma linha imaginária orientada no sentido Leste-Oeste, passando pelo plano do Equador, e o eixo vertical uma linha imaginária orientada no sentido Norte-Sul passando pelos polos (CPRM, 2012).

Coordenadas de feixes (Beam coordinates) – Um sistema de coordenadas definido por vetores calculados a partir do processamento dos feixes. Os dados de velocidade relatados nas coordenadas de feixes referem-se às velocidades paralelas a cada feixe (MUELLER *et al.*, 2013).

Coordenadas do barco (Ship coordinates) – Coordenadas ortogonais em um plano cartesiano, cujos eixos são referenciados ao *ADCP* e que podem ser usadas para correção de *pitch* e *roll*, mas não se aplicam a uma correção de posição geográfica (MUELLER *et al.*, 2013).

Correção de fundo móvel – Valor de velocidade representativo do transporte de sedimento de fundo, utilizado para corrigir a leitura da velocidade do *ADCP* pelo método do *bottom track*.

Correção de rumo – Cálculo do rumo medido em relação ao norte magnético para ajuste ao norte verdadeiro (geográfico) a partir da declinação magnética local.

Cota (*Gage height*) – A altura da superfície da água de um curso d'água ou lago medida a partir de um plano de referência arbitrário. Em alguns casos, o leito do rio é arbitrado como o plano de referência. O termo cota e a expressão nível da água são frequentemente usadas de forma intercambiável, no entanto, o termo cota é mais apropriado quando usado para indicar uma leitura em seção de monitoramento (MUELLER *et al.*, 2013).

Curva-chave – Função matemática que relaciona as cotas e as vazões em uma seção de monitoramento fluviométrico.

Distância da margem – Menor distância horizontal, contada desde a margem do ponto inicial até a margem do ponto final de uma tomada de leituras do *ADCP*, num processo de medição de descarga líquida (MUELLER *et al.*, 2013).

Declinação magnética – Ângulo formado entre o norte verdadeiro e o norte magnético, cujo valor varia de ponto a ponto da Terra e ao longo do tempo (CPRM, 2012).

Diferença Doppler (*Doppler shift*) – Mudança aparente na frequência de uma onda acústica, conforme há movimento de aproximação ou afastamento entre o observador e a fonte da onda (MUELLER *et al.*, 2013b).

DMG - *Distance made good* (Distância Retificada) – Distância em linha reta entre a localização atual do *ADCP* e o ponto de partida da travessia (MUELLER *et al.*, 2013).

Draft – Distância entre a superfície da água e a face dos transdutores, ou seja, a profundidade de imersão do medidor (MUELLER *et al.*, 2013).

Ecobatímetro – Instrumento para determinar a profundidade da água em um curso d'água pela medida do tempo decorrido entre a emissão de sinal sonoro e o retorno de seu eco, após reflexão no fundo (ANA, 2014b).

Entidade Operadora – Estrutura organizacional de personalidade jurídica própria, responsável pela operacionalização do monitoramento hidrológico de uma determinada região geográfica.

Erro da bússola – Erro de leitura resultante da interferência magnética de um local.

Erro de velocidade (*Error velocity*) – Nome dado pela *Teledyne RD Instruments* à diferença na velocidade vertical medida por feixes opostos, e dimensionada para ser comparável à variância na velocidade horizontal. Se o campo de fluxo for homogêneo, a diferença entre essas velocidades verticais tenderá a zero (MUELLER *et al.*, 2013).

Feixe acústico (*Acoustic beam*) – O padrão de energia acústica emitida por um transdutor e que viaja pela água em forma de onda (MUELLER *et al.*, 2013).



Feixe principal (Main beam) – O feixe primário de energia acústica transmitida por um transdutor. Transdutores emitem lóbulos laterais de energia acústica em vários ângulos não coincidentes com o feixe principal. Tipicamente, o feixe principal é definido como a energia acústica entre +/- 3 dB (MUELLER *et al.*, 2013b).

Frequência (Frequency) – O número de cristas de onda passando em um determinado ponto por unidade de tempo. A unidade é o hertz (Hz) (MUELLER *et al.*, 2013).

Fundo móvel – Condição hidrológica em que o fluxo de sedimentos no leito do curso d'água afeta a leitura do fundo realizada pelo *bottom track* e produz um falso efeito de deslocamento para montante nas leituras do *ADCP*.

GGA – Abreviação para o *GPGGA*. Formato de saída padrão para dados GPS, definido pela *National Marine Electronics Association (NMEA), Standard 0183*, que inclui tempo, latitude, longitude, qualidade de correção, número de satélites, diluição horizontal de precisão (*HDOP*), altitude e outros parâmetros.

GNSS – Sistema global de navegação por satélite, constituído pelas constelações existentes do GPS e *GLONASS*. Futuramente, a partir de sua operacionalização efetiva, o *GALILEO* também será parte componente do *GNSS*, assim como, possivelmente, o sistema *COMPASS*, em desenvolvimento sob a égide chinesa (FORÇA AEREA BRASILEIRA, 2020).

HDOP (Horizontal Dilution of Precision) – Componente relativo às distâncias horizontais do indicador da diluição da precisão do posicionamento *GNSS*, que relaciona a quantidade de satélites disponíveis e a distribuição geométrica entre eles numa determinada localização da superfície terrestre, no momento da leitura.

Homogeneidade (Homogeneity) – Premissa de que a velocidade medida por cada feixe do *ADCP* é idêntica. Essa suposição é exigida pelas equações usadas para transformar as velocidades dos feixes do *ADCP* em um sistema de coordenadas ortogonais (MUELLER *et al.*, 2013).

Incerteza ou Grau de Incerteza – Estimativa da falta de confiabilidade do quanto um dado medido representa o valor verdadeiro da situação mensurada.

Intensidade de eco (Echo Intensity) – Medida da intensidade de força do sinal que retornou ao transdutor (MUELLER *et al.*, 2013b).

Interferência magnética ou Influência magnética – Interação de um campo magnético produzido por uma ou mais fontes locais com o campo magnético da Terra.

Jusante – Qualitativo de um ponto ou de uma área que, ao longo de um curso d'água, fica altimetricamente abaixo de outra. Em direção curso abaixo (ANA, 2014b).

Leito de um rio – Parte mais baixa do vale de um rio, modelada pelo escoamento da água, ao longo da qual se deslocam, em períodos normais, a água e os sedimentos

(ANA, 2014b).

Linha de fluxo – Linhas imaginárias representativas de propriedades de um fluido. Neste documento será tratada com o mesmo significado de linhas de corrente, cuja curvatura é tangente à velocidade do fluido.

Matriz de Transformação – Sistema de equações matemáticas utilizadas pelos algoritmos de processamento do *ADCP* para cálculo das componentes ortogonais da velocidade da água, a partir da diferença Doppler medida pelos seus transdutores. A matriz de transformação é específica de cada equipamento, calibrada de acordo com as exatas medidas físicas obtidas na sua fabricação.

Modo (*Water Mode*) – Uma configuração definida de *pings* do *ADCP* e de algoritmos de processamento, que podem ser alterados manualmente ou automaticamente, para diferentes condições do rio (MUELLER *et al.*, 2013b).

Montante – Qualitativo de um ponto ou de uma área que, ao longo de um curso d'água, fica altimetricamente acima de outra. Em direção curso acima (ANA, 2014b).

Multicaminho – Situação em que os sinais dos satélites *GNSS* atingem a antena do receptor após sofrer várias reflexões em uma ou mais superfícies próximas.

Nível da água (*Stage*) – Altura da superfície livre de uma massa de água em relação a um plano de referência arbitrário ou absoluto.

Nível de ruído do instrumento (*Instrument Noise Level*) – Intensidade do eco medido quando nenhum sinal transmitido está presente. A intensidade de eco medida é causada por uma combinação de ruído ambiental e eletrônico (MUELLER *et al.*, 2013).

Perfil de velocidade (*Profile*) – Conjunto de medições de velocidade em várias profundidades ao longo de uma única vertical da coluna de água (MUELLER *et al.*, 2013).

Ping (Conjunto de pulsos) – Totalidade da energia acústica gerada por um transdutor *ADCP* para um único ciclo de medição. Um *ping* de processamento *broadband* (banda larga) contém uma série codificada de pulsos emitidos em intervalos, enquanto um *ping* de *narrowband* (banda estreita) contém um único pulso (MUELLER *et al.*, 2013).

Pitch (Inclinação da embarcação) – Rotação ou inclinação do *ADCP* no sentido longitudinal (eixo *y*) sobre o eixo transversal (eixo *x*) definido para o *ADCP* (MUELLER *et al.*, 2013).

Plataforma de coleta de dados (PCD) – Equipamento eletrônico que registra de forma automática dados hidrométricos, a partir de informações de instrumentos de medição de uma seção de monitoramento. Esses equipamentos possuem capacidade de armazenamento digital desses dados para coleta regular ou transmissão remota.

Processamento Broadband (Broadband Processing) – Técnica que usa pulsos codificados para fazer várias medições de diferença Doppler com um único *ping*. Como o ruído aleatório é reduzido pela raiz quadrada do número de amostras, essa técnica reduz o ruído aleatório associado a medições de velocidade com *ping* único (MUELLER *et al.*, 2013).

Processamento Narrowband (Narrowband Processing) – Técnica que usa um único pulso por *ping* para medir a velocidade. O *ping* de *narrowband* (banda estreita) é simples e pode ser processado rapidamente. Os sistemas de banda estreita atual (2013) podem ser reduzidos a taxas de até 70 Hz para *pings* incoerentes. Com *pings* rápidos, e calculando a média da medição de velocidade de cada *ping*, um ADCP de processamento *narrowband* (banda estreita) pode medir a velocidade da água com desvios-padrão de erro aleatório de aproximadamente 0,1 m/s, para uma média de 1 segundo para *pings* incoerentes (MUELLER *et al.*, 2013).

Profundidade do curso d'água ou coluna d'água – Distância da superfície da água até o leito do curso d'água, medida num ponto de interesse na seção transversal.

Pulso (Pulse) – Onda acústica gerada por um transdutor (MUELLER *et al.*, 2013).

Pulso Coerente (Pulse Coherent) – Algoritmo para a transmissão e processamento de um par de pulsos acústicos em que os pulsos são independentes. O ADCP envia o primeiro pulso, recebe e coleta os dados de retorno, depois transmite um segundo pulso e novamente recebe e coleta os dados de retorno (MUELLER *et al.*, 2013).

Pulso incoerente (Pulse Incoherent) – ADCP que transmite um único pulso por medição (*ping*). A diferença Doppler é calculada à medida que o pulso refletido é recebido (MUELLER *et al.*, 2013).

QRev – Programa computacional desenvolvido pela USGS para calcular a descarga líquida de uma medição acústica com barco em movimento usando dados coletados com qualquer um dos ADCP da Teledyne RD Instrument ou SonTek (MUELLER *et al.*, 2013).

Região filtrada – Dado solicitado pelos softwares de operação dos equipamentos da SonTek que corresponde à área no topo da seção de medição, cujas leituras devem ser desconsideradas para o cálculo da vazão. O valor mínimo a ser inserido é a soma do *draft* e do *blank*.

Roll (Rolagem da embarcação) – Rotação do ADCP no sentido transversal (eixo x) sobre o eixo longitudinal (eixo y) definido para o ADCP (MUELLER *et al.*, 2013).

Rotina LC (Loop Correction) – Código computacional autônomo desenvolvido pelo USGS para processar e analisar testes de fundo móvel em movimento de loop.

Rotina SMBA (Stationary Moving Bed Analysis) – Código computacional autônomo, desenvolvido pelo USGS, que utiliza a rotina de cálculo do produto escalar entre a su-

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA
Serviço Geológico do Brasil - SGB

posta velocidade medida do barco (*ADCP*) e a velocidade medida da água para determinação da velocidade do fundo móvel em todas as medições estacionárias de fundo móvel.

RTK (*Real Time Kinematic*) – Sigla em inglês de Posicionamento Cinemático em Tempo Real. Técnica de posicionamento relativo *GNSS* que se baseia na correção da leitura dos sinais dos satélites, utilizando medidas de posição oriundas de uma estação de referência com coordenadas planialtimétricas previamente conhecidas, com um receptor *GNSS* fixo e que envia remotamente essas medições ao receptor do usuário. Esse receptor compara a medição recebida da estação de referência com sua própria medição para um mesmo satélite, realizando a correção do cálculo da posição. Dessa forma, os efeitos de interferências nos sinais, como erro do relógio do satélite, erros de efemérides e erros decorrentes da propagação do sinal na atmosfera, entre outros, são minimizados (MONICO, 2008).

Ruído (*Noise*) – Refere-se ao erro aleatório associado às medições de velocidade. O ruído é causado por fatores instrumentais e ambientais. Dados de velocidade “barulhentos” teriam um erro aleatório relativamente grande (MUELLER *et al.*, 2013).

Rumo (*Heading*) – Orientação geográfica, lida em medida angular, da direção de um vetor de deslocamento em relação ao Norte.

Seção de medição – Seção transversal escolhida para a medição de descarga líquida.

Seção de réguas – Seção de monitoramento da relação cota-vazão, onde são instaladas estacas graduadas ao longo do perfil transversal para registro da alteração da cota ao longo do tempo.

Seção transversal de um curso d’água – Seção de um curso d’água perpendicular à direção principal (média) do escoamento (ANA, 2014b).

Side lobe (**Efeito side lobe**) – Picos de intensidade secundários e laterais à onda (no contexto deste manual, ondas acústicas) principal gerada pelo transdutor.

Signal-to-noise ratio (SNR) (Relação sinal-ruído) – Razão entre a potência do sinal e a potência do ruído de fundo. Quanto maior a potência do sinal em relação ao ruído de fundo, melhor é a qualidade do sinal recebido.

Sólidos suspensos (*Scatterers*) – Pequenas partículas, como sedimentos suspensos ou matéria orgânica, que se espalham pelo corpo d’água e refletem a energia acústica transmitida por instrumentos hidroacústicos (MUELLER *et al.*, 2013).

Taxa de atualização (*Update rate*) – Número de amostras de dados por unidade de tempo fornecido por um instrumento (MUELLER *et al.*, 2013).

Telemetria – Transmissão remota de dados de registradores automáticos hidrométricos.



Tempo de recuperação (Efeito “gongo”) – O *ADCP* utiliza os mesmos transdutores para emitir e receber pulsos acústicos. Para emitir pulsos o transdutor é energizado por um tempo finito e vibra, produzindo assim ondas acústicas. Quando a energia é cortada, o transdutor não para de vibrar imediatamente. O tempo decorrido para que a vibração seja completamente amortecida é chamada de tempo de recuperação ou efeito gongo. O nome efeito gongo decorre da analogia entre o transdutor e um grande gongo que, após receber um pulso de energia finita (batida) no tempo, permanece vibrando por tempo maior do que a duração do pulso de energia.

Teste de fundo móvel – Procedimento para verificar se a presença de um fluxo de transporte de sedimentos no leito de uma determinada seção transversal compromete o rastreamento de fundo realizado pelo *Bottom Track*. Esse procedimento consiste na leitura do resultado do *Bottom Track* (rastreamento de fundo), considerando a premissa de que o fundo do rio é um referencial estático. Portanto, se esse referencial se move, o *ADCP* identificará esse movimento como sendo do próprio aparelho.

Teste de sistema – Conjunto de testes executados em medidores acústicos com o objetivo de avaliar a comunicação e o funcionamento de sensores e periféricos do *ADCP*.

Teste discreto – Um elemento da rotina teste de sistema do *ADCP* como diagnóstico dos componentes eletrônicos, correlação de feixes, teste de comunicação etc.

Topobatimetria – Técnica topográfica de mapeamento de relevo do leito de um corpo d’água, incluindo os trechos secos e os submersos.

Trajeto (*Length*) – Distância curvilínea medida ao longo do caminho percorrido pelo *ADCP* entre os pontos inicial e final de amostragem de uma travessia (MUELLER *et al.*, 2013).

Trajectoria do barco (*Ship track*) – Representação gráfica do caminho horizontal percorrido pelo *ADCP* com base na referência de navegação selecionada (*bottom track* ou *GNSS*) (MUELLER *et al.*, 2013).

Transdutor (*Transducer*) – Elementos do *ADCP* responsáveis por emitir e receber ondas acústicas. Consiste em um elemento cerâmico protegido com um revestimento de uretano, que quando energizado por um pulso elétrico vibra para transmitir ondas acústicas que viajam através da água e são refletidas de volta ao transdutor. As ondas acústicas refletidas que retornam ao transdutor fazem com que a cerâmica vibre, gerando um sinal elétrico que é lido pelo *ADCP* (MUELLER *et al.*, 2013).

Transdutor de frequência variável (*Phased array transducer*) – Transdutor único, plano e multielemento que pode formar múltiplos feixes, alterando o tempo (fase) da transmissão de cada um dos elementos do transdutor, de tal forma que o padrão efetivo da matriz é reforçado na direção desejada e suprimido em direções indesejadas (MUELLER *et al.*, 2013).

Travessia (*Transect*) – Única passagem através de uma seção transversal do rio, começando e terminando o mais próximo possível de cada margem, enquanto ainda coleta dados válidos. Uma travessia não é necessariamente uma linha reta de uma margem para a outra, mas sim um trajeto arbitrário dependendo do caminho percorrido pelo *ADCP*. As travessias consistem em vários conjuntos, cada um com dados de profundidade, de distância e de velocidade, permitindo que o *software* do *ADCP* compute a descarga líquida. Uma medição de descarga líquida, normalmente, consiste em múltiplas travessias conjugadas em uma média (MUELLER *et al.*, 2013).

Travessia Exploratória – Travessia realizada com o objetivo de conhecer as condições físicas e de escoamento da seção de medição, a fim de que o profissional de campo tenha subsídios para escolher os procedimentos mais adequados para realização de uma medição de descarga líquida.

Vazão – Volume de líquido que passa através de uma seção transversal por uma unidade de tempo (ANA, 2014b).

Velocidade da água – Velocidade instantânea da água medida pelo *ADCP* em cada célula de medição ao longo da seção transversal.

Velocidade de corrente – O mesmo que velocidade da água.

Velocidade de deslocamento – O mesmo que velocidade do barco.

Velocidade do barco – Velocidade instantânea do *ADCP* ao longo da travessia.

Velocidade radial (*Radial Velocity*) – Representa a componente da velocidade dos sólidos em suspensão, paralela ao feixe principal de energia acústica (MUELLER *et al.*, 2013).

Vertical ou amostra vertical (*Ensemble ou sample*) – Conjunto de dados medidos relacionados com uma única vertical da coluna de água, conforme relatado ao usuário pelo *ADCP*. Esses dados podem incluir, mas não se limitam a: propriedades acústicas (correlação, intensidade, etc.), velocidade da água, velocidade do barco e leituras de sensores (direção, *pitch*, *roll*, temperatura, etc.). O *ADCP* pode considerar vários *pings* ou medições desses dados antes de relatar a vertical (ou amostra vertical), dependendo do modo de operação (MUELLER *et al.*, 2013).

Viés direcional – Diferença sistemática nos dados medidos pelo *ADCP* entre travessias iniciadas em margens diferentes.

VTG – Abreviação para o *GPVTG*. Formato de saída padrão para dados GPS definido pela *National Marine Electronics Association (NMEA)*, norma 0183, que inclui informações sobre a direção do *ADCP* e velocidade do solo.

Apêndice A

O método LC para o cálculo de fundo móvel pelo teste Loop

Este apêndice é baseado na metodologia para cálculo do *loop* apresentado no artigo “*Application of the Loop Method for Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge*” (MUELLER e WAGNER, 2006).

À medida que um *ADCP* é movido através do fluxo, a presença de fundo móvel fará com que o trajeto da embarcação calculado pelo *bottom track* seja distorcido para montante. Portanto, se um *ADCP* faz uma travessia de ida e volta e retorna à posição inicial exata, o fundo móvel fará com que o *bottom track* interprete que o *ADCP* retornou a uma posição a montante da posição inicial original.

Como o *ADCP* parece ter se movido rio acima, a velocidade da água medida pelo *ADCP* terá um viés negativo e, conseqüentemente, a descarga líquida também. Se a velocidade média do fundo móvel pode ser determinada, então a vazão dele pode ser determinada e somada à vazão medida com viés ocasionado pela presença de fundo móvel, para produzir uma vazão medida corrigida.

$$Q_{TC} = Q_{TM} + Q_{mb} \quad (\text{Equação A - 1})$$

Na qual:

Q_{TC} : é a vazão com viés de fundo móvel corrigido;

Q_{TM} : é a vazão medida pelo *ADCP*; e

Q_{mb} : é a vazão de fundo móvel.

Correção pela média

O método mais simples para corrigir a vazão em condição de fundo móvel é considerando que é o produto entre a

velocidade média do fundo móvel e a área da seção transversal.

$$Q_{mb} = \bar{V}_{mb} A \quad (\text{Equação A - 2})$$

Na qual:

\bar{V}_{mb} : é velocidade média do fundo móvel; e

A: é a área da seção transversal.

A velocidade média do fundo móvel pode ser estimada pelo deslocamento aparente do *ADCP* em relação ao ponto inicial e pelo tempo para execução do *loop*.

$$\bar{V}_{mb} = \frac{D_{up}}{T} \quad (\text{Equação A - 3})$$

Na qual:

D_{up} : é o chamado de erro de fechamento do *loop*, corresponde à distância aparente deslocada entre o ponto de início e fim do *loop*; e

T: é o tempo de duração do *loop*.

A maioria dos *ADCPs* fornecem as informações necessárias para a realização do cálculo mostrado. Porém, é preciso considerar que a área de seção calculada pelo *bottom track* também apresenta distorções devido ao deslocamento para montante, sendo superestimada. Apesar de o cálculo do erro médio ser relativamente simples de se realizar manualmente e de apresentar resultados razoavelmente aceitáveis para muitos rios, caso a seção transversal, a área, a vazão e o fundo móvel não sejam uniformes, a correção pela média não produzirá resultados apropriados.

Correção distribuída

A velocidade do fundo móvel em um ponto qualquer do rio não é conhecida,

mas é razoável assumir que a velocidade do fundo móvel seja proporcional à velocidade da água próxima ao leito. Neste método, é feita uma correção distribuída usando o perfil de distribuição de velocidade elevada a 1/6 potência em cada um dos perfis verticais ao longo da seção transversal.

Para determinar a correção do método de *loop* distribuído, a velocidade média do fundo móvel medida do *loop* é distribuída para cada perfil coletado, usando uma relação entre a velocidade do fundo móvel próximo ao leito e a velocidade da água próxima ao leito para a seção transversal toda. As velocidades distribuídas do leito móvel são, então, aplicadas às velocidades da água e do barco para todas as células em cada uma das verticais correspondentes na porção medida da seção transversal, para determinar a correção da vazão medida.

A distribuição da velocidade média do fundo móvel com base nas velocidades da água próximas ao leito requer um método consistente de determinação das velocidades próximas ao leito em cada vertical medida. Por causa da interferência do efeito *side-lobe*, cerca de 6 a 10% das partes inferiores de cada perfil de velocidade não são medidos. Além disso, medições de velocidade ruins são comuns nas partes inferiores do perfil.

Portanto, a última célula válida em cada perfil de velocidade medido poderia ser utilizada para determinação da velocidade próxima ao fundo usando a lei da potência de 1/6 para estimar topo e

fundo. A velocidade próxima do leito é calculada utilizando a lei de 1/6 potência, considerando velocidade zero no leito e usando a velocidade média das duas últimas células válidas do perfil. O vetor velocidade é, então, decomposto nas componentes norte e leste.

$$V_{Enbi} = \bar{v}_{Enbi} \left(\frac{z_c}{\bar{z}_{nbi}} \right)^{1/6} \quad (\text{Equação A - 4})$$

$$V_{Nnbi} = \bar{v}_{Nnbi} \left(\frac{z_c}{\bar{z}_{nbi}} \right)^{1/6} \quad (\text{Equação A - 5})$$

Na qual:

V_{Enbi} : é a componente leste da velocidade próxima do leito para a vertical i ;

\bar{v}_{Enbi} : é a componente leste da velocidade média das duas células mais próximas do leito, na vertical i ;

V_{Nnbi} : é a componente norte da velocidade próxima do leito para a vertical i ;

\bar{v}_{Nnbi} : é a componente norte da velocidade média das duas células mais próximas do leito, na vertical i ;

z_c : é a distância próxima acima do leito em que é calculada a velocidade próxima do leito, arbitrada em 0.3 m; e

\bar{z}_{nbi} : é a distância média entre o leito e as duas medições de velocidade mais próximas do leito para cada vertical i .

Conhecendo as componentes leste e norte do vetor velocidade da água próxima do fundo, é possível determinar a velocidade média da água próxima ao fundo (\bar{V}_{nb}) da seguinte forma:

$$\bar{V}_{nb} = \sqrt{\left(\frac{\sum_i^n V_{Enbi}}{n} \right)^2 + \left(\frac{\sum_i^n V_{Nnbi}}{n} \right)^2} \quad (\text{Equação A - 6})$$

Então, é possível distribuir a velocidade média de fundo móvel para cada vertical de acordo com as seguintes equações:

$$V_{mbEi} = \bar{V}_{mb} \left(\frac{V_{Enbi}}{\bar{V}_{nb}} \right) \quad (\text{Equação A - 7})$$

$$V_{mbNi} = \bar{V}_{mb} \left(\frac{V_{Nnbi}}{\bar{V}_{nb}} \right) \quad (\text{Equação A - 8})$$

Na qual:

V_{mbEi} : é a componente leste do vetor velocidade de fundo móvel; e

V_{mbNi} : é a componente norte do vetor velocidade de fundo móvel.

As velocidades da água e do barco são originalmente dadas por:

$$Q_m = \sum_{j=1}^{\text{verticais}} \sum_{i=1}^{\text{células}} (V_{Ei,j} V_{Bni} - V_{Ni,j} V_{BEi}) b \, ti \quad (\text{Equação A - 8})$$

Na qual:

$V_{Ei,j}$: é a componente leste da velocidade da água na célula j da vertical i;

V_{Bni} : é a componente norte da velocidade do barco vertical i;

$V_{Ni,j}$: é a componente norte da velocidade da água na célula j da vertical i;

V_{BEi} : é a componente leste da velocidade do barco vertical i;

b : é o tamanho da célula (bin);

ti : é o tempo entre duas verticais.

Utilizando as componentes da velocidade de fundo móvel, calculadas com as equações A-7 e A-8, é possível corrigir as componentes de velocidade uma a uma da seguinte forma:

$$V_{Ei,j}^C = V_{Ei,j} + V_{mbEi} \quad (\text{Equação A - 9})$$

$$V_{Ni,j}^C = V_{Ni,j} + V_{mbNi} \quad (\text{Equação A - 10})$$

$$V_{BEi,j}^C = V_{BEi,j} + V_{mbEi} \quad (\text{Equação A - 11})$$

$$V_{Bni,j}^C = V_{Bni,j} + V_{mbNi} \quad (\text{Equação A - 12})$$

Substituindo as componentes medidas pelas componentes corrigidas na equação (Equação A - 8), temos a vazão medida corrigida (Q_{mc}):

$$Q_{mc} = \sum_{j=1}^{\text{verticais}} \sum_{i=1}^{\text{células}} (V_{Ei,j}^C V_{BNi,j}^C - V_{Ni,j}^C V_{BEi,j}^C) b \, ti \quad (\text{Equação A - 13})$$

A vazão total medida pelo ADCP consiste em uma soma da porção da vazão efetivamente medida (Q_m), vazão estimada no topo (Q_t), no fundo (Q_b), na margem esquerda (Q_l) e na margem direita (Q_r). A vazão total é, então, corrigida (Q_{TM}^C) da seguinte forma:

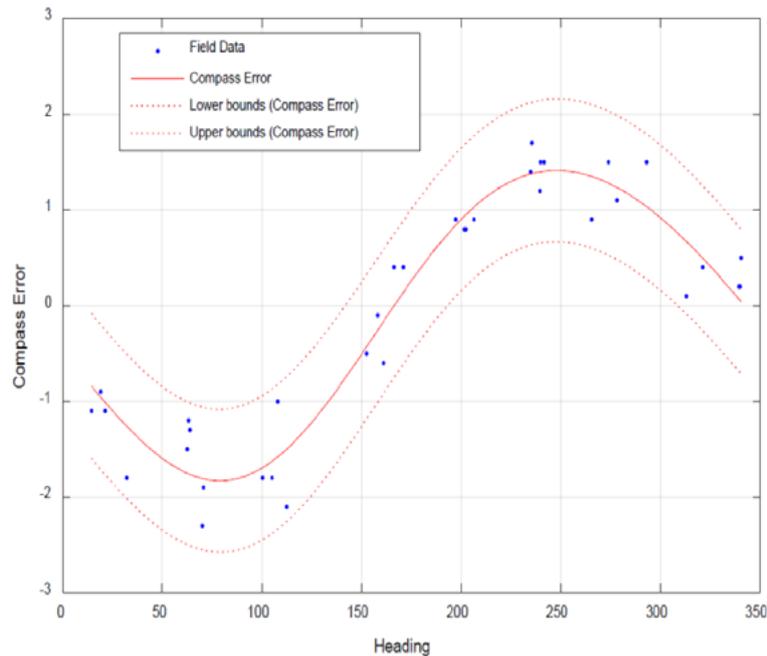
$$Q_{TM}^C = Q_l + Q_r + (Q_m + Q_t + Q_b) \frac{Q_{mc}}{Q_m} \quad (\text{Equação A - 14})$$

Apêndice B

Limitações do método do *loop* relacionadas com o erro de bússola

Este apêndice é baseado na nota técnica OSW 2016.17, “*Limitation of Loop Moving-Bed Test*” (MUELLER, 2016). Na Figura 32, é mostrado o erro de bússola em um ciclo em que é possível observar que a falha varia em função do rumo e que a diferença entre os erros máximos com sinais opostos ocorre com aproximadamente 180 graus de diferença. Podemos, então, afirmar que em uma travessia, em que o rumo da bússola varie entre aproximadamente 125 e 300 graus, o erro de direção varia entre, aproximadamente, -1 e 1 grau.

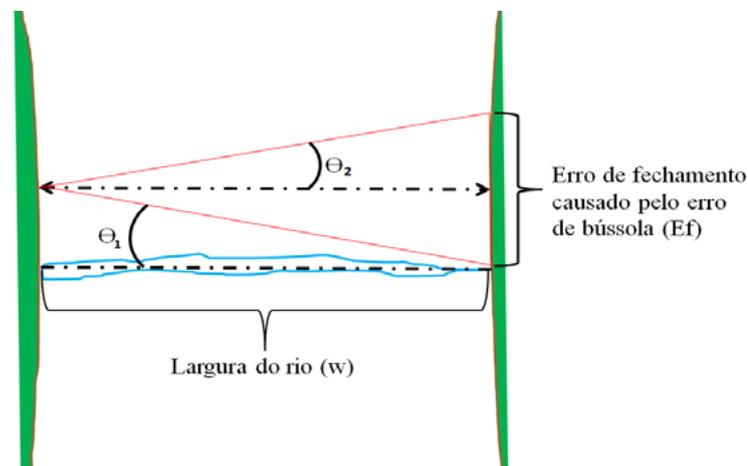
Figura 32 - Variação do erro de bússola durante a realização de um ciclo.



Fonte: Mueller (2016).

Na Figura 33, é mostrada uma trajetória hipotética com os ângulos do erro de bússola e o erro de fechamento nessas condições.

Figura 33 - Trajetória real da embarcação (em azul), largura do rio (w), erro de bússola em cada margem (θ_1 e θ_2) e erro de fechamento (E_f).



Fonte: Adaptado de Mueller (2016).

O erro de fechamento pode ser calculado da seguinte forma:

$$Ef = w \tan \theta_1 + w \tan \theta_2 \quad (\text{Equação B - 1})$$

Assumindo que:

$$|\theta_1| = |\theta_2| = \theta \quad (\text{Equação B - 2})$$

Temos:

$$Ef = 2 w \tan \theta \quad (\text{Equação B - 3})$$

Considerando que a velocidade de fundo móvel pode ser calculada como a razão entre o desvio para montante e a duração do teste (T), é possível, então, calcular o efeito de Ef sobre a velocidade de fundo móvel da seguinte forma:

$$\bar{V}_{mb} = \frac{Ef}{T} = \frac{2 w \tan \theta}{T} \quad (\text{Equação B - 4})$$

O método *loop* considera que o efeito de fundo móvel é desprezível, caso a sua velocidade seja menor do que 0,012 m/s. Considerando o erro de bússola máximo de 1 grau, é possível resolver a equação para duração do teste e em função da largura:

$$T = \frac{2 w \tan \theta}{\bar{V}_{mb}} = \frac{2 \tan(1^\circ) w}{0,012} = 2,909w \quad (\text{Equação B - 5})$$

Considerando, então, que a velocidade média de deslocamento da embarcação durante o *loop* é:

$$\bar{V}_{barco} = \frac{2w}{T} \quad (\text{Equação B - 6})$$

Usando a equação de duração do teste, temos que a velocidade máxima da embarcação durante o *Loop* deve ser:

$$\bar{V}_{barco} = 0,688 \text{ m/s}$$

Esse efeito tornar-se-á pronunciado em rios com larguras maiores do que 55 metros. Nessa condição, e considerando a precisão na determinação dos deslocamentos, a velocidade máxima de deslocamento da embarcação deve ser:

$$\bar{V}_{barco} < 0,70 \text{ m/s}$$

Apêndice C

O Algoritmo SMBA

Este apêndice apresenta a metodologia *Stationary Moving Bed Analysis* (SMBA), que é descrita no artigo “Algorithms Used in SMBA” (MUELLER, 2007). A descrição apresentada pelo autor foi originalmente pensada para corrigir um problema do *StreamPro* sem bússola, que não compensa a rotação e o deslocamento lateral do equipamento durante a execução de testes de fundo móvel estacionário e acusa uma falsa ocorrência de fundo móvel. Posteriormente, a metodologia SMBA foi incorporada nos programas *WinRiver II* e *RiverSurveyor Live* para realizar testes de fundo móvel.

Algoritmo do produto escalar

A velocidade do barco para montante medida durante um teste estacionário de fundo móvel pode ser calculada por meio do produto escalar entre a velocidade do barco e a velocidade da água. O uso do produto escalar para análise de um teste de fundo móvel foi originalmente sugerido por Randy Marsden, (*Teledyne RD Instruments*, comunicação oral, 2006). Essa abordagem foi subsequentemente desenvolvida e aplicada ao problema do falso fundo móvel verificado nos testes de fundo móvel com o *StreamPro*.

O produto escalar entre dois vetores $\vec{A} (A_x\hat{i} + A_y\hat{j})$ e $\vec{B} (B_x\hat{i} + B_y\hat{j})$ num plano bidimensional xy é definido como:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = |\vec{A}||\vec{B}|\cos\theta = A_xB_x + A_yB_y \quad (\text{Equação C - 1})$$

Se B é um vetor unitário, então o produto escalar do vetor calcula a magnitude do vetor A na direção do vetor B. A velocidade do barco na direção a montante para cada conjunto pode ser calculada como o produto escalar entre a velocidade do barco e o vetor unitário da velocidade média ponderada da água de cada vertical. Se o vetor de velocidade da água for definido como:

$$\vec{V}_{(i,j)} = V_{x(i,j)}\hat{i} + V_{y(i,j)}\hat{j} \quad (\text{Equação C - 2})$$

Na qual:

$\vec{V}_{(i,j)}$: é a velocidade da água na vertical i e na célula de profundidade j;

$V_{x(i,j)}$: é a componente x da velocidade da água na vertical i e na célula de profundidade j;

$V_{y(i,j)}$: é a componente y da velocidade da água na vertical i e na célula de profundidade j.

O vetor velocidade média-ponderada da água de uma vertical i é calculado em função do número de células da vertical:

$$\vec{W}_{(i)} = \frac{\sum_j^m \vec{V}_{x(i,j)}}{m}\hat{i} + \frac{\sum_j^m \vec{V}_{y(i,j)}}{m}\hat{j} = \vec{W}_{x(i)}\hat{i} + \vec{W}_{y(i)}\hat{j} \quad (\text{Equação C - 3})$$

Na qual:

$\vec{W}_{(i)}$: é o vetor velocidade média ponderada da água de uma vertical i ;

$\vec{W}_{x(i)}$: é a componente x do vetor velocidade média ponderada da água da vertical i ;

$\vec{W}_{y(i)}$: é a componente y do vetor velocidade média ponderada da água da vertical i .

O vetor unitário da velocidade média ponderada da água da vertical i é calculado da seguinte forma:

$$\vec{W}_{u(i)} = \frac{\vec{W}_{x(i)} \hat{i} + \vec{W}_{y(i)} \hat{j}}{|\vec{W}_{(i)}|} \quad (\text{Equação C - 4})$$

Na qual:

$\vec{W}_{u(i)}$: é vetor unitário da velocidade média ponderada da água da vertical i .

Sendo o vetor velocidade do barco da vertical i :

$$\vec{B}_{(i)} = B_{x(i)} \hat{i} + B_{y(i)} \hat{j} \quad (\text{Equação C - 5})$$

Na qual:

$\vec{B}_{(i)}$: é o vetor velocidade do barco na vertical i ;

$B_{x(i)}$: é a componente x do vetor velocidade do barco da vertical i ;

$B_{y(i)}$: é a componente y do vetor velocidade do barco da vertical i .

Então a velocidade do barco para montante (velocidade de fundo móvel) será dada pela seguinte equação:

$$|\vec{V}_{MB(i)}| = -(\vec{B} \cdot \vec{W}_{u(i)}) \quad (\text{Equação C - 6})$$

Na qual:

$|\vec{V}_{MB(i)}|$ é a magnitude da velocidade do barco para montante (velocidade de fundo móvel).

A velocidade média de fundo móvel de n verticais coletadas em uma determinada posição pode ser calculada para remover um possível viés de alguma vertical e, então, comparada com a velocidade média da água nas mesmas verticais.

$$\bar{V}_{MB} = \frac{\sum_i^n |\vec{V}_{MB(i)}|}{n} \quad (\text{Equação C - 7})$$

Como a velocidade do barco e a velocidade da água estão na orientação correta entre si, essa abordagem não é afetada pela rotação e movimento lateral do *StreamPro*.

A validade da abordagem proposta foi avaliada usando pares de medidas estacionárias em três locais. Em cada local, os dados foram coletados com o *StreamPro* atado a uma corda, permitindo que se rotacione e se desloque lateralmente, e fixado de modo a restringir a sua movimentação.

A velocidade do fundo móvel foi calculada pela técnica manual de divisão da distância compensada pela duração de cada uma das medidas. Os resultados mostram que as velocidades de fundo móvel medidas foram significativamente influenciadas pelo movimento do *StreamPro* e, quando o movimento rotacional e lateral foi restringido, as velocidades do leito móvel foram próximas de zero.

Para todos os testes de fundo móvel estacionário, a abordagem de produto escalar produz uma velocidade do fundo móvel muito próxima de zero, consistente com os resultados obtidos quando a rotação e o movimento lateral foram restritos. Portanto, a abordagem de produto escalar produz uma avaliação mais precisa de testes de fundo móvel estacionário coletados com *StreamPro* do que o cálculo manual.

Algoritmo para correção da velocidade média da água

A velocidade média ponderada da água por vertical pode ser corrigida adicionando a velocidade do fundo móvel calculada a partir do método do produto escalar.

$$\vec{W}_{c(i)} = \vec{W}_{(i)} + \vec{W}_{u(i)} |\vec{V}_{MB(i)}| \quad (\text{Equação C - 8})$$

A direção da velocidade da água é difícil de avaliar sem bússola de referência para a direção da água de uma vertical para a outra. Portanto, apenas a magnitude da velocidade média ponderada da água por vertical pode ser usada para calcular a velocidade média da água para a medição. Embora um teste de fundo móvel estacionário ou uma medição de perfil de velocidade deva ter profundidades quase constantes, o movimento lateral do *StreamPro* pode resultar em mudanças na profundidade de um conjunto para o outro. A profundidade média para cada conjunto é calculada como a profundidade ponderada dos feixes válidos, de acordo com a seguinte equação.

$$D_{w(i)} = \sum_{k=1}^{nv(i)} \left[\frac{D_{k(i)} \omega_{k(i)}}{\sum_{k=1}^{nv(i)} \omega_{k(i)}} \right] \quad (\text{Equação C - 9})$$

$$\omega_{k(i)} = 1 - \frac{D_{k(i)}}{\sum_{k=1}^{nv(i)} D_{k(i)}} \quad (\text{Equação C - 10})$$

$$\sum_{k=1}^{nv(i)} \omega_{k(i)} = nv(i) - 1 \quad (\text{Equação C - 11})$$

Nas quais:

$D_{w(i)}$: é a profundidade média ponderada da vertical i ;

$nv(i)$: é o número de feixes de profundidade válida para vertical i ;

$D_{k(i)}$: é a profundidade no feixe k para vertical i ;

$W_{k(i)}$: é a profundidade ponderada para o feixe k para vertical i .

A magnitude da velocidade média da água é então calculada utilizando a profundidade média ponderada e a velocidade média ponderada da água por vertical da seguinte forma:

$$\bar{W} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{W_{c(i)} D_{w(i)}}{\sum_{i=1}^n D_{w(i)}} \right] \quad (\text{Equação C - 12})$$

Na qual:

\bar{W} : é a magnitude da velocidade média da água para a medição estacionária.

Algoritmo para cálculo da descarga líquida corrigida

- O algoritmo usado para corrigir a descarga líquida, com base nos testes de fundo móvel estacionário, é semelhante à abordagem distribuída descrita por MUELLER e WAGNER (2006). As modificações na abordagem para aplicação em *SMBA* incluem:
 - A velocidade próxima ao leito é calculada como 10% da profundidade média para cada conjunto;
 - A velocidade próxima ao leito para cada teste de fundo móvel estacionário é a média da velocidade próxima ao leito calculada para cada conjunto de verticais do teste;
 - A velocidade do fundo móvel e a velocidade associada perto do leito são calculadas a partir da média de todos os testes de leito móvel estacionário processados no *SMBA* para essa medição.



MINISTÉRIO DA
INTEGRAÇÃO E DO
DESENVOLVIMENTO
REGIONAL

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

ISBN 978-658810185-8



9

786588

101858