



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CAMPUS DE POMBAL-PB**

FELIPE ALVES TORRES

**HIDROMETRIA COM O USO DO MEDIDOR ACÚSTICO DOPPLER DE
VAZÃO**

POMBAL-PB

2018

FELIPE ALVES TORRES

**HIDROMETRIA COM O USO DO MEDIDOR ACÚSTICO DOPPLER DE
VAZÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador(a): Prof. Dr. Manoel Moises Ferreira de Queiroz

POMBAL-PB

2018

T693h Torres, Felipe Alves.
Hidrometria com o uso do medidor acústico doopler de vazão / Felipe
Alves Torres. – Pombal, 2018.
51 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de
Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Manoel Moisés Ferreira de Queiroz".
Referências.

1. Hidrometria. 2. Medição de vazão. 3. Curva chave. 4. Acoustic
Doppler Current Profiler - ADCP. I. Queiroz, Manoel Moisés Ferreira de.
II. Título.

CDU 556.18(043)

FELIPE ALVES TORRES

**HIDROMETRIA COM O USO DO MEDIDOR ACÚSTICO DOPPLER DE
VAZÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador(a): Prof. Dr. Manoel Moises Ferreira de Queiroz

Aprovado em _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Manoel Moises Ferreira de Queiroz
Orientador – CCTA/UFCG/*Campus* de Pombal-PB

Prof^a. Dra. Érica Cristine Medeiros Machado
Examinadora Interna – CCTA/UFCG/*Campus* de Pombal-PB

Doutoranda Ma. Eng. Paloma Mara de Lima Ferreira
Examinadora Externa – UFPB/*Campus* de João Pessoa-PB

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, pela sua infinita misericórdia e pela Sua presença em minha vida.

À Universidade Federal de Campina Grande e ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar pela oportunidade e estrutura para a realização do curso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Manoel Moises Ferreira de Queiroz, por todos os ensinamentos, por toda a experiência compartilhada, pela paciência e profissionalismo no transcorrer das atividades;

Às professoras Érica Cristine Medeiros Machado e Paloma Mara de Lima Ferreira pelas contribuições acadêmicas e participação na banca examinadora;

À Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, nas pessoas da professora Virgínia e de Anna, pela eficiência, atenção e amizade extensivas a todos os alunos;

Aos professores e técnicos da Unidade Acadêmica de Ciência e Tecnologia Ambiental - UACTA, CCTA, UFCG - Campus de Pombal

À minha família, especialmente a minha avó Jovita, minha mãe Reni e meu pai André, por todo o incentivo e apoio em toda a minha vida;

A todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram com experiências para que eu chegasse aqui;

A todas as pessoas que moram no meu coração e que, sem sombra de dúvidas, são essenciais para a minha vida e sem as quais eu não conseguiria viver.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição do cálculo da vazão	19
Figura 2 – Cálculo da vazão em uma célula.....	19
Figura 3 – Cálculo da vazão em um perfil	21
Figura 4 – Curva de extrapolação	23
Figura 5 – Bad bins	24
Figura 6 – Lost ensemble.....	25
Figura 7 – Bad ensemble	25
Figura 8 – Estimativa de vazão junto à margem.....	27
Figura 9 - Extrapolação junto às margens.....	29
Figura 10 – Mapa de localização da área de estudo	31
Figura 11 – Perfilador Acústico Doppler SonTek S5	33
Figura 12 – Etapas principais da medição de vazão	34
Figura 13 – ADCP instalado na prancha momentos antes de começar a coleta de dados.....	38
Figura 14 – Operador realizando procedimentos no programa RiverSurveyor	39
Figura 15 – Prancha HydroBoard I com o ADCP antes da travessia	40
Figura 16 – Relatório de medição de vazão gerado pelo sistema	42
Figura 17 – Gráfico de travessia	44
Figura 18 – Gráfico da profundidade	45
Figura 19 - Gráfico do trajeto descrito pela bússola	45
Figura 20 – Leitura da posição na margem	45
Figura 21 – Transdutores na margem	45
Figura 22 – Curva-chave.....	47
Figura 23 – Nova curva-chave	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes de Rantz et al	29
Tabela 2 – Dados utilizados para obtenção da curva-chave	46
Tabela 3 – Dados obtidos durante o PIBITI.....	47
Tabela 4 – Dados utilizados para nova curva-chave	48

LISTA DE SIGLAS E TERMINOLOGIA DOPPLER

ADCP	Perfilador Acústico de Vazão Doppler
ANA	Agência Nacional de Águas
Bad Bin	Célula com erro ou sem qualidade requerida
Bad ensemble	Perfil vertical sem qualidade nas velocidades ou com problemas de fundo
Blank	Faixa não medida diretamente próxima à superfície
Bin ou depth cell	Célula do perfil vertical
Bottom Tracking	Método para medir a velocidade do barco
Ensemble	Perfil vertical médio de velocidades
Pings	Pulso acústico de frequência conhecida
Pitch	Inclinação no sentido do eixo longitudinal da embarcação
Roll	Inclinação no sentido do eixo transversal da embarcação
Side Lobe	Dispersão do sinal fora do feixe principal
Transdutores	Emissores e receptores de ondas sonoras, discos cerâmicos que vibram com a passagem de uma corrente elétrica

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	16
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE SIGLAS E TERMINOLOGIA DOPPLER	18
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Hidrometria e medição de vazão	14
3.2 A tecnologia ADCP (<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>)	15
3.3 Princípio Doppler	17
3.4 Curva-chave	17
3.5 Medição de Vazão	18
3.5.1 Cálculo da vazão em um bin	19
3.5.2 Cálculo da vazão em um ensemble	20
3.5.3 Métodos de extrapolação para superfície e leito	21
3.5.4 Cálculo das vazões dos <i>Bad Bins</i> , <i>Lost Ensembles</i> e <i>Bad Ensembles</i>	23
3.5.5 Áreas não medidas	26
3.5.6 Estimativa e extrapolação de vazão nas margens	26
3.6 Coeficiente de Nash-Sutcliffe	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 Área de estudo	31
4.2 Medição da vazão	31
4.2.1 Inicialização do sistema, configurações e ajustes	34
4.2.2 Referência para trajeto e profundidade	34
4.2.3 Teste do sistema	36
4.2.4 Calibração da bússola	36
4.2.4 Definição das margens	37
4.2.5 Travessia	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

TORRES, Felipe Alves. **Hidrometria com o uso do medidor acústico doppler de vazão**. 2018. 51 fls. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal-PB. 2018

RESUMO

Os medidores acústicos de vazão são ferramentas muito úteis à hidrometria por representarem uma alternativa eficaz e eficiente para os processos de medição de vazão. Este trabalho objetivou uma descrição detalhada dos procedimentos para medição de vazão utilizando medidor acústico com princípio de funcionamento baseado no efeito Doppler. Com o intuito de alcançar o domínio desta técnica e de sua metodologia para a realização de medições hidrométricas e fluviométricas a fim de obter a curva-chave do Rio Piancó, que cruza a zona urbana do município de Pombal-PB, para uma seção que se localiza à jusante da estação de captação de água para abastecimento público do município. Foi utilizado o aparelho S5 da SonTek para medição dos valores de vazão, em função do melhor funcionamento deste aparelho para rios pouco profundos. Foram encontradas duas curvas-chave, uma para baixa vazão, com altura linimétrica inferior a 90 centímetros, cujos parâmetros a , b e h_0 foram 1,5734; 4,3757 e 0; respectivamente e outra curva para vazões maiores, com altura linimétrica observada superior a 92 centímetros, cujos parâmetros a , b e h_0 foram 0,0093; 1,7045 e 92,3; respectivamente.

Palavras-chave: ADCP, medição de vazão, curva-chave

TORRES, Felipe Alves. **Hydrometry using acoustic doppler current profiler**. 2018. 51 pgs. Work of Course Conclusion Graduation in Environmental Engineering - Federal University of *Campina Grande, Pombal-PB*. 2018.

ABSTRACT

Acoustic doppler current profilers are useful tools to hydrometry, because represent an effective and efficient option to the process of flow measurement. This work consists of a detailed description for flow measurement processes using acoustic doppler profilers, whose objective is to achieve the mastery of this technique and methodology for hydrometry and fluviometry measurement. This technology was used in obtaining the Rio Pianco's key curve, which crosses Pombal city urban area, in a session located downstream of the water catchment station for human ablution. A SonTek S5 was used for the flow measurement, because its better operation for low depth rivers. Two key curves were found, one for low flow, with an observed linimetric height of less than 90 centimeters, whose parameters a , b and h_0 were respectively 1,5734; 4,3757 e 0 and another key curve, for high flow, with an observed linimetric height of greater than 92 centimeters, whose parameters a , b and h_0 were respectively 0,0093; 1,7045 e 92,3.

Keywords: ADCP, flow measurement, key curve

1. INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos é um assunto amplamente discutido pela comunidade científica e pelos diversos usuários, principalmente no tocante às perspectivas da sociedade sobre a preservação e os diversos usos deste recurso (RODRIGUES et al., 2005).

As informações hidrológicas são de extrema importância para o processo de tomada de decisão a respeito do gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente no que diz respeito à execução de projetos voltados à agricultura, transporte, geração de energia e meio ambiente (ANA, 2014).

Face a estas menções fica evidente a importância do conhecimento e disponibilidade de dados hidrológicos e principalmente de hidrometria, para a tomada de decisão acerca da gestão dos recursos hídricos para os diversos fins, desde a correlação entre estes dados e a construção civil de obras hidráulicas, até o gerenciamento e operação de reservatórios, a tomada de decisão sobre o direito de uso e outorga de captação em rios e até para a preservação de ecossistemas aquáticos.

Neste sentido, Guimarães et al. (1997) e Filizola et al. (1999) apontavam o *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) como um eficiente aparelho para a medição de vazão em rios, tanto pelo potencial de precisão e eficiência das medições obtidas pelo aparelho, uma vez que este é mais prático, menos oneroso e com maior amplitude de cobertura para a obtenção de dados de vazão.

Diante da importância e dos benefícios proporcionados pelo uso do ADCP na obtenção de medidas hidrométricas, Rodrigues et al. (2005) disseram que se faz necessário o uso dessa tecnologia, no intuito de modernizar e melhorar qualitativa e quantitativamente a coleta de dados.

Diante o exposto, fica evidente que o uso da tecnologia disponível nos aparelhos acústicos de medição de vazão, facilita e torna mais rápido, preciso e eficiente todo o processo de medição de vazão. A demanda de tempo e pessoal para a realização de medições de vazão com aparelhos acústicos, muito menor do que face a outros métodos, coloca os aparelhos acústicos como fortes expoentes para o processo de medição de vazão.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Explorar, dominar e aplicar o método de medição de vazão através de medidor acústico Doppler.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar vantagens e desvantagens do uso de medidor acústico em rios da região.
- Obter a curva-chave da seção de estudo

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Hidrometria e medição de vazão

A área da Hidrologia que estuda as variáveis hidrológicas cujo objetivo seja obter dados de precipitação, vazão, nível de água e suas respectivas variações no espaço e no tempo é chamada de Hidrometria (SANTOS et al., 2001).

A parte da Hidrometria que se relaciona com a medição de vazão e com as cotas de rios é chamada Fluviometria. O conhecimento dos dados estudados pela Fluviometria é de expressiva importância, devido a sua relevância do ponto de vista estratégico e gerencial dos recursos hídricos, incluindo os diversos usos consuntivos (abastecimento, irrigação, saneamento básico, entre outros) e não consuntivos (transporte, lazer, etc.) e também do ponto de vista ambiental, previsão de eventos de cheia, gerenciamento dos recursos para períodos de escassez e demais atividades envolvidas ao gerenciamento dos recursos hídricos (IBIAPINA et al., 2003).

Dito isto, podemos definir vazão como:

[...] volume de água que passa por uma determinada seção de um rio ao longo de uma unidade de tempo. Assim, se o volume é dado em litros, e o tempo é medido em segundos, a vazão pode ser expressa em unidades de litros por segundo ($L.s^{-1}$). No caso de vazão de rios, entretanto, é mais usual expressar a vazão em metros cúbicos por segundo ($m^3.s^{-1}$), sendo que $1 m^3.s^{-1}$ corresponde a $1\ 000 L.s^{-1}$ (litros por segundo). (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015, p.173)

A medição de vazão é um processo empírico cujo objetivo é quantificar a quantidade de um fluido que passe ao longo da seção transversal de um corpo, seja ele um rio ou um canal (ANA, 2014).

Existem diversos métodos para medição de vazão, que podem ser agrupados em cinco categorias gerais: por capacidade, por medição das velocidades do fluxo da água, por diluição de um traçador, por fórmulas hidráulicas e/ou dispositivo hidráulico correspondente, por outros métodos (óptico, eletromagnético, etc.) (TUCCI et al., 2015).

No presente trabalho o método adotado para medição de vazão consiste em um método de medição da velocidade da água. Conforme Boiten (2008), para realizar a medição da velocidade da água, pode-se usar aparelhos mecânicos

(molinetes) ou instrumentos eletroacústicos (como o ADCP, aparelho utilizado neste trabalho), em situações em que aparelhos como estes não estão disponíveis, a medição de velocidade pode ser feita com o uso de flutuadores, porém o resultado com este instrumento é menos preciso do que com os demais.

3.2 A tecnologia ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*)

Segundo Gamaro (2010, p.25):

Os medidores de vazão utilizando o efeito Doppler ficaram conhecidos como ADCPs, ou *Acoustic Doppler Current Profilers*, por ser o nome dado ao aparelho pelo fabricante que o tornou comercial. No Brasil, por facilidade de ser referir ao termo ADCP, estará subentendendo-se a um aparelho medidor de vazão Doppler genérico.

De acordo com Netto e Fernández (2015), o Perfilador de Corrente Acústico-Doppler (no inglês, ADCP) é um equipamento que utiliza o princípio do efeito Doppler para realizar medições de vazão, cuja utilização operacional começou em meados da década de 1960. O efeito Doppler foi descoberto por Christian Johann Doppler em 1842, na cidade de Praga, República Checa e é um princípio da Física que consiste na variação da frequência do eco em função do movimento das partículas na água, ou em qualquer fluido, devido à aproximação e afastamento com relação ao ponto de observação.

A tecnologia presente no ADCP serve como método para medição de velocidade da água. Com relação a essa tecnologia podemos adotar a seguinte definição:

[...] [os medidores acústicos, como o ADCP] funcionam emitindo pulsos acústicos (ultrassom) em uma frequência conhecida, e recebendo de volta o eco do ultrassom, refletido nas partículas imersas na água. A diferença das frequências dos sons emitidos e refletidos é proporcional à velocidade relativa entre o sensor e as partículas imersas na água. A suposição básica desse método é que as partículas suspensas na água se deslocam com a mesma velocidade do fluxo. (COLLISCHONN E DORNELLES, 2015, p.181)

ANA (2014) diz que a passagem de uma corrente elétrica pelos transdutores de cerâmica faz com que eles vibrem e emitam ondas sonoras que viajam pela água com frequência pré-estabelecida e que variam de acordo com o equipamento, de forma que para os aparelhos que utilizam este princípio temos opções numa faixa entre 300 kHz até 5 MHz (para o caso do aparelho S5 da SonTek, utilizado neste trabalho, a frequência emitida pelos transdutores é de 3 MHz).

De acordo com RDI (1989), durante o perfilamento o fenômeno de reflexão das ondas sonoras emitidas pelo aparelho em partículas localizadas a diferentes profundidades permite que os transdutores reconheçam tais posições com observação sobre suas respectivas profundidades, isso propicia a formação de um perfil vertical da coluna de água perfilada.

SonTek (2009) e ANA (2014) dizem que o processamento do sinal refletido é definido pelo próprio sistema do aparelho e pode se dar através do pulso incoerente ou *narrowband* (um pulso sonoro longo que ao ser refletido, serve para calcular a velocidade da água em função da diferença da frequência entre o pulso emitido e o recebido por reflexão), processamento coerente ou pulso a pulso (de maior precisão, consiste na emissão de um pulso curto, que ao ser refletido e recebido pelo transdutor, faz com que este emita um segundo pulso mais longo e assim sucessivamente, de modo que o sistema meça a diferença de fase entre os reflexos para calcular a velocidade através do efeito Doppler) e pela dispersão do espectro ou processamento *broadband* (emissão de vários pulsos simultâneos, o que acarreta em menor precisão, pois muitos reflexos são recebidos pelos transdutores, o que aumenta o ruído do sinal e conseqüentemente um desvio padrão maior, para a velocidade da água).

À medida que o ADCP processa o sinal refletido pelas partículas em suspensão na água, divide a coluna líquida em um número discreto de segmentos na vertical. Esses segmentos são denominados células de profundidade ou *bins*. O equipamento determina a velocidade do barco e da velocidade de processamento dos pulsos. (ANA, 2014, p. 64)

Sobre as vantagens do uso do ADCP para o processo de medição de vazões, Netto e Fernández (2015, p. 598) dizem que:

[...] boa rapidez no processo de medições e nos resultados, [...] mede toda a área da seção [extrapola superfície, margens e fundo], enquanto os métodos convencionais realizam amostragens, facilidade de operação [...], a medição não é influenciada por fatores externos como velocidade do rio e direção da embarcação, a medição não necessita de estabelecimento de referências de nível ou batimetria, as informações disponibilizadas pelo ADCP podem ser utilizadas para diversos objetivos, tais como: medir campos de velocidade, estabelecimento de modelos hidráulicos, levantamentos hidrográficos, estimar concentração de sedimentos, estudos de renovação de água em reservatórios etc.

3.3 Princípio Doppler

A ANA (2014, p.63) menciona que, “em resumo, efeito Doppler é a alteração da frequência sonora percebida pelo observador em virtude do movimento relativo de aproximação ou afastamento entre a fonte e o observador”.

A ocorrência do efeito Doppler é facilmente observada no cotidiano. A passagem de um veículo de emergência com a sirene ligada, seja uma ambulância, viatura dos bombeiros ou da polícia, tomando como referência um observador parado, a percepção do som varia de acordo com a posição do veículo, de forma que na aproximação o som torna-se mais alto e agudo conforme a distância entre o observador e o veículo diminui, devido ao aumento da frequência. Da mesma forma, após o veículo passar da posição do observador, o som tende a ficar mais baixo e grave gradativamente, devido ao afastamento da fonte emissora da onda sonora e da consequente redução da frequência da onda recebida pelo observador.

Segundo Gamaro (2008), a aplicação do efeito Doppler para a medição de vazão se dá em função das mudanças do eco (alterações na frequência sonora emitida pelos transdutores) conforme as ondas emitidas se chocam com partículas em suspensão na água, como sedimentos e plânctons (dito isto, faz sentido afirmar que os aparelhos acústicos de medição de vazão com princípio de funcionamento baseado no o efeito Doppler, não terão funcionamento em água destilada).

A mudança da frequência devido ao efeito Doppler é calculada pela Equação 1:

$$F_d = F_s \cdot \frac{v_r}{C} \quad (1)$$

Em que F_d é a diferença de frequência; F_s é a frequência emitida por uma fonte sonora; v_r é a velocidade relativa entre a fonte e o objeto; e C é a velocidade do som.

3.4 Curva-chave

Podemos definir curva-chave como:

A relação cota-descarga de uma seção permite calcular a descarga que corresponde a uma dada altura de água. Esta relação é determinada por

uma representação aproximada do traçado da curva de calibragem, feita a partir dos resultados das medições e apoiada na análise dos parâmetros de escoamento. A relação cota-descarga é apresentada sob três formas, geralmente associadas: à representação gráfica, à fórmula matemática e à tabela de calibragem. (TUCCI, et al. 2015. p. 510)

De acordo com Pinto et. al (2007, p.190):

As curvas-chaves exigem, em geral, para sua definição, uma série de medidas abrangendo distintos níveis de água mais ou menos igualmente distribuídos entre as estiagens e cheias. Quanto maior o número de medições, melhores os resultados, considerando-se a ordem de uma dezena o mínimo necessário para uma razoável definição da lei de variação nível-vazão.

A curva-chave assume um aspecto parabólico de eixo horizontal, descrita pela Equação 2 :

$$Q = a(h - h_0)^b \quad (2)$$

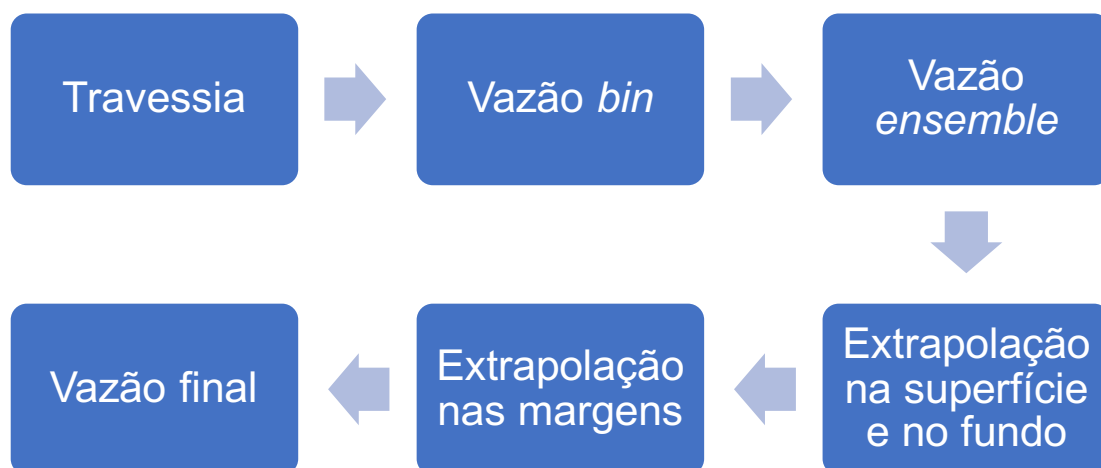
Em que Q é a vazão; h é a leitura da régua correspondente à vazão Q; h_0 é a leitura da régua correspondente à vazão nula; a e b são parâmetros constantes a serem ajustados de acordo com cada estação.

3.5 Medição de Vazão

O cálculo da vazão realizado pelo aparelho consiste no conjunto de vazões diretamente medidas e das vazões estimadas, nas áreas onde a medição direta não é possível. A vazão é calculada em *bins* (células de profundidade), *ensembles* (perfil de células de profundidade, um conjunto de *bins*) e extrapolada ou interpolada para o fundo e margens.

A Figura 1 apresenta um fluxograma simplificado do processo de medição de vazão com ADCP, demonstrando ao procedimento adotado pelo sistema durante a travessia ao longo da sessão, para a obtenção do valor representativo da vazão total ao longo desta sessão.

Figura 1 – Composição do cálculo da vazão

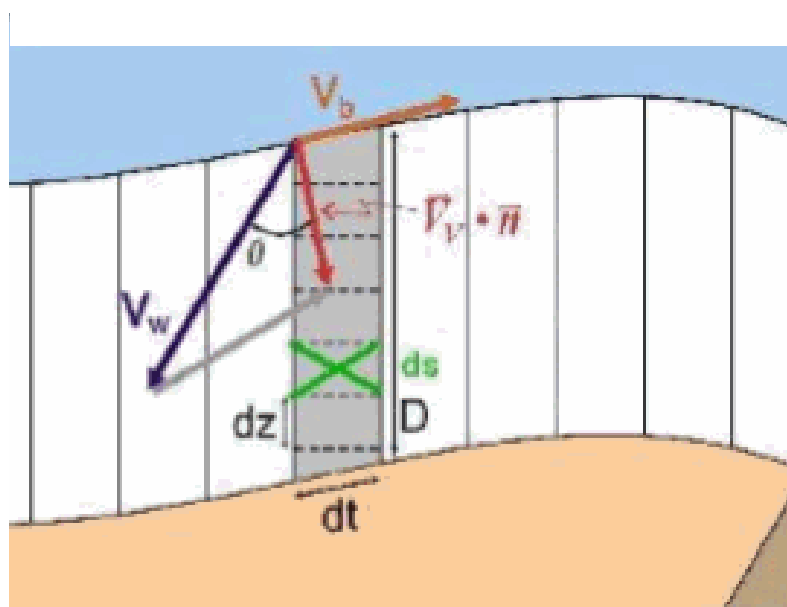


Fonte: Autor (2018)

3.5.1 Cálculo da vazão em um bin

As componentes necessárias para o cálculo da velocidade em uma célula de profundidade estão expostas na Figura 2:

Figura 2 – Cálculo da vazão em uma célula



Fonte: Simpson e Oltmann (2003) apud Gamaro (2010, p. 33)

Onde V_b é o vetor velocidade do barco; V_w é o vetor velocidade da água; $V_w \cdot N$ é o vetor normal unitário; D é a profundidade total perfilada; dz é o tamanho da célula (*bin*); w é a largura do perfil (*ensemble*); dt é o tempo entre os pulsos (*pings*); ds é a área da célula.

Dessa forma, tomando que:

$$Q = A \cdot V \quad (3)$$

$$A = ds = w \cdot dz \quad (4)$$

$$w = |\vec{V}_b| \cdot dt \quad (5)$$

$$ds = |\vec{V}_b| \cdot dt \cdot dz \quad (6)$$

$$V = \vec{V}_w \cdot \vec{n} \quad (7)$$

Então, tem-se que:

$$Q_{bin} = (\vec{V}_w \cdot \vec{n}) \cdot |\vec{V}_b| \cdot dz \cdot dt \quad (8)$$

$$(\vec{V}_w \cdot \vec{n}) \cdot |\vec{V}_b| \cdot \sin \theta \quad (9)$$

$$Q_{bin} = |\vec{V}_w| \cdot |\vec{V}_b| \cdot \sin \theta \cdot dz \cdot dt \quad (10)$$

$$|\vec{V}_w| \cdot |\vec{V}_b| \cdot \sin \theta = \vec{V}_w \cdot \vec{V}_b \quad (11)$$

$$\vec{V}_w \cdot \vec{V}_b = \vec{V}_{w_x} \cdot \vec{V}_{b_y} - \vec{V}_{w_y} \cdot \vec{V}_{b_x} \quad (12)$$

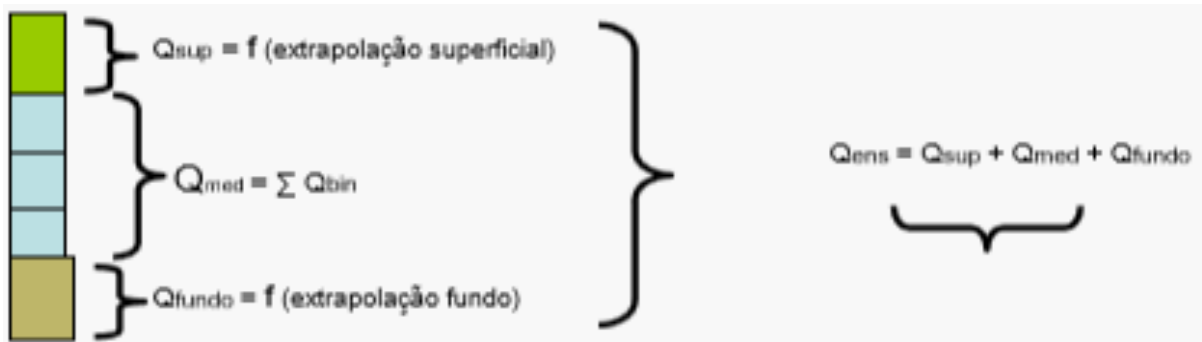
E ainda, o produto cruzado (X):

$$Q_{bin} = (\vec{V}_{w_x} \cdot \vec{V}_{b_y} - \vec{V}_{w_y} \cdot \vec{V}_{b_x}) dz \cdot dt = (X) \cdot dz \cdot dt \quad (13)$$

3.5.2 Cálculo da vazão em um ensemble

A composição do cálculo de um perfil de profundidade, composto por vários *bins* pode ser observada na Figura 3:

Figura 3 – Cálculo da vazão em um perfil



Fonte: Gamaro (2010, p. 35)

A vazão extrapolada é dada por:

$$Q_{extrap} = (V_{wy} \cdot V_{bx} - V_{wx} \cdot V_{by}) \cdot dz \cdot dt \quad (14)$$

Em que $(V_{wy} \cdot V_{bx} - V_{wx} \cdot V_{by})$ é estimado pelo método de superfície/fundo; dz é a distância da última célula válida à superfície ou ao fundo; dt é o tempo entre perfis (*ensambles*). E, com isso:

$$Q_{extrap} = (X_{extrap}) \cdot dz \cdot dt \quad (15)$$

3.5.3 Métodos de extrapolação para superfície e leito

De acordo com Gamaro (2010) e SonTek (2009), o aparelho de utiliza dos seguintes métodos de extrapolação para a superfície e leito: Extrapolação do Perfil de Velocidade, Constante, Exponencial, Três Pontos e Método *No Slip*.

Segundo SonTek (2009), a definição do método de extrapolação é feita pelo *firmware* (programa interno autônomo do sistema).

O método da Extrapolação do Perfil de Velocidade, de acordo com SonTek (2009), é utilizado para estimar as áreas que não são medidas no leito e na superfície da seção onde se realiza a medição. É um método teórico para modelar os perfis de velocidade numa coluna de água. Dessa forma, permite o cálculo da vazão nesta coluna, utilizando um perfil da Lei Exponencial de Velocidade (*Power*

Law Velocity Profile), proposto por Chen (1991) para o cálculo de velocidades acima e abaixo da área medida, seguindo a equação (15):

$$\frac{u}{u^*} = 9,5 \cdot \left(\frac{z}{z_0}\right)^b \quad (16)$$

Em que u é a velocidade à distância “ z ” do leito; u^* é a velocidade de turbulência (\sqrt{ghs}); z é a distância ao leito; z_0 é a altura da rugosidade do fundo; b é o expoente (para este caso, 1/6).

Se:

$$\left(9,5 \cdot \frac{u^*}{z_0^b}\right) = a' \quad (17)$$

Então:

$$u = a' \cdot z^b \quad (18)$$

Substituindo o produto cruzado (X) da equação (13) por u , temos:

$$X = a'' \cdot z^b \quad (19)$$

O método da Extrapolação Constante, segundo Gamaro (2010, p.35) “consiste em usar a última velocidade medida no fundo ou superfície e tomá-la como se todo o espaço não medido tivesse esta velocidade, e calculando com ela a vazão não medida”.

De acordo com Gamaro (2010) e SonTek (2009), o sistema RiverSurveyor, assim como o WinRiver (de outra fabricante de aparelhos de medição acústicos), utilizam o método de Extrapolação Exponencial aplicado à Lei Exponencial de Velocidade descrita anteriormente na equação (16), com expoente assumindo o valor de 1/6

Segundo Gamaro (2010, p. 35), o método da Extrapolação Três Pontos “toma as últimas três células para estabelecer uma inclinação, e usa esta inclinação para

extrapolar a área não medida, necessita pelo menos seis *bins*, ou utilizará o método constante”.

Segundo Gamaro (2010, p.36), o método de Extrapolação *No Slip* “consiste em usar os 20% finais de células da profundidade para determinar uma extrapolação exponencial terminando em zero por ser esta a velocidade do fundo”. Ver Figura 4:

Figura 4 – Curva de extrapolação



Fonte: Gamaro (2010, p.36)

3.5.4 Cálculo das vazões dos *Bad Bins*, *Lost Ensembles* e *Bad Ensembles*

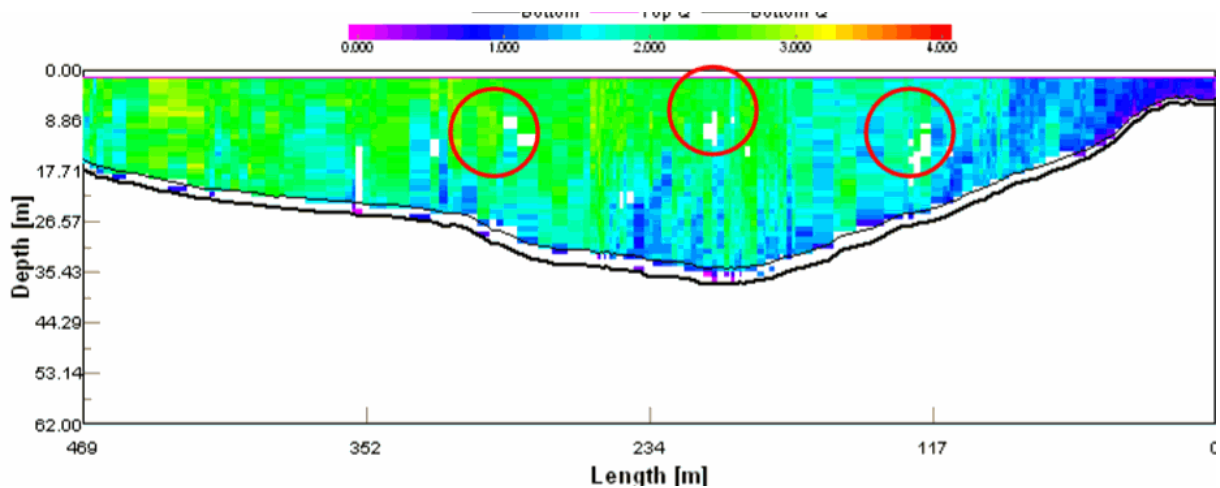
Segundo ANA (2014, v. 2, p. 72) “*bad bin* é uma célula com erro ou sem qualidade requerida”. De acordo com Gamaro (2010, p. 38):

[...] são células que não alcançam os padrões técnicos de confiabilidade do dado e por isso marcado como “*bad*”. Acontecem em qualquer parte da travessia, mas para calcular a vazão perdida pode-se dividir em três tipos de *bad bins*: os que estão encostados da área não medida na superfície, os que estão encostados na área não medida de fundo, e os que estão no meio da área medida.

Segundo Gamaro (2010), a correção de *bad bins* é utilizada a equação (15), em que simplesmente se aumenta a distância não medida (*dz*).

Bad bins apresentam-se como espaços em branco ou com falhas na coloração no gráfico de velocidades da travessia. Ver Figura 5.

Figura 5 – Bad bins



Fonte: Gamaro (2010, p.38)

Lost ensembles, segundo Gamaro (2010, p. 37):

[...] são ensembles em que o computador perde contato momentaneamente com o ADCP por isso na tela não aparece dados faltando, mas um ensemble excessivamente longo. Para calcular o *lost ensemble* o ADCP não tem o tempo da equação 14, então assume que o próximo ensemble válido tem um tempo longo que seria o tempo desde o último bom ensemble. Assim a vazão do *lost ensemble* é calculada de trás para frente.

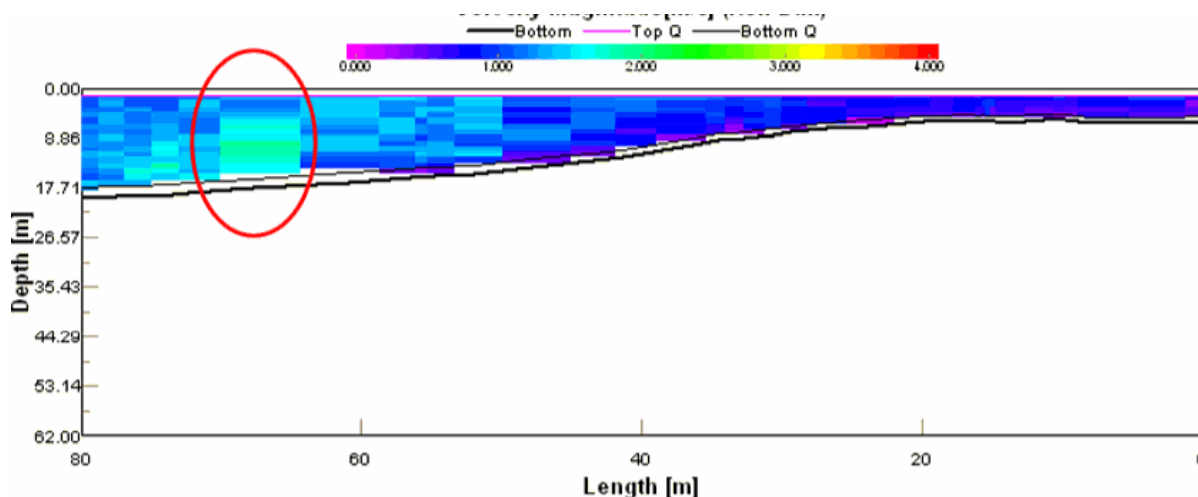
Desta forma, temos:

$$Q_{lost\ ensemble} = (X_{próximo}) \cdot dz \cdot dt \quad (20)$$

Em que dt é diferença entre o tempo dos últimos e próximos *ensembles* válidos.

O *lost ensemble* é caracterizado por um perfil vertical deformado e fora do padrão de largura dos demais perfis, apresentando um aspecto alongado. Ver Figura 6.

Figura 6 – Lost ensemble



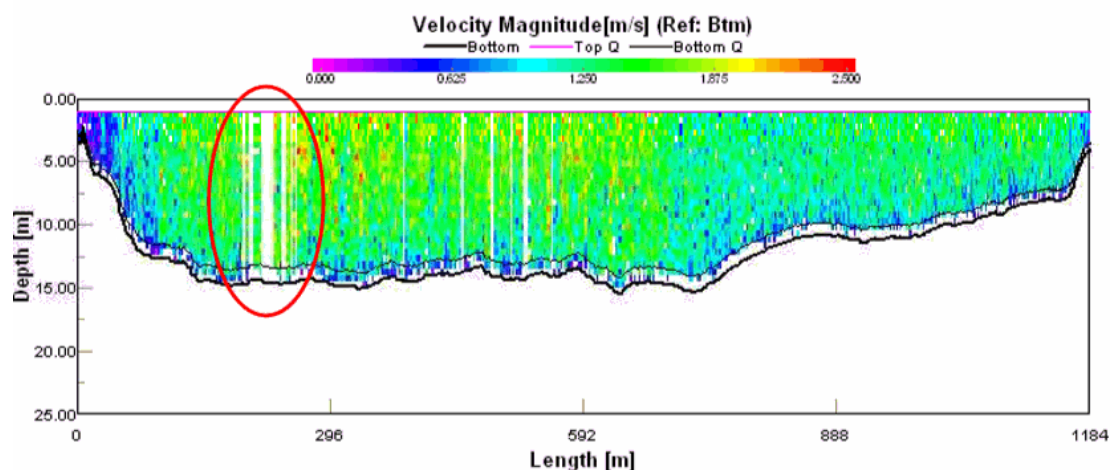
Fonte: Gamaro (2010, p. 37)

Bad ensemble é, segundo Gamaro (2010, p.37):

[...] não é um *ensemble* sem dados, mas um *ensemble* em que os dados não alcançam o critério para ser um dado válido de velocidade. Algumas causas são: a) perda de fundo; b) descorrelação do sinal acústico; c) baixo nível de retorno do eco. O cálculo da vazão deste *ensemble* é exatamente igual ao cálculo do *lost ensemble*, exceto que o dado bruto não está perdido, e em alguns casos pode ser recuperado através da mudança de *threshold*.

Em destaque na Figura 7, circulado de vermelho, alguns *bad ensembles*.

Figura 7 – Bad ensemble



Fonte: Gamaro (2010, p. 38)

3.5.5 Áreas não medidas

Segundo Gamaro (2010), em função das restrições do aparelho e da seção, em algumas áreas não são medidas as vazões, estas são calculadas através de extrapolação e interpolação. Estas áreas são: próximas à superfície, nas margens e no leito da seção.

A respeito disso, é preciso considerar que:

[...] a área não medida na superfície é devido ao somatório de uma restrição acústica do aparelho, chamado *blank*, e a área de imersão do mesmo. *Blank* é o espaço necessário para que os transdutores que são (mono estáticos) emissores e receptores parem de vibrar (após emitirem o som) e possam receber o sinal. No fundo também se tem uma área onde não é possível medir. O sinal emitido não fica restrito ao feixe acústico, mas se espalha ao longo da vertical. Este feixe paralelo (*side lobe*), por ter uma energia muito fraca, não causa ruído considerável ao longo da coluna de água, chegando ao fundo primeiro, devido ao ângulo de emissão, estes produzem um eco forte por encontrar uma superfície boa refletora e mais forte contaminando um espaço perto do leito. (GAMARO, 2010, p. 32).

Este espaço é calculado pelo sistema do aparelho e depende do ângulo de inclinação dos transdutores. A equação (20) representa o cálculo feito pelo sistema, em que α é o ângulo de inclinação que consta no sistema:

$$[1 - (\cos \alpha)] \cdot 100 \quad (20)$$

Sobre a estimativa de vazão nas margens, consideramos:

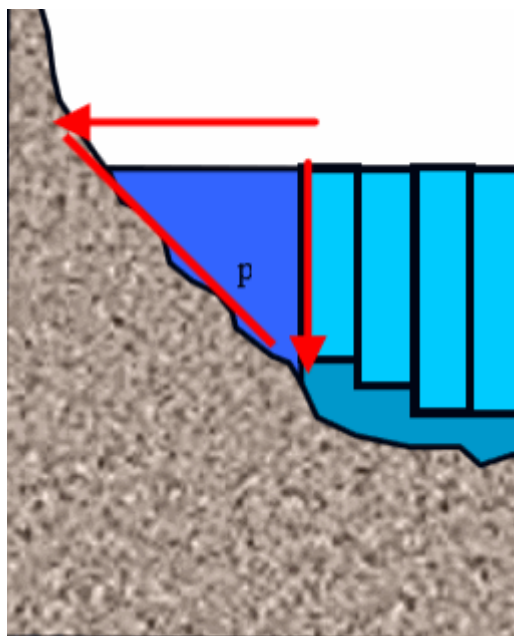
A vazão nas margens inicial e final é calculada de um perfil de velocidade média que é desenvolvida ao manter-se uma posição fixa (relativamente) em relação à margem. É importante que a embarcação seja mantida em posição mais estacionária possível nesta margem. Os perfis de velocidade medidos neste momento serão combinados para produzir um único perfil médio. O cálculo de vazão na margem é baseado na seleção de um barranco de inclinação uniforme ou vertical, e utiliza uma combinação da profundidade média e perfil de velocidade na margem. (SONTEK, 2009, p. 40).

3.5.6 Estimativa e extrapolação de vazão nas margens

Os dados de vazão para as margens são estimados de acordo com as velocidades registradas no início e término de cada travessia pelo próprio sistema,

deixando a embarcação em situação estacionária enquanto o aparelho faz o perfilamento relacionado à coleta de dez verticais. Ver Figura 8.

Figura 8 – Estimativa de vazão junto à margem



Fonte: Simpson e Oltmann (2003) adaptado por Gamaro (2010, p. 39)

Pela Equação 3 e tomando a margem de um rio, como uma seção triangular, temos a Equação 21:

$$A = \frac{1}{2} \cdot L \cdot p \quad (21)$$

Em que L é a distância e p é a profundidade.

Para a determinação da média das velocidades para multiplicar pela área, Fulford e Sauer (1986) apud Gamaro (2010), dão como sugestão o método da razão de interpolação como maneira para estimar as velocidades nas áreas não medidas junto às margens, seguindo a Equação 22:

$$\frac{v_x}{\sqrt{d_x}} = \frac{v_m}{\sqrt{d_m}} \rightarrow V_x = V_m \cdot \frac{\sqrt{d_x}}{\sqrt{d_m}} \quad (22)$$

Onde V_x é a velocidade média estimada entre a margem e a última medição; V_m é a velocidade medida no último/primeiro *ensemble*; d_m é a profundidade no primeiro/último *ensemble*; d_x é a profundidade da área não medida.

Pelo método da meia seção e assumindo $x = L/2$ e resolvendo a velocidade, temos a Equação 23:

$$V_{L/2} = V_m \cdot \frac{\sqrt{0,5 \cdot d_m}}{\sqrt{d_m}} = 0,7071 \cdot V_m \quad (23)$$

Assim, temos:

$$Q = A \cdot V = 0,5 \cdot L d_m + 0,7071 \cdot V_m = 0,3535 \cdot L d_m \cdot V_m \quad (24)$$

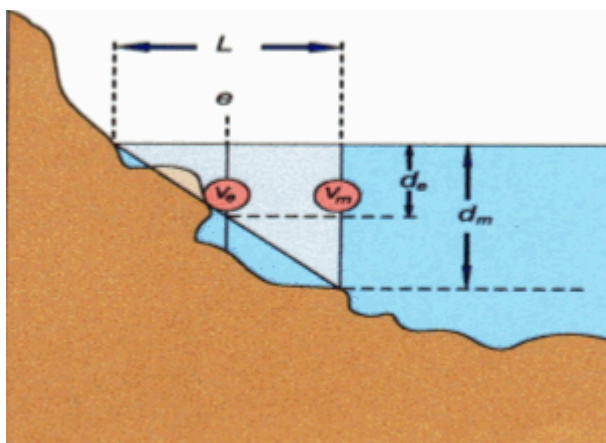
De acordo com Gamaro (2010, p. 40):

Para extrapolar as margens sendo conhecidos a velocidade do último ponto medido pelo ADCP, profundidade, e distância à margem, estimamos a velocidade no meio da distância entre o último/primeiro ponto medido e a margem utilizando a equação de Fulford & Sauer para *smooth wall* o coeficiente é 0,911 e 0,3535 para margem retangular e triangular, respectivamente.

É preciso realizar extrapolação junto às margens em função da baixa velocidade de água e da pouca profundidade, muitas vezes insuficiente para a leitura precisa do aparelho.

A Figura 9 é um exemplo de extrapolação junto às margens:

Figura 9 - Extrapolação junto às margens



Fonte: Gamaro (2010, p. 40)

O cálculo para extrapolação junto às margens está apresentado na Equação 25:

$$\frac{V_e}{\sqrt{d_e}} = \frac{V_m}{\sqrt{d_m}} \quad (25)$$

De acordo com Rantz et al. (1982) citado por Gamaro (2010, p.40) os coeficientes estão dispostos na tabela:

Tabela 1 - Coeficientes de Rantz et al

Distância da parede dividida pela profundidade	Média das velocidades perto da parede
0,0	0,65 VD
0,25	0,90 VD
0,5	0,95 VD
1	1,0V VD

Fonte: Rantz et al. (1982, p.82) apud Gamaro (2010)

A vazão para margens triangulares é obtida através da Equação 26:

$$Q_{marg} = 0,3535 \cdot V_m \cdot L \cdot d_m \quad (26)$$

O cálculo da vazão para margens retangulares é obtido através da Equação 27:

$$Q_{marg} = 0,911 \cdot V_m \cdot L \cdot d_m \quad (27)$$

Dessa forma, a vazão total será dada pela somatória de todas as vazões, apresentada na Equação 28:

$$Q_{total} = Q_{marg1} + Q_{superf} + \sum Q_{bins} + Q_{fundo} + Q_{marg2} \quad (28)$$

Onde Q_{total} é a vazão total da seção; $Q_{marg(i)}$ é a vazão extrapolada para margem; Q_{superf} é a vazão extrapolada para a superfície; Q_{bins} é a vazão para as células de profundidade e Q_{fundo} é a vazão extrapolada para o leito da seção.

3.6 Coeficiente de Nash-Sutcliffe

Para o coeficiente de Nash-Sutcliffe (C_{NS}) será aplicada a Equação 29, que segundo Zhang et al. (2007), indica o ajustamento dos dados do modelo aos dados observados, podendo variar de 0 a 1. O valor do C_{NS} se associa à eficiência do modelo estimar valores de vazão. De acordo com Zaapa (2002), valores de C_{NS} maiores que 0,5 qualificam o modelo para simulação Moriasi et al. (2007) apresentam a seguinte classificação para este coeficiente, disponível no Quadro 1:

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{cali})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{obs})^2} \quad 29$$

Quadro 1 – Classificação para o C_{NS}

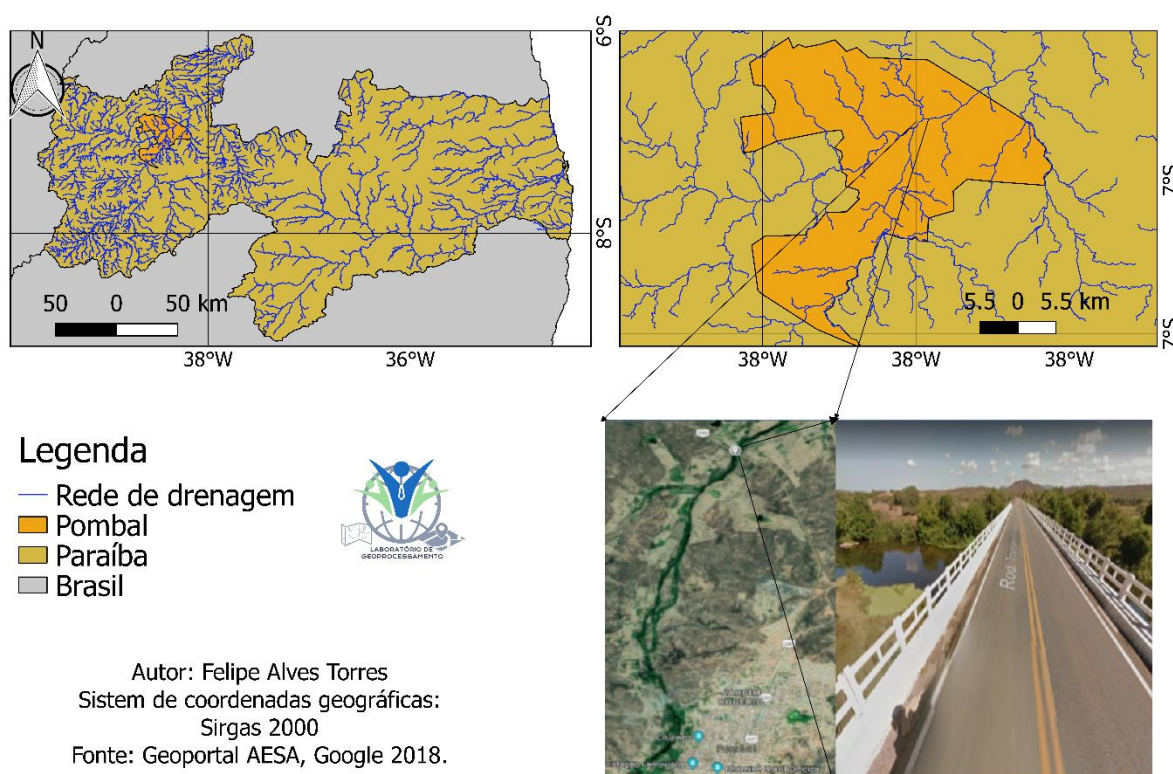
$C_{NS} > 0,65$	$0,54 < C_{NS} < 0,65$	$0,5 < C_{NS} < 0,54$
Modelo muito bom	Modelo bom	Modelo satisfatório

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O presente estudo ocorreu na bacia hidrográfica do rio Piancó, no trecho entre o sistema Coremas Mãe D'Água e sua foz no rio Piranhas, no município de Pombal-PB. A medição da vazão e do nível da água ao longo do tempo foi efetuada numa seção transversal do rio, a jusante da estação de captação de água para abastecimento de Pombal, localizada segundo as coordenadas geográficas $6^{\circ}49'07,30''\text{S}$ e $38^{\circ}50'00,48''\text{W}$, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Autor (2018)

4.2 Medição da vazão

As medições dos dados de vazão foram realizadas utilizando o aparelho RiverSurveyor S5 da Sontek. Este equipamento é propício para uso em rios de

pequeno porte, sem grandes profundidades, uma vez que a frequência das ondas emitidas por seus transdutores favorece o perfilamento de rios com esta característica. Segundo SonTek (2009), o aparelho tem alcance para perfilamento de velocidade entre 0,2 e 5,0 metros. No S5 há quatro transdutores de 3 MHz para medição de velocidade e um feixe acústico vertical de 1 MHz para medição de profundidade, que funciona como um ecobatímetro.

Antes de realizar as medições foi necessário intervir na região das margens do rio na seção escolhida, com o intuito de prepará-la para o acesso e estabelecimento do equipamento. Foi necessário fixar um cabo de aço entre as margens do rio, usado como guia para o trajeto mais retilíneo possível, na seção transversal por onde se deslocaria o equipamento durante as medições.

Para executar o deslocamento do S5 ao longo da seção de medição, foi utilizada uma prancha Sontek, modelo Hydroboard I, projetada especificamente para acoplar e transportar o equipamento acústico de medição de vazão. A prancha possui amarras que servem para fixá-la ao cabo de aço utilizado como guia para a travessia, desta maneira era possível seguir um trajeto mais preciso, pela transversal do rio.

É comum que medições de vazão utilizando aparelhos acústicos ocorram sem que seja necessário ao operador entrar em contato com a água utilizando alguns equipamentos para auxiliar na travessia, seja uma corda (muito comum em medições em canais de concreto) ou embarcações. Entretanto, uma vez que a seção escolhida não propiciava o uso de embarcação, por não ser profunda e a realização da travessia por meio de uma corda puxando o equipamento era inviável, se fez necessário que um operador conduzisse a prancha com o S5 ao longo do trajeto onde ocorria a medição.

A realização de processo de medição de vazão, para este caso, se deu sempre mediante a necessidade de participação de dois operadores, um ficava responsável pela operação do *software* e o outro responsável pela travessia.

Segundo SonTek (2009), o S5 dispõe de um sistema de comunicação sem fio do tipo *bluetooth* com alcance de 200 m, que interage com o programa RiverSurveyor Live instalado em um computador, sendo possível também realizar a comunicação direta entre o S5 e o programa através de um cabo de comunicação ou ainda utilizando o sistema *Radio Spread Spectrum (Radio SS)*, que consiste em

um sistema de espalhamento espectral de ondas de rádio, com um alcance de até 2 Km.

Na Figura 11, temos duas vistas do aparelho S5 da SonTek, utilizado na realização deste trabalho. Na imagem da esquerda, podemos ver em destaque os quatros transdutores laterais de 3 MHz e ao centro, o feixe vertical de 1 MHz.

Figura 11 – Perfilador Acústico Doppler SonTek S5



Fonte: Autor (2018)

A Figura 12 apresenta fluxograma que representa um esquema simplificado com as etapas principais para a medição de vazão utilizando um aparelho acústico, considerando que etapas preliminares como limpeza das imediações da seção, transporte de equipamentos e fixação do cabo para auxílio na travessia, foram adotadas anteriormente. Os passos destacados representam as etapas de uma medição completa, entretanto os três primeiros passos são executados somente antes da primeira travessia, sendo desnecessários para as travessias seguintes.

Figura 12 – Etapas principais da medição de vazão



Fonte: Autor (2018)

4.2.1 Inicialização do sistema, configurações e ajustes

Com o programa RiverSurveior Live aberto, as etapas preliminares para a realização da medição de vazão consistem da inserção de informações sobre a medição, tais como: nome do local onde ocorre a medição, número da seção, localização, participantes, barco/motor, número da medição e comentários. Estas informações não são obrigatórias para o processo em si, entretanto são úteis para organização das etapas e para o processamento de dados, em casos onde se fazem medições em várias sessões no mesmo dia, ou quando se faz necessário informar alguma peculiaridade ou evento específico presente durante a medição, como por exemplo, as condições do tempo, vento, entre outros.

Para cada medição realizada, foi necessário inserir no *software* as configurações do sistema, específicas para cada local. Nesta etapa é possível inserir dados como a profundidade em que estão inseridos os transdutores do S5, a região filtrada (uma distância que pode ser pré-definida pelo operador para a coleta de dados pelo S5), a salinidade, declinação magnética e as referências para trajeto e profundidade, além do sistema de coordenadas utilizado.

4.2.2 Referência para trajeto e profundidade

O ADCP calcula a velocidade da água utilizando o efeito Doppler nas partículas que se movem com a corrente, através da emissão de vários pulsos acústicos de frequência conhecida e seus reflexos quando se chocam com as partículas que se movem com a água no sentido do fluxo. Segundo SonTek (2009) quando o aparelho está em movimento, a velocidade calculada pelo S5 é o resultado de uma subtração entre velocidade do barco ou prancha que conduz o aparelho e a velocidade medida da água.

Para calcular a velocidade com que se desloca o aparelho, neste trabalho utilizamos o sistema de referência para trajeto chamado de *Bottom Tracking*, que consiste na estimativa da velocidade da embarcação, tomando como referência o leito do canal ou rio, através do efeito Doppler em ação sob feixe vertical do ecobatímetro (SONTEK, 2009).

Este método é eficiente e eficaz para situações em que não se observa a presença de um fenômeno chamado fundo móvel, que segundo Gamaro (2008) consiste na leitura por parte do ecobatímetro, de sedimentos que se movem junto ao fundo, como o sendo o próprio fundo, o que altera o cálculo de velocidade do barco e conseqüentemente da velocidade do fluxo e da vazão.

A escolha pelo método *Bottom Tracking* ocorreu após dois testes: teste estacionário e teste *loop*. De acordo com ANA (2014), o teste estacionário consiste em manter a prancha com o ADCP em situação estacionária, com o sistema ligado perfilando e calculando a velocidade da água e do barco. Para este teste, caso o sistema indique um valor de velocidade do barco, mesmo ele estando em situação estacionária, a ocorrência de fundo móvel é constatada. Segundo ANA (2014), o teste *loop* se dá através da realização de uma travessia completa (ida e volta), o objetivo deste teste é avaliar se o trajeto percorrido pela embarcação com o aparelho apresenta deslocamento à jusante do local onde se iniciou a travessia, o que evidenciaria a presença de fundo móvel.

Para este estudo, na realização dos testes de fundo móvel, não foi identificada velocidade do barco durante o teste estacionário, tampouco a ocorrência de deslocamento à jusante no teste *loop*, o que indica a não ocorrência de fundo móvel e conseqüentemente favorece a escolha do método *Bottom Tracking* como referência para velocidade.

A referência utilizada para a profundidade foi o feixe vertical, que segundo SonTek (2009) consiste numa sonda acústica (ecobatímetro embutido no aparelho) extremamente eficaz e precisa para a estimativa de profundidade.

4.2.3 Teste do sistema

Uma vez definidas as configurações e ajustes necessários, se faz necessário realizar um teste do sistema, para avaliar o funcionamento das partes que compõem o aparelho. Segundo SonTek (2009) um teste de sistema demora em torno de 60 segundos e faz verificações sobre as condições de funcionamento das baterias, bússola, do sensor de temperatura e demais componentes.

O teste retorna ao operador um resultado positivo, que atesta o bom funcionamento do sistema para a realização das medições e, se negativo, deve exigir intervenção no sistema, por parte do operador, para corrigir eventuais problemas identificados.

4.2.4 Calibração da bússola

Após o teste e validação do sistema é preciso realizar a calibração da bússola do aparelho, este procedimento se faz necessário para compensar as variações do campo magnético local. O processo de calibração dura em torno de 120 segundos, ao longo deste tempo é o preciso submeter o aparelho a alguns movimentos específicos para que a calibração ocorra com precisão.

A calibração da bússola deve ser feita o mais próximo possível da seção por onde o aparelho realizará a medição de vazão. O operador responsável pela calibração deve fazer movimentos que simulem as situações possíveis de ocorrer durante a travessia, como movimentos de guinada (*pitch*) e arfada (*roll*), além de promover rotações horizontais de 360°.

Finalizado o tempo demandado para o processo de calibração, o sistema mostra o resultado do mesmo. A leitura deste resultado infere na qualidade da calibração, em uma escala pontuada de notas para os procedimentos de guinada e arfada (*pitch and roll*) e para as rotações horizontais, bem como uma nota final para

todo o processo em uma escala variando de zero a dez pontos e uma indicação de aprovação ou reprovação do procedimento.

4.2.4 Definição das margens

Com os testes do sistema e calibração da bússola devidamente concluídos, é possível iniciar o sistema para o processo de coleta de dados de velocidade e vazão. Antes de iniciar a travessia, é preciso estabelecer as margens.

No programa RiverSurveyor se faz necessário delimitar a distância da margem direita, antes de iniciar a travessia. Este processo se torna mais eficiente com a utilização de um cabo de aço com marcações de distância. Neste trabalho, o cabo de aço utilizado para servir como guia durante a travessia, também era graduado. Nele haviam marcações a cada 0,5 metros, o que tornava mais fácil, preciso e eficiente a delimitação das margens direita e esquerda. Os valores adotados para as margens sempre estiveram em torno de 2 a 6 metros.

O processo de definição das margens demanda que o operador mantenha o ADCP numa posição tão estacionária quanto possível, enquanto o aparelho realiza a coleta de, ao menos, 10 amostras de margem. Assim sendo, quando a definição da margem é iniciada, o aparelho deve permanecer em posição estacionária enquanto o número mínimo de amostras é obtido, tanto para a margem direita, quanto para a margem esquerda, até que o operador encerre a amostragem das margens e autorize o início da travessia

4.2.5 Travessia

Após a definição da margem que antecede a travessia e sua respectiva coleta de dados, é iniciada a travessia para coleta dos dados de velocidade e vazão ao longo da sessão. Nesta etapa o operador deve manter a prancha ou barco se deslocando com velocidade e direção tão constantes quanto possível. A travessia deve ser feita com a embarcação se movendo com velocidade menor que a velocidade da água, para um melhor perfilamento.

Na Figura 13 temos o sistema pronto para iniciar o procedimento para coleta dos dados de vazão. O aparelho instalado na prancha para a travessia e esta já

ligada ao cabo de aço que serve de guia para orientação durante o trajeto ao longo da seção.

Figura 13 – ADCP instalado na prancha momentos antes de começar a coleta de dados



Fonte: Autor (2018)

Na figura 14, temos o operador fazendo procedimentos no programa RiverSurveyor para a inicialização da coleta de dados

Figura 14 – Operador realizando procedimentos no programa RiverSurveyor



Fonte: Autor (2018)

Uma travessia se finaliza após o perfilamento da margem de chegada do deslocamento, de modo tal que, caso a margem de início seja à direita, a travessia estará finalizada quando, ao chegar na margem esquerda, o sistema fizer o perfilamento completo desta e sua respectiva finalização.

Neste estudo foram utilizadas duas cordas com 2 metros de comprimento para realização das travessias, por dois operadores. De modo que um operador imprimia uma tensão para puxar a embarcação e o outro fazia uma tensão em sentido oposto, com o objetivo de reduzir a velocidade da prancha e tornar a travessia mais estável durante o percurso.

Na Figura 15 temos a prancha HydroBoard I antes da travessia.

Figura 15 – Prancha HydroBoard I com o ADCP antes da travessia



Fonte: Autor (2018)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 16 temos um exemplo de relatório de medição de vazão realizada pelo aparelho, esta é a versão detalhada do relatório, com registros escritos e representam uma das formas possíveis de visualização do registro de medição para a etapa de pós-processamento dos dados. Neste relatório constam informações gerais sobre a medição, como detalhes do local, informações pertinentes sobre a medição, informações e configurações do sistema, configurações da medição, os resultados para a calibração da bússola e para o teste do sistema e duas amostras de resultados: uma em versão resumida e outra em detalhes.

Tomando a Figura 16 para análise, as duas abas de maior interesse para este caso, são as abas que contêm os resultados da medição. A aba com informações resumidas evidencia uma largura percorrida de mais de 38 m, com área medida maior que 15 m^2 , velocidade absoluta média de $0,051 \text{ m.s}^{-1}$ e vazão total de $0,798 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Enquanto a aba detalhada aponta que estes dados se referem à primeira travessia do dia de medições. Há informações sobre a duração da travessia, as velocidades do barco (prancha) e da água na seção, bem como informações sobre a vazão na superfície, meio e fundo da seção e o percentual de vazão que fora medido pelo aparelho (sendo que a outra parte, fora extrapolada seguindo os métodos descritos anteriormente).

Figura 16 – Relatório de medição de vazão gerado pelo sistema

Detalhes do Local				Informações da Medição															
Nome do Local		Ponte do Arial		Participantes		3													
Código da Seção				Barco/Motor															
Localização		Rio Piancó/Piranhas		Nº da Medição															
Informações do Sistema		Configurações do Sistema				Unidades													
Tipo do Sistema	RS-S5	Prof. dos Transdutores (m)		0,00		Dist.	m												
Número de Série	1829	Região Filtrada (m)		0,00		Velocidade	m/s												
Versão do Firmware	1.02	Salinidade (ppt)		0,0		Área	m2												
Versão do Software	4.1	Declinação Mag. (graus)		0,0		Vaz.	m3/s												
						Temperatura	graus C												
Configurações da Medição				Resultados de Vazão															
Ref. para Trajeto	Bottom-Track	Método Margem Esq.	Margem Gradual	Largura (m)		38,990													
Ref. para Prof.	Feixe Vertical	Método Margem Dir.	Margem Gradual	Área (m2)		15,567													
Sist. de Coord.	ENU	Tipo Extrapolação Superf.	Lei Exponencial	Vel. Abs. Média (m/s)		0,051													
		Tipo Extrapolação Fundo	Lei Exponencial	Vaz. Total (m3/s)		0,798													
		Cota Inicial (m)	0,00	Profundidade máxima medida		0,762													
		Cota Final (m)	0,00	Velocidade máxima medida		0,548													
Resultados das Medições																			
Nº da trav.	Hora		Dist.				Vel. Méd.		Vaz.						%				
	#	Hora	Duração	Temp.	Trajeto	DMG	Larg.	Área	Emb.	Água	Esq.	Dir.	Superf.	Meio		Fundo	Total	LCTotal	Medido
1	M	00:13:41	0:02:09	27,0	25,56	24,99	38,990	15,567	0,198	0,051	0,00	-0,01	0,15	0,50	0,16	0,798	--	61,2	
				Média	27,0	25,56	24,99	38,990	15,567	0,198	0,051	0,00	-0,01	0,15	0,50	0,16	0,798	0,000	61,2
				Desvio Padrão	0,0	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,0	
				CV	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Tempo de Exposição: 0:02:09																			
Nº da trav.20180712100429.riv;																			
Coment.																			
Nº da trav.20180712100429.riv - ;																			
Calibração da Bússola																			
Nome do arquivo: CompassCal20180712095206.txt																			
Resultado: CALIBRADA CORRETAMENTE																			
Resultado é suficiente para boa exatidão da bússola.																			
Interferência magnética é muito fraca.																			
Resultado da Calibração: M9.00Q8																			
Testar Sistema																			
Nome do arquivo: SystemTest20180712095228.txt																			
Resultado: Sistema está operando normalmente																			
Parâmetros e configurações marcados com um * não são constantes para todos os arquivos.																			
Relatório gerado com RiverSurveyor Live v4.1																			

Fonte: Autor (2018)

Na Figura 17 temos um exemplo de gráfico de travessia. Nele consta uma amostragem do perfil da velocidade absoluta medida pelo aparelho ao longo da travessia, a leitura do leito do rio feita pelo ecobatímetro e a as áreas não medidas pelo aparelho.

A Figura 17 é oriunda da mesma travessia que gerou o relatório da Figura 16, nesta travessia a cobertura medida pelo aparelho foi de 61,2% da área total. Como podemos observar nessa área em branco abaixo do perfil de velocidade no gráfico

da travessia, que representa exatamente a área não medida, na qual ocorre extrapolação para estimar a vazão da seção.

Ao observar esta imagem é possível ter uma dimensão do quão preciso é o resultado obtido pelo ADCP na medição de vazão, uma vez que o aparelho traça um perfil completo da seção, ao invés de definir verticais de velocidades em áreas amostrais, como ocorre com o método tradicional, por exemplo.

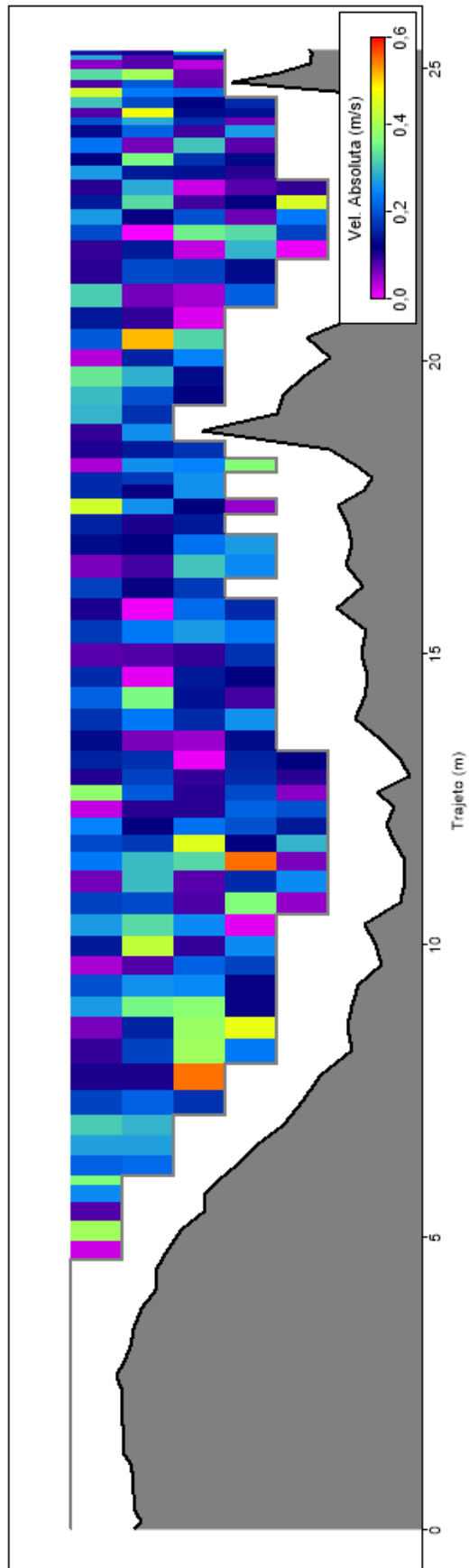
O ADCP mostrou-se como ferramenta que proporcionou uma medição mais rápida e precisa. Além de menos onerosa, tanto em termos de tempo, como de trabalho.

As Figuras 18 e 19 apresentam o gráfico de profundidade, medido pelo ecobatímetro e pelos transdutores laterais, e o gráfico da travessia pela orientação da bússola, respectivamente.

Nestas imagens podemos perceber pequenas variações entre as leituras de profundidade pelo feixe vertical e pelos transdutores, esta variação se dá principalmente pela presença de plantas aquáticas no leito do rio. O feixe vertical, por ter menor frequência e por ser posicionado diretamente para o fundo, sofre menos interferência por parte das plantas que se localizavam no leito da seção.

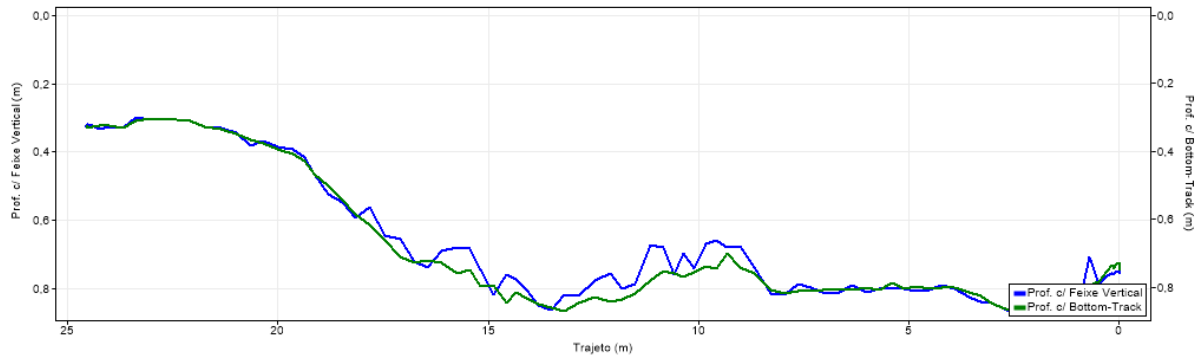
As Figuras 20 e 21 se referem ao teste de estacionário de fundo móvel. Na primeira, temos a representação do perfilamento feito pelos transdutores, com o intuito de observar se há ocorrência de velocidade da embarcação. A segunda, refere-se à posição da embarcação durante o perfilamento da margem, nela podemos observar que a embarcação encontra-se em um ponto realmente estacionário, o que indica a não ocorrência de fundo móvel.

Figura 17 – Gráfico de travessia



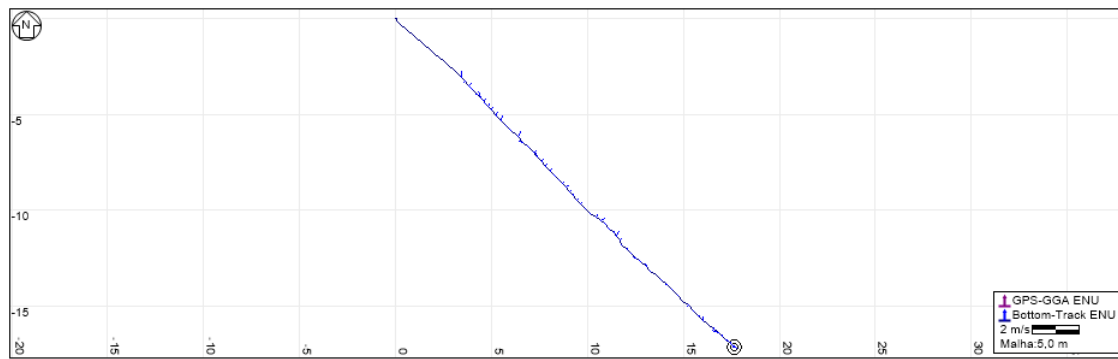
Fonte: Autor (2018)

Figura 18 – Gráfico da profundidade



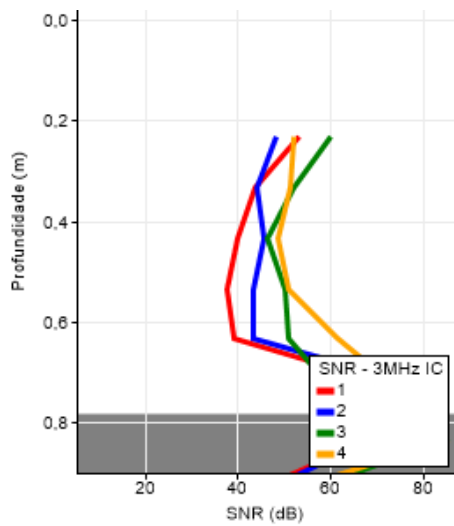
Fonte: Autor (2018)

Figura 19 - Gráfico do trajeto descrito pela bússola



Fonte: Autor (2018)

Figura 21 – Transdutores na margem



Fonte: Autor (2018)

Figura 20 – Leitura da posição na margem



Fonte: Autor (2018)

As leituras de vazão e da cota linimétrica utilizadas para a obtenção da curva-chave estão e as memórias de cálculo estão dispostas na Tabela 2:

Tabela 2 – Dados utilizados para obtenção da curva-chave

H (m)	Q _{obs}	Q _{cal}	(Q _{obs} -Q _{cal})	(Q _{obs} -Q _{cal}) ²
0,602	0,525	0,170772	0,12547753	0,8067
0,695	0,594	0,320194	0,074969817	0,68752
0,756	0,689	0,46269	0,05121618	0,539
0,826	0,8075	0,68167	0,015833103	0,37905
0,847	0,8075	0,760825	0,00217853	0,37905
0,869	0,8925	0,851168	0,001708375	0,28161
0,904	0,92	1,011704	0,008409633	0,25318
0,991	1,256	1,512409	0,065745667	0,02794
1,048	1,6475	1,931729	0,080786169	0,05033
1,113	2,25	2,513633	0,069502448	0,68365
1,151	3,12	2,911396	0,043515785	2,87924
1,190	3,569	3,368416	0,040234048	4,6046
Média	1,42317	Soma	0,579577284	11,5719
a	b	h₀	Coef. Nash-Sutcliffe	
1,573439552	4,37576	0	0,94991	

Fonte: Autor (2018)

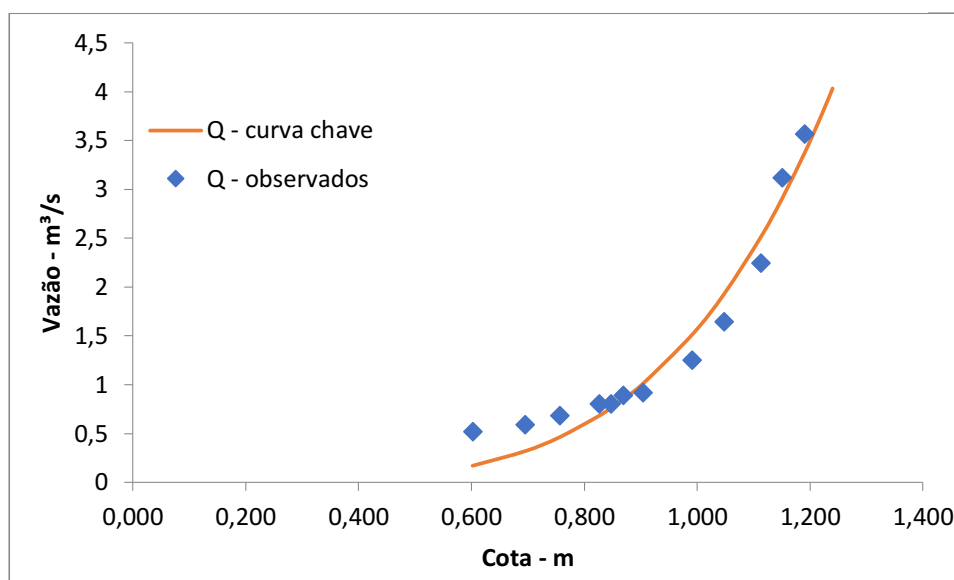
Na tabela acima, temos que H é altura linimétrica, em metros; Q_{obs} é a vazão medida pelo ADCP, em m³.s⁻¹; Q_{cal} é a vazão calculada pelo modelo, em m³.s⁻¹;

Os valores para os parâmetros a, h₀ e b da equação que define a curva-chave foram obtidos utilizando o Solver, estabelecendo como objetivo, minimizar o valor da soma dos valores obtidos pelo quadrado da diferença entre as vazões observada e calculada, alterando os valores de a, b e h₀.

A curva chave para a seção escolhida, em função dos dados observados de vazão e as respectivas alturas linimétricas, resultaram no gráfico apresentado na Figura 22, com maior aplicabilidade para ocasiões em que a altura linimétrica observada for menor do que 90 centímetros é descrita pela Equação 30:

$$Q = 1,5734 \cdot h^{4,3757} \quad (30)$$

Figura 22 – Curva-chave



Fonte: Autor (2018)

A curva-chave é uma ferramenta muito importante para o suporte da tomada de decisão a respeito dos recursos hídricos. É muito útil para reduzir a demanda de tempo e de recursos para medições de vazão, quando se faz necessário saber a vazão instantânea em determinada seção, uma vez que em posse da curva, para que se tenha conhecimento do valor da vazão, basta entrar com um valor de altura observado na régua linimétrica e interceptá-lo com a curva da vazão, para que se tenha um valor correspondente à vazão instantânea para aquela altura. Tal ferramenta torna desnecessária a realização direta de uma medição de vazão.

A partir de dados obtidos durante projetos vinculados ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI), dispostos na Tabela 3, construiu-se uma nova curva chave, cujos dados encontram-se na Tabela 4.

Tabela 3 – Dados obtidos durante o PIBITI

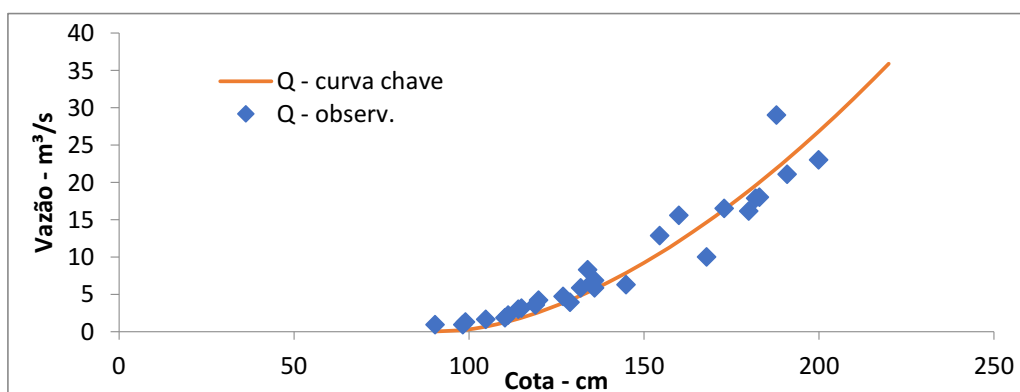
Data	Q (m³.s⁻¹)	h (cm)
03/08/2016	6,27	145
31/08/2016	3,90	129
26/09/2016	5,86	136
12/10/2016	4,20	120
16/10/2016	6,87	136
01/11/2016	5,86	132

20/12/2016	4,72	127
25/01/2017	9,99	168
26/01/2017	16,20	180
27/01/2017	18,06	183
28/01/2017	23,05	200
20/02/2017	6,74	135,5
21/02/2017	12,85	154,5
22/02/2017	21,10	191
23/02/2017	29,05	188
24/02/2017	17,90	182
25/02/2017	16,50	173
26/02/2017	15,63	160
02/03/2017	8,33	134

Fonte: Autor (2018)

E a nova curva chave, com aplicação mais eficiente para situações em que a altura linimétrica observada seja maior do que 90 centímetros, está na Figura 23:

Figura 23 – Nova curva-chave



Fonte: Autor (2018)

Tabela 4 – Dados utilizados para nova curva-chave

H (cm)	$Q_{obs}(m^3.s^{-1})$	$Q_{cal}(m^3.s^{-1})$	$(Q_{obs}-Q_{cal})^2$	$(Q-mQ)^2$
90,4	0,92	0,081428	0,703203	79,34198
98,3	0,96	0,168254	0,626861	64,46226
99,1	1,256	0,212344	1,089217	59,7968
104,8	1,6475	0,639463	1,016139	53,89526
110,3	1,865	1,218235	0,418304	50,74909
111,3	2,25	1,339493	0,829022	45,41195
114,2	3,02	1,717557	1,696358	35,62704

115,1	3,12	1,842687	1,631529	34,44327
119	3,569	2,426163	1,306077	29,37466
120	4,2	2,586316	2,603976	22,93298
127	4,72	3,822847	0,804884	18,22299
129	3,9	4,212084	0,097396	25,89629
132	5,86	4,824867	1,071501	9,789635
134	8,33	5,252323	9,472097	0,434069
135,5	6,74	5,582697	1,339351	5,057278
136	5,86	5,694667	0,027335	9,789635
136	6,87	5,694667	1,381408	4,48948
145	6,27	7,864162	2,541352	7,392087
154,5	12,85	10,45914	5,716195	14,90856
160	15,63	12,09869	12,47012	44,10502
168	9,99	14,65683	21,77926	1,002323
173	16,5	16,35733	0,020356	56,41754
180	16,2	18,86611	7,108138	52,00084
182	17,9	19,6099	2,923745	79,40879
183	18,06	19,98624	3,710391	82,28596
188	29,05	21,91204	50,95053	402,4502
191	21,1	23,10245	4,009825	146,6802
200	23,05	26,82827	14,2753	197,7162
MÉDIA	8,988839	SOMA	150,9167	1554,74
a	b	h₀	Coef. Nash-Sutcliffe	
0,009295	1,704538	92,83169	0,902931	

Fonte: Autor (2018)

A curva-chave da Figura 23 é descrita pela Equação 31:

$$Q = 0,0093 \cdot (h - 92,3)^{1,7045} \quad (31)$$

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a realização do presente estudo foi possível explorar de forma abrangente o método de medição de vazão utilizando o princípio Doppler por meio de aparelhos acústicos.

O domínio e aplicação do método e sua tecnologia foram úteis e eficientes para a realização da medição de vazão. O ADCP se mostrou uma ferramenta muito útil para a realização deste tipo de medida hidrométrica, devido principalmente à sua precisão, uma vez que traça um perfil de velocidade e vazão de toda a área da seção e à agilidade na obtenção dos resultados, de forma que em poucas travessias já é possível obter bons resultados para a vazão que passa na seção.

Durante a execução das medições, foi perceptível que para rios com profundidades baixas, em que é possível e seguro a entrada de operadores para conduzir o aparelho, e que a velocidade do fluxo seja baixa, como é o caso do rio objeto de

A obtenção da curva chave é extremamente útil para auxiliar na tomada de decisão sobre o gerenciamento dos recursos hídricos, além de ser uma ferramenta que proporciona redução de custos com relação à medição de vazão, uma vez que estabelecida a curva-chave, quando ser fizer necessário ter conhecimento da vazão que passa na seção, basta consultar a altura linimétrica registrada na estação e, com essa informação, cruzar o dado de vazão na curva para encontrar a vazão instantânea.

A partir deste estudo foi possível obter duas curvas-chave. Uma para períodos mais secos onde a vazão do rio é menor e se pode observar alturas linimétricas abaixo de 90 centímetros e outras para períodos onde ocorrem maiores vazões e a altura linimétrica observada nas réguas excede 92 centímetros.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. **Medição de descarga líquida em grandes rios: manual técnico**. 2 ed. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2014. 94 p.

BOITEN, Wubbo. **Hydrometry – A comprehensive introduction to the measurement of flow in open channels**. Londres: CRC Press, 2008. 247 p.

CHEN, C. I. **Unified Theory on Power laws for flow resistance**. Reston,: ASCE: 1991

COLLISCHONN, W. DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2 ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015.

FULFORD, J. M. SAUER, V. B. **Comparison of velocity interpolation methods for computing open channel discharge**. Washington: USGS, 1986. 154 p. apud GAMARO, Paulo. **VI Curso de medidores acústicos doppler de vazão**. Foz do Iguaçu: Agência Nacional de Águas, 2010.

FILIZOLA, N. P. et al. **Medição de vazão em grandes rios: uso do perfilador doppler acústico de corrente**. Brasília: SRH/MMA, 1999.

GAMARO, Paulo. **Medição de vazão pelo método acústico Doppler (ADCP) – avançado**. Foz do Iguaçu: Agência Nacional de Águas, 2008.

GAMARO, Paulo. **Primeira análise dos métodos para correção ou medição de vazão em seções com fundo móvel**. São Paulo: ABRH, 2008.

GAMARO, Paulo. **VI Curso de medidores acústicos doppler de vazão**. Foz do Iguaçu: Agência Nacional de Águas, 2010.

GUIMARÃES, V. S. et al. **O uso do ADCP para medição de vazão e estimativa do fluxo de sedimentos nos grandes rios da Bacia Amazônica**. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória, 1997

IBIPIANA, A. V. et al. **Evolução da hidrometria no Brasil**. 2003 Disponível em: <<http://mma.gov.br/port/srh/acervo/publica/doc/oestado/texto/121-138.html>>. Acesso em 18 de setembro de 2018

MORIASI, D. N. et al. **Model Evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations**. Kentucky: ASABE, 2007.

NETTO, J. M. A. FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de hidráulica**. 9 ed. São Paulo: Blucher, 2015. 632 p.

PINTO, N. L. S. et al. **Hidrologia básica**. 1 ed. 10 reimp. São Paulo: Blucher, 2007. 278 p.

RANTZ, S. E. et al. **Measurement and computation of streamflow: volume 1. measurement of stage and discharge**. Washington: USGS, 1982.

RDI. **Acoustis Doppler current profilers, principles of operation: a practical primer**. San Diego: RDI, 1989. 36 p.

RODRIGUES, M. S. et al. **Aquisição de dados hidrológicos para os sistemas de informações de recursos hídricos, quando começar?** São Paulo: ABRH, 2005

SANTOS, Irani et al. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Instituto de tecnologia para o desenvolvimento – LACTEC, 372 p. Curitiba, 2001

SIMPSON, M. R. OLTMANN, R. N. **Water-Supply paper 2395: discharge-measurement system using na acoustic current prolifer with applications to large Rivers and estuaries**. Washington: USGS, 2003. Apud GAMARO, Paulo. **VI Curso de medidores acústicos doppler de vazão**. Foz do Iguaçu: Agência Nacional de Águas, 2010.

SONTEK/YSI. **Manual do sistema RiverSurveyor S5/M9**. San Diego: SonTek, 2009. 122 p.

TUCCI, C. et al. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. 7 reimp. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2015.

ZAAPA, M. **Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales**. Tese de Doutorado em Ciência Natural. Zurique: Swiss Federal Institute of Technology, 2002.

ZHANG, H. G. et al. **Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China**. Kentucky: ASABE, 2007