

AVALIAÇÃO DO USO DO MEDIDOR DE VAZÃO DOPPLER COM FEIXE VERTICAL EM LEVANTAMENTOS BATIMÉTRICOS

Sergio Tilio¹; Paulo Everardo Muniz Gamaro²; Luiz Henrique Maldonado³

RESUMO – Tradicionalmente os levantamentos batimétricos são realizados com o auxílio de ecobatímetros. Atualmente, os “Acoustic Doppler Current Profiler” (ADCP) estão sendo utilizados para as medições das profundidades, porém utilizam o resultado da média de cada feixe acústico, o que gera um erro, às vezes, não perceptível. No presente estudo, há uma análise e comparação das profundidades geradas pela média dos quatros feixes inclinados de um ADCP com a profundidade pontual medida por um ecobatímetro. Para isso, é necessário que os equipamentos estejam sincronizados no tempo e no espaço. Deste modo, foi utilizado o equipamento ADP-M9, que possui um feixe vertical e oito inclinados, em canais artificiais e naturais com características diferentes entre si. Como resultado, as profundidades estimadas pela média de cada feixe resultaram em erros nos levantamentos batimétricos, devido as seguintes situações: interferência das rochas fraturadas localizadas no leito de rios em pequenas profundidades (erros de 19%), das paredes laterais em canais artificiais (erros de 15%) e de variações bruscas de profundidade (erros de 33%). Finalmente, o levantamento batimétrico realizado com a média das profundidades obtidas pelo ADCP deve ser utilizado com cuidado e em último caso.

ABSTRACT - Traditionally, bathymetric surveys are conducted with the aid of echo sounder. Currently, "Acoustic Doppler Current Profiler" (ADCP) are being used for the measurement of depths, but the depth is used by ADCPs average result of each acoustic beam, which generates an bias, sometimes not noticeable. This study is an analysis and comparison of the depths estimated by the average of four inclined beams of an ADCP to the depth measured at one point with echo sounder. It is necessary that the devices were synchronized in time and space. Thus, were used the ADP equipment-M9, which has a vertical beam integrated with beams in natural and artificial channels with different characteristics, allowing detailed analysis in the depths generated by using the vertical beam and the average depth of four inclined beams. As a result, the average estimated depth of each beam inserted errors in bathymetric surveys, due to the following situations: interference from fractured rocks in shallow waters (19% errors), the side walls in artificial channels (errors 15%) and rapid changes in depth (33% errors). Thus, the bathymetric survey conducted with the average depths obtained by the ADCP should be used with care and last resort.

Palavras-chave: Batimetria, ADCP, RiverSurveyor.

1) Técnico em Hidrologia da ITAIPU BINACIONAL, Av. Tancredo Neves, 6.731, 85866-900 Foz do Iguaçu-PR E-mail: tilio@itaipu.gov.br
2) Engenheiro Sênior III da ITAIPU BINACIONAL, Av. Tancredo Neves, 6.731, 85866-900 Foz do Iguaçu-PR E-mail: pemg@itaipu.gov.br
3) Engenheiro Junior da ITAIPU BINACIONAL, Av. Tancredo Neves, 6.731, 85866-900 Foz do Iguaçu-PR E-mail: lhmaldo@itaipu.gov.br

1. INTRODUÇÃO

Os rios possuem diferentes graus de assoreamento e erosão, dependendo de suas condições Hidromorfológicas. Tal dinâmica gera possíveis modificações das margens e do leito, tendo como consequência, alterações diretas em Curvas-Chaves existentes nas seções transversais (Correa *et al.*, 2005).

Além disso, as modificações do leito de um rio afetam os estudos de sedimentação e/ou erosão em reservatórios, localização de canais de navegação, calibração de modelos matemáticos e computacionais, calibração de modelos hidrodinâmicos, entre outros.

Uma das formas de se monitorar as modificações do leito de um rio é comparando perfis batimétricos. Entretanto, é preciso se tomar os seguintes cuidados: a localização da batimetria deve ser executada sempre na mesma seção transversal, para uma possível comparação posterior; as distâncias das profundidades coletadas devem ser coerentes com o local; ao se utilizar o System Global de Posicionamento (GPS) deve-se ter uma atenção especial em relação a posição da latitude e longitude fornecida pelo equipamento; medições da profundidade devem ser realizadas na vertical e com o equipamento aferido (Wilson *et al.*, 1996).

Com o surgimento dos equipamentos acústicos Doppler (ADCP), utilizados para medições de vazão, vem se tornando cada vez mais comum o uso desse equipamento para a realização de levantamentos batimétricos.

Atualmente, os quatro feixes são utilizados para a coleta das profundidades de modo independente, o que resulta em uma batimetria mais detalhada se comparada com o resultado obtido por intermédio de um ecobatímetro. Neste caso, deve-se utilizar o GPS com correção diferencial acoplado no ADCP para a determinação da posição espacial da profundidade coletada de cada feixe acústico. Assim sendo, cada feixe coletará uma profundidade com sua coordenada correspondente de modo independente (Dinehart e Burau, 2005).

Entretanto, nas seções transversais, as profundidades coletadas devem estar locadas exatamente na seção batimétrica (em duas dimensões: largura e profundidade), o que invalida o método de coleta da profundidade em cada feixe acústico, pois utilizam as três dimensões: latitude, longitude e profundidade.

Assim, diversos estudos e trabalhos estão utilizando o ADCP em levantamentos batimétricos, sendo que a profundidade utilizada é determinada a partir da média das profundidades medidas de cada feixe acústico, como em Correia *et al.* (2005) e Holanda *et al.* (2010). O uso do ADCP deve ser cuidadosamente analisado, pois os equipamentos Doppler estimam a profundidade através da média das profundidades coletadas de cada feixe acústico inclinado com a perpendicular (*e.g.*, quatro feixes). A suposição de que a profundidade média é igual à média das profundidades

coletadas de cada feixe induz a possíveis erros, sendo que os erros de maiores magnitudes ocorrem em locais de grandes aclives e declives (Gamaro e Túlio, 2005).

No ano de 2009, foi introduzido no mercado o equipamento “Acoustic Doppler Profiler ADP-RiverSurveyor-M9” doravante “ADP-M9”, que possui oito feixes para o perfilamento das velocidades da água. Além disso, foi integrado um feixe adicional na perpendicular como o de um ecobatímetro, que possibilita uma precisão maior na medição da profundidade. Com este feixe na vertical surge a possibilidade de ser utilizado em batimetrias, o que elimina os erros encontrados pela média das profundidades de cada feixe acústico.

Segundo Gamaro e Túlio (2005) foram encontradas diferenças maiores que um metro entre a profundidade medida pelo ecobatímetro com o resultado da média dos quatro feixes acústicos. Entretanto, os equipamentos não podiam ser sincronizados, sendo este intervalo de tempo um dos erros no resultado do trabalho. Além disso, os equipamentos estavam instalados nas laterais opostas da embarcação, o que gerava um espaçamento de 1,5m para a comparação.

Deste modo, nesta avaliação foi comparada a batimetria do feixe vertical com a batimetria dos quatro feixes inclinados do ADP-M9, de forma simultânea e sincronizada em seções transversais com pequenas e grandes profundidades; canais naturais e artificiais; e com diferentes rugosidades. Além disso, como a coleta foi realizada pelo mesmo equipamento (ADP-M9), foi eliminado o erro do espaçamento entre as referências de profundidades.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo comparar e analisar as profundidades obtidas pelas batimetrias realizadas em cinco seções transversais, utilizando para as coletas um equipamento acústico Doppler de vazão e um ecobatímetro de modo simultâneo. As seções transversais estão situadas em canais naturais de diversos tipos de leito e profundidades, e uma seção em um canal artificial.

3. EQUIPAMENTO UTILIZADO

O equipamento utilizado foi o ADP-M9 de fabricação Sontek (Figura 1), considerado um medidor acústico Doppler de vazão, com um ecobatímetro integrado. O medidor acústico transmite ondas sonoras através da água, com uma frequência preestabelecida. A profundidade é obtida após a reflexão do sinal acústico no leito do rio para o equipamento acústico, através do efeito Doppler.



Figura 1 – Equipamento RiverSurveyor ADP-M9

O ADP-M9 possui um transdutor (feixe) vertical e oito transdutores separados a cada 45 graus entre os mesmos e em 25° com a perpendicular (Figura 2). Dos oito transdutores, quatro são utilizados para perfilar velocidades em pequenas profundidades, *e.g.* menores que cinco metros, e os outros quatro transdutores são utilizados para profundidades entre cinco e quarenta metros (Sontek, 2011). O nono transdutor está disposto na vertical (perpendicular), para coleta de dados somente de profundidade pontual.

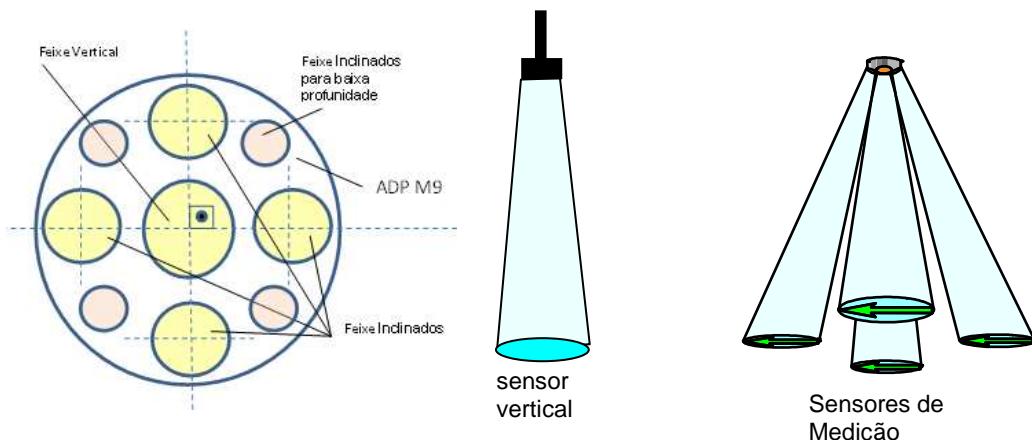


Figura 2 – Sensores do RiverSurveyor ADP-M9

4. METODOLOGIA

Com o equipamento acústico doppler (ADP-M9) foram realizados levantamentos batimétricos utilizando os seguintes métodos:

- medição da profundidade pontual utilizando o feixe vertical do ADP-M9;
- estimativa da profundidade a partir da média das quatro profundidades medidas com os feixes acústico inclinados do ADP-M9.

Na etapa de campo, o equipamento foi fixado na lateral da embarcação e conectado a um notebook. A batimetria consiste na realização de uma travessia, iniciando em uma margem e finalizando na margem oposta. A embarcação deve percorrer o alinhamento da seção batimétrica, utilizando-se para isso dois pontos de referências nas margens (Ponto Inicial-PI e Ponto Final-PF). Como os PI e PF situam-se em pontos para que os mesmos não fiquem submersos, foi utilizada uma trena a laser para medir suas distâncias com o primeiro e último ponto da batimetria. Esta referência permite a comparação da batimetria com as anteriores executadas na mesma seção.

Com o software de aquisição do ADP-M9, as profundidades obtidas pelo feixe vertical e médias das profundidades obtidas pelos quatro feixes foram exportadas para arquivos ASCII, para comparação.

Com o intuito de analisar as profundidades obtidas pelos dois métodos de aquisição, assim como o desempenho do equipamento e dos potenciais problemas que possa ocorrer, foram escolhidas cinco seções batimétricas com diferentes profundidades e rugosidade (Tabela 1).

Tabela 1 - Características das estações

Estação	Profundidade (m)	Largura (m)	Coordenadas			Tipo
				Norte	Este	
Canal da Piracema	1,9	60	21J	7184920,55	743093,11	Artificial
Porto Guarani	3,5	120	22J	7248770,01	321536,99	Natural
Porto Caiua	14,0	1200	22K	7423533,28	222692,47	Natural
Iate Clube Cataratas	58,0	460	21J	7171249,90	741679,60	Natural
Foz do Ivaí	6,52	315	22F	7421726,32	226350,41	Natural

As seções batimétricas foram escolhidas de forma a representar diferentes situações e características:

O primeiro problema, ou fonte de erro nos levantamentos batimétricos, obtidos com os equipamentos Doppler, ocorrem quando cada feixe acústico do equipamento medem diferentes profundidades para o mesmo instante. As diferenças das profundidades podem ser provenientes dos aclives ou declives existentes no leito do rio e na presença de seixos rolados em locais rasos. (Figura 3).

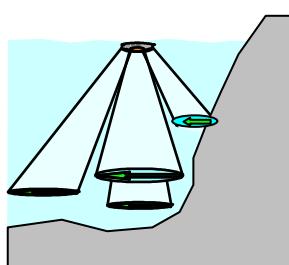


Figura 3 – Desnível do Leito

Um segundo problema ocorre quando há inclinação dos feixes com a vertical, pois os dois sensores opostos podem medir profundidades a grandes distâncias entre si (Figura 4), aumentando a probabilidade de haver uma diferença de profundidades entre dois sensores (Gamaro, 2008).

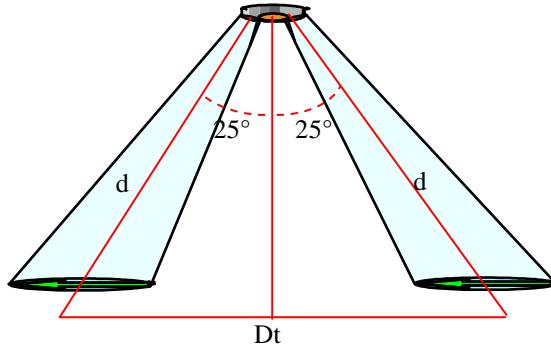


Figura 4 – Sensores do RiverSurveyor M9

$$Dt = 2 \times (d \times \text{Sen}25^\circ) \quad (1)$$

O terceiro problema ocorre em função da movimentação da embarcação em relação ao plano horizontal formado pelo nível d'água (N.A.). Qualquer tipo de movimentação da embarcação, como as ocasionadas devido às ondas ou da própria equipe embarcada, geram inclinações no eixo de bombordo-estibordo (transversais, intitulada “Roll”) e de proa-popa (longitudinais, intitulada “Pitch”). Segundo Simpson (1996), deslocamentos de pequenos ângulos na superfície resultam em erros diretamente proporcionais às profundidades medidas, tanto para o método da média das profundidades dos quatro sensores, assim como da profundidade medida pelo sensor vertical (Figura 5). Deste modo, as variáveis foram analisadas para que as mesmas não superassem 5° em relação à referência.

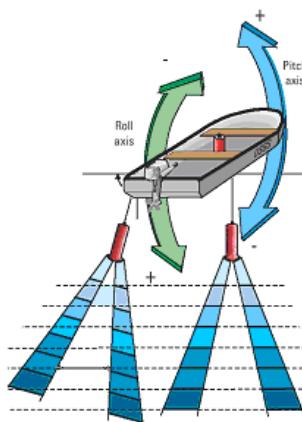


Figura 5 - Pitch e Roll

Considerando os problemas citados, a metodologia empregada consiste em subtrair as profundidades médias das profundidades obtidas pelos quatro feixes acústicos com as

profundidades obtidas pelo feixe vertical. A relação desta subtração pela profundidade na vertical indica o valor do erro que está sendo inserido no levantamento batimétrico quando o ADCP é utilizado.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No caso do Canal da Piracema, por ser um canal artificial com inclinações do talude Z igual zero na margem direita e 0,105 na margem esquerda, as paredes laterais influenciam nas coletas das profundidades. Nas verticais próximas às paredes laterais, um dos feixes inclinados do equipamento Doppler reflete na parede lateral, ao invés do fundo. Esta interferência pode ser visualizada no perfil da relação do sinal acústico com o ruído (SNR), conforme Figura 6.

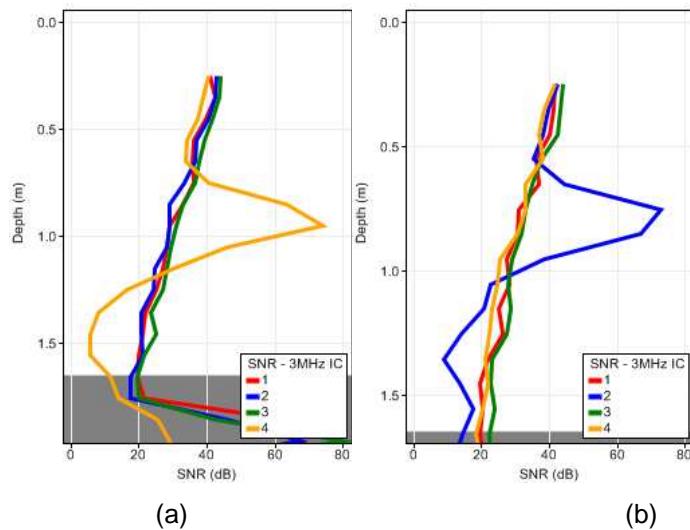


Figura 6 – Perfis obtidos pela relação do sinal acústico com o ruído pela profundidade. (a) Na margem direita, o feixe acústico número 4 é interferido pela parede lateral; (b) enquanto que na margem esquerda, é o feixe de número 2.

Os sensores 2 e 4 estão dispostos em 180° na horizontal.

De acordo com a Figura 6(a), nota-se que o feixe de número 4 mede uma profundidade de 0,88m, enquanto que os outros feixes medem 1,90m. Na Figura 6(b) nota-se que o feixe de número 2 mede uma profundidade de 0,83m, enquanto que os outros feixes medem 1,92m.

A diferença máxima de profundidade do feixe vertical em relação à média dos quatros feixes inclinados é de 15% (Figura 7). Para uma profundidade de 1,9m, este erro encontrado indica uma diferença de 29 cm, em valor absoluto, e uma diferença de área total de 2,5%.

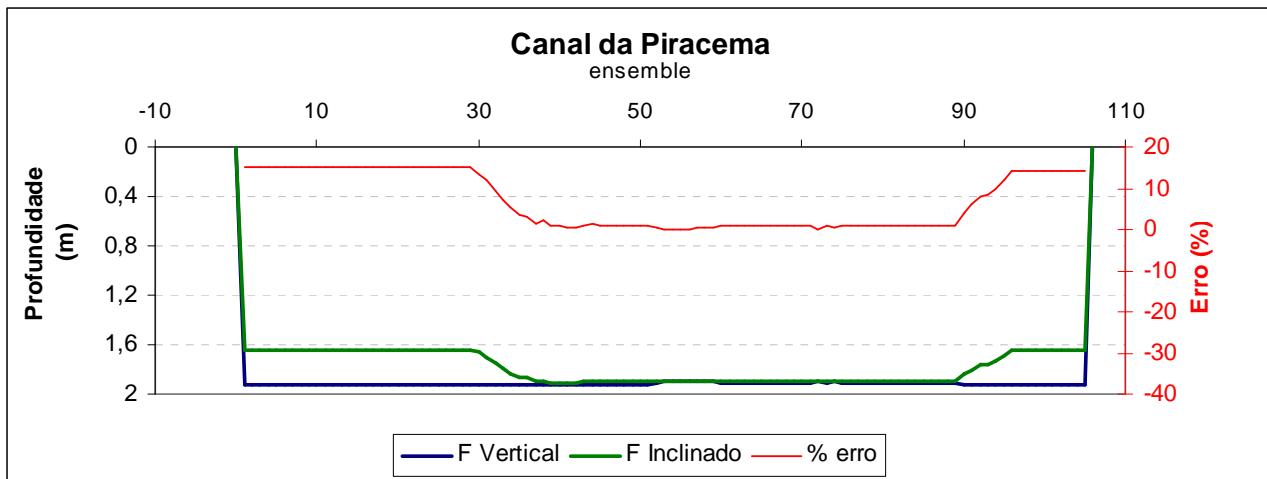


Figura 7 – Perfil Batimétrico do Canal da Piracema obtido com o feixe vertical (F Vertical) e com a média dos quatro feixes (F Inclinado), assim como sua diferença (% erro).

Segundo a Figura 7, nota-se que no trecho de fundo plano a diferença entre as profundidades é nula e na região próximas às paredes laterais o erro aumenta para 15%.

Na estação Porto Guarani, a diferença máxima de profundidade do feixe vertical em relação à média das profundidades obtidas pelos quatros feixes inclinados é de 19% ou 0,46m. A discrepância de resultado foi constatada devido à irregularidade do leito, formado por rocha fraturada. Enquanto que o feixe vertical detalha exatamente a realidade do contorno do leito, as médias das profundidades amortizam esta irregularidade do leito, mascarando o resultado.

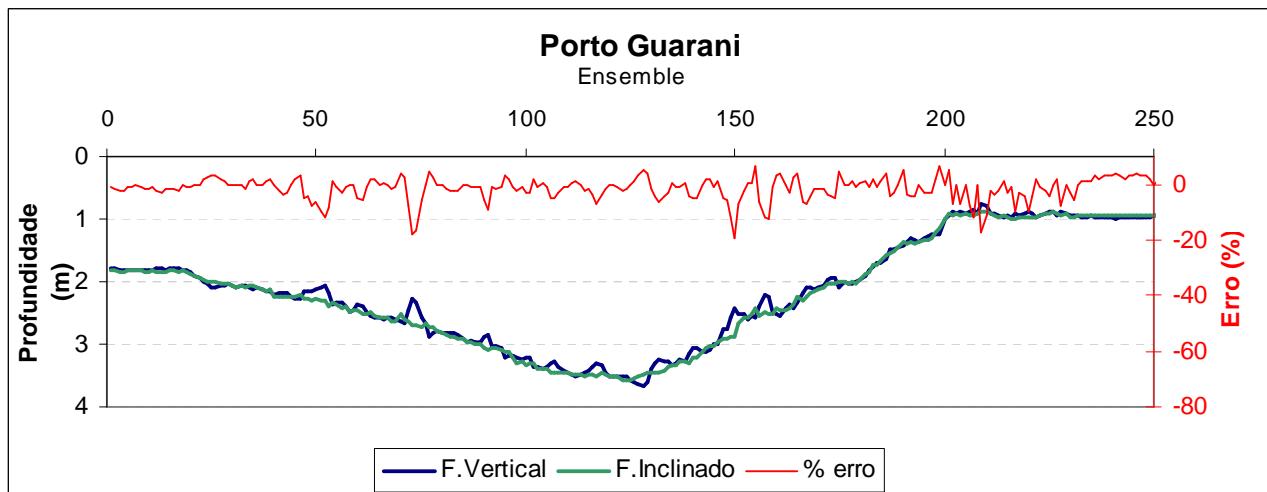


Figura 8 – Perfil Batimétrico de Porto Guarani obtido com o feixe vertical (F Vertical) e com a média dos quatro feixes (F Inclinado), assim como sua diferença (% erro).

Na Estação de Porto Caiuá, com 1200 m de largura, com leito regular de areia e sem desníveis acentuados, as diferenças de profundidade do feixe vertical em relação à média dos quatros feixes

inclinados foram menores que 10%, entretanto, em valores absolutos, a diferença máxima é de 0,81m (Figura 9).

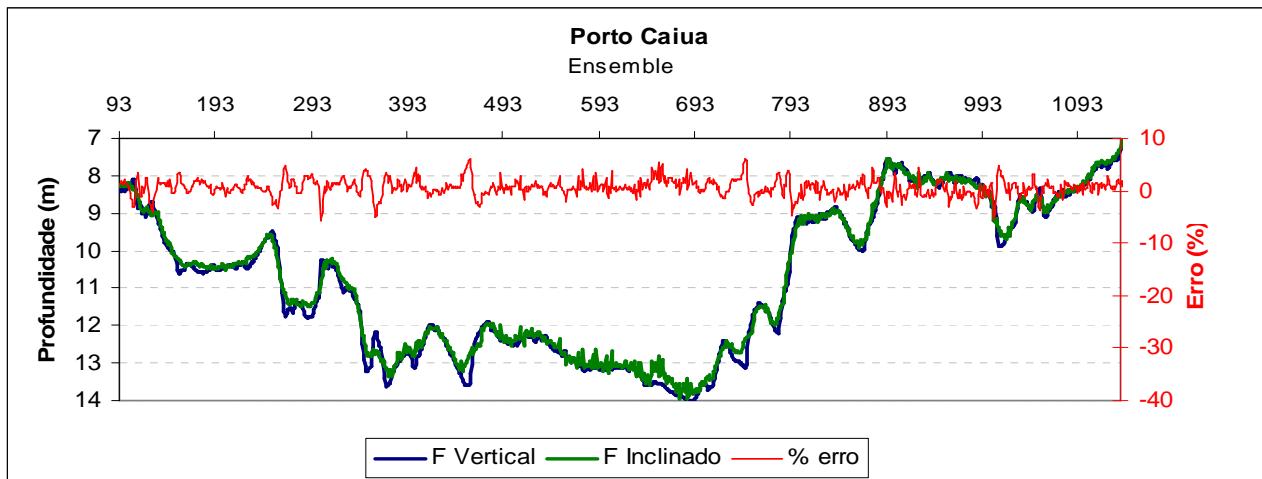


Figura 9 – Batimetria na Estação Porto Caiua

Além disso, nota-se que, em Porto Caiuá, os valores das profundidades médias obtidas pelos feixes acústicos subestimam as profundidades em locais mais profundos e as superestimam em locais mais rasos, o que indica de forma equivocada assoreamentos e erosões, respectivamente.

Na estação de Iate Clube, com largura de 460 m, leito de rochas fraturadas com desníveis acentuados, as diferenças de profundidade do feixe vertical em relação à média dos quatros feixes inclinados ficaram acima de 30%, ou 11 metros (Figura 10). Neste caso, o erro encontrado foi ocasionado pela variação acentuada de 58 para 32m de profundidade.

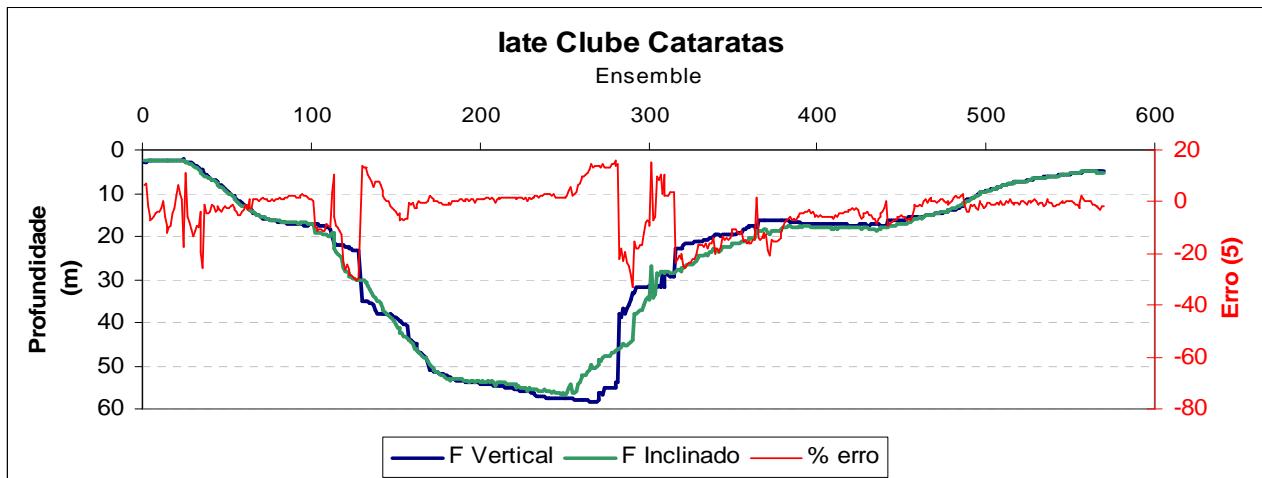


Figura 10 – Batimetria na Estação Iate Clube Cataratas

Analisando cada profundidade coleta pelos feixes acústicos (Figura 11), nota-se que nos locais com onde há presença de aclives e declives ou altos gradientes de profundidades, as profundidades coletadas com cada feixe acústico situam-se deslocadas transversalmente ao

escoamento. Neste caso, por exemplo, no ensemble 283 ocorre uma mudança abrupta de profundidade, porém os feixes 1 e 2 medem esta variação a 20 e 14 metros, respectivamente, antes do feixe vertical, enquanto que os feixes 3 e 4 medem esta variação a 14 e 18 metros após o feixe vertical. Assim, somente para esta variação abrupta de profundidade citada, o erro inserido na média das profundidades afeta no mínimo 38m de extensão da batimetria.

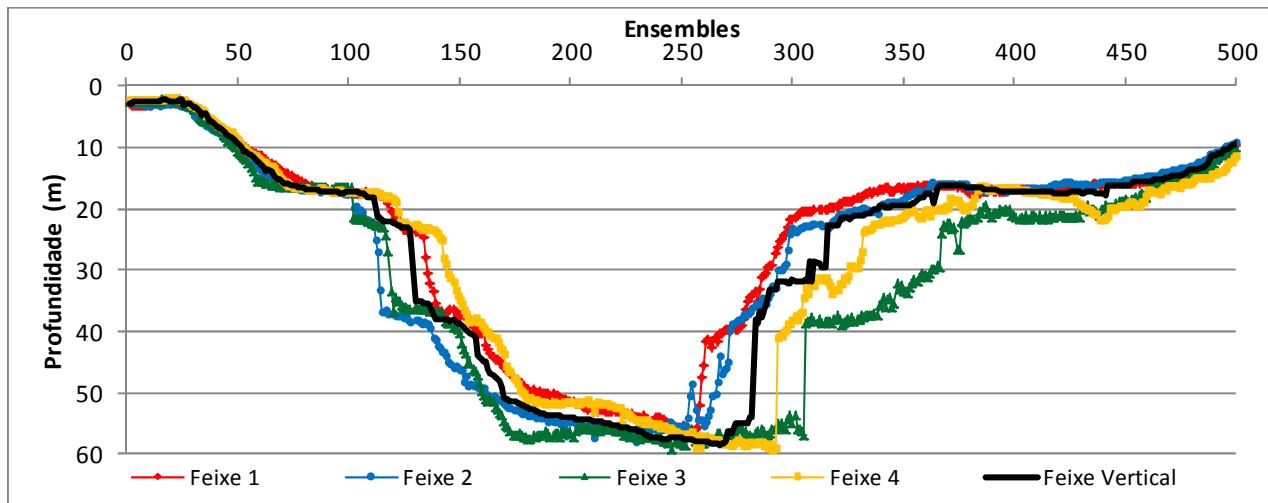


Figura 11 – Batimetria Iate Clube Cataratas: Profundidades coletadas para cada feixe acústico.

Na estação de Foz do Ivaí, com 315 metros de largura, com leito argiloso e sem desníveis acentuados, ocorreram problemas na detecção da profundidade por intermédio do feixe vertical. Para este caso, foram detectadas profundidades de 30 a 70m em locais onde a profundidade real é de 6 metros, o que resultaram em diferenças máximas de 64m e 92%. Assim, deve-se tomar o cuidado em não adotar as profundidades coletadas pelo ecobatímetro ou feixe vertical do ADP-M9 para este dia do levantamento realizado na estação de Foz do Ivaí.

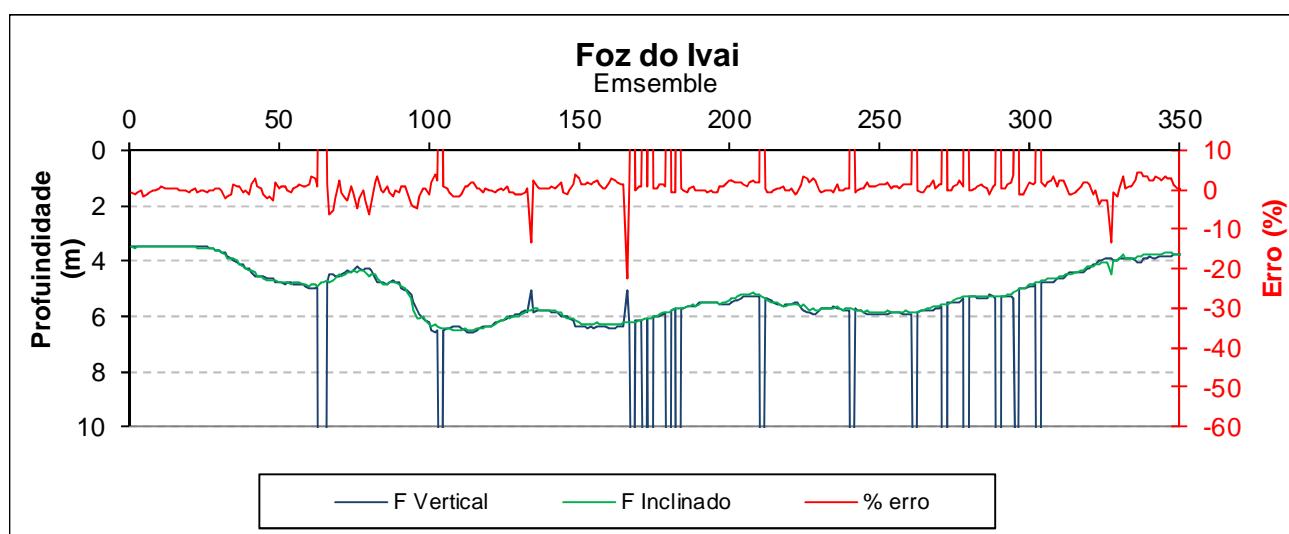


Figura 12 – Batimetria na Estação Foz do Ivaí

De modo geral, conforme o esperado, as seções batimétricas analisadas apresentaram as maiores diferenças de profundidades nos locais de maior variação no leito, com exceção da Estação Foz do Ivaí, que apresentou problemas na determinação da profundidade com o feixe vertical (Tabela 2).

Tabela 2 – Diferença (erro) entre as profundidades estimadas pela média das profundidades obtidas pelos quatros feixes acústicos com a do feixe vertical, para cada Estação (em módulo, em porcentagem e valor absoluto).

Estação	Erro máximo (%) [em módulo]	Erro máximo (m) [em módulo]
Canal da Piracema	15	0,29
Porto Guarani	19,1	0,46
Porto Caiua	8,6	0,81
Iate Clube Cataratas	33,3	11
Foz do Ivaí	92	64

6. CONCLUSÕES

O uso dos equipamentos Doppler para levantamentos batimétricos merece os mesmos cuidados utilizados em uma batimetria convencional, tais como: manter a sonda do ecobatímetro na vertical; se possível conhecer a seção (*e.g.*, Foz do Ivaí) e verificar se ela não tem desníveis abruptos; manter a velocidade da embarcação baixa durante as travessias, o que evita erros de leitura do equipamento e inclinações da embarcação (“Pitch” e “Roll”).

Entretanto, os erros causados pelo uso da média da profundidade coletada de cada feixe acústico do equipamento Doppler possibilitam conclusões errôneas, como: menores profundidades em canais artificiais e com margens verticais (*e.g.*, Canal de Iniciação); o não detalhamento do leito em locais com predominância de seixos rolados (*e.g.*, Porto Guarani) e de areia média a grossa (*e.g.*, Porto Caiuá) e má indicação do leito em altos gradientes de profundidade (*e.g.*, Iate Clube).

Todos os erros resultantes do uso da média das profundidades influenciam negativamente trabalhos consequentes, como estudos de sedimentação e/ou erosão em reservatórios, análises de curvas-chaves, localização de canais de navegação, entre outros. Assim, a variável “profundidade” deve ser confiável para que modelos matemáticos e computacionais resultem em dados confiáveis.

Todas as conclusões obtidas de um levantamento batimétrico utilizando um ADCP sem o feixe vertical devem ser cuidadosas e a batimetria só deve ser realizada com este método na falta de outro equipamento.

7. BIBLIOGRAFIA

- CORREA FILHO, C.R.R.; ALBERTIN, L.L.; MAUAD, F.F. (2005) “Determinação dos Polinômios Cota x Área x Volume Utilizando a Sonda Acoustic Doppler Profiler (ADP) no Reservatório de Barra Bonita - SP.” Revista Minerva JCR, v. 2, p. 79-90;
- DINEHART, R.L., BURAU, J.R. (2005) “Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river”
- GAMARO P.E.M.; TULIO S.; (2005), “Avaliação do uso de um medidor de vazão Doppler em batimetrias em reservatórios profundos” in I Congreso Paraguayo de Recursos Hídricos;
- GAMARO P.E.M.; (2008), “IV Curso de Medidores de Vazão Acústico Doppler” Apostila;
- HOLANDA, P.S.; BLANCO, C.J.C.; CRUZ, D.O.A.; LOPES, D.F.; BARP, A.R.B.; SECRETAN, Y. (2010). “Modelagem do Processo de Assoreamento do Lago Água Preta: Um dos Mananciais da Grande Belém”. In: IX ENES- Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2010, Brasília. Modelagem do Processo de Assoreamento do Lago Água Preta: Um dos Mananciais da Grande Belém;
- SIMPSON, M. (1996) “Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler”, U.S.G.S, Open File Report 01-1;
- SONTEK/YSI (2011) “Technical Note” <http://www.sontek.com/>. Acessado em 26 de maio de 2011;
- WILSON, J.T., MORLOCK S.E., and BAKER N.T. (1996) “Bathymetric Surveys of Morse and Geist Reservoirs in Central Indiana Made with Acoustic Doppler Current Profiler and Global Positioning System Technology”.