

Influência da amostragem na construção de superfície batimétrica de grandes rios – estudo de caso no Baixo Rio Negro - AM.

Rogério Ribeiro Marinho¹
Nayara Caroline Soares Duailibe¹
Naziano Pantoja Filizola Junior¹

¹ Universidade Federal do Amazonas – UFAM
Departamento de Geografia
Laboratório de Potamologia Amazônica – LAPA
Av. General Rodrigo Octávio, 6200, Coroado I - 69077-000 - Manaus - AM, Brasil.
rgeo@ufam.edu.br; nayarasoares15@hotmail.com; naziano.filizola@gmail.com

Abstract. This article investigates the representation of Negro River morphology near to Manaus city (Brazil) using bathymetric data acquired by an acoustic Doppler device with a GPS system in a 25 km² of water surface area. Geostatistical analysis methods were used to produce bathymetric maps in different sampling designs. The results in this study area indicated a average depth of 23.19 meters and amplitude up to 51.64 meters for the different sampling designs. Cross-validation was performed using Root mean square error (RMSE) to analyze the influence of sampling design in the depths estimative. Data evaluated with spacing profiles ranging from 100 to 500 meters showed RMSE varying from 1.01 to 2.21 meters. These results indicate that the methodology used in this article can be an alternative in collection and processing bathymetric data for Amazon large rivers.

Palavras-chave: bathymetry, geostatistics, Amazon, batimetria, geoestatística, Amazônia.

1. Introdução

A geomorfologia fluvial de um rio envolve a atuação de diferentes processos e formas resultantes do escoamento das águas, que por sua vez, estão relacionadas aos aspectos geológicos, climáticos e hidrológicos (CUNHA, 2013). A morfologia dos leitos de rios pode ser analisada através de dados de profundidade coletado por ecobatímetros em seções transversais. Muitas vezes, a coleta destes dados exige um grande esforço de recursos humanos e financeiros, especialmente na Região Amazônica. Tal realidade limita a disponibilização de dados com boa distribuição espacial e amostrados de forma sistemática em rios da bacia Amazônica.

A cartografia dos rios amazônicos sempre foi um desafio, no entanto a análise das formas do leito fluvial é de grande importância para o entendimento dos processos em curso desde a formação do canal, sendo importante não só para a ciência como também para a execução de obras de engenharia, como pontes, dutos, portos, dragagens, cabos de comunicação e usinas hidrelétricas. Nas últimas décadas houve uma diminuição nos levantamentos hidrográficos, e com isso, desatualização das informações batimétricas dos rios da região. Recentemente o poder público tem realizado esforços para produzir e atualizar documentos cartográficos da região, principalmente através do projeto Cartografia da Amazônia (BRASIL, 2015).

Apesar do empenho da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha para aquisição e processamento de dados batimétricos, percebe-se uma necessidade de desenvolvimento de métodos alternativos que possibilitem a visão em três dimensões das formas de fundo de grandes rios na região. Nessa lacuna surge a possibilidade do uso de dados hidrométricos coletados por Perfilador Doppler Acústico de Corrente (do inglês, ADCP). O uso de tal equipamento em conjunto com métodos geoestatísticos para a produção de mapas batimétricos traz grandes possibilidades de obter uma boa visão das formas do leito.

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo apresentar uma breve análise da morfologia do canal do Rio Negro, importante tributário do Rio Amazonas, na região em frente à cidade de Manaus-Amazonas, a partir de dados coletados por ADCP.

2. Área de Estudo

A área de trabalho situa-se nas proximidades da foz do Rio Negro, em frente à cidade de Manaus-Amazonas. De modo mais específico nas imediações da Ponte sobre o Rio Negro (Figura 1). Um dos dez maiores rios do mundo, o Rio Negro tem uma área de drenagem da ordem de 700.000 km², com grande importância para a Bacia Amazônica, pois apesar de drenar uma área de aproximadamente 14% da área total da bacia, sua contribuição em termos de vazão para o Rio Amazonas é da ordem de 15%, aproximadamente a mesma que a bacia do Rio Madeira cuja contribuição na área total da grande bacia é da ordem de 23% (FILIZOLA, et al., 2002).

Na região em frente à Manaus o Rio Negro apresenta trecho com até 08 km de largura e profundidades que podem chegar até mais de 50 metros no período de cheia. O leito é constituído de material arenoso de granulometria média a fina, mostrando-se mais silto-argiloso próximo às margens. As águas são negras com pH ácido, baixa concentração de matéria em suspensão e grande concentração de matéria orgânica dissolvida (LARAQUE et al., 2009). A velocidade da corrente é baixa ao longo do ano, com valores que podem variar de 0,6 m/s a 0,1 m/s (FILIZOLA et al., 2009).

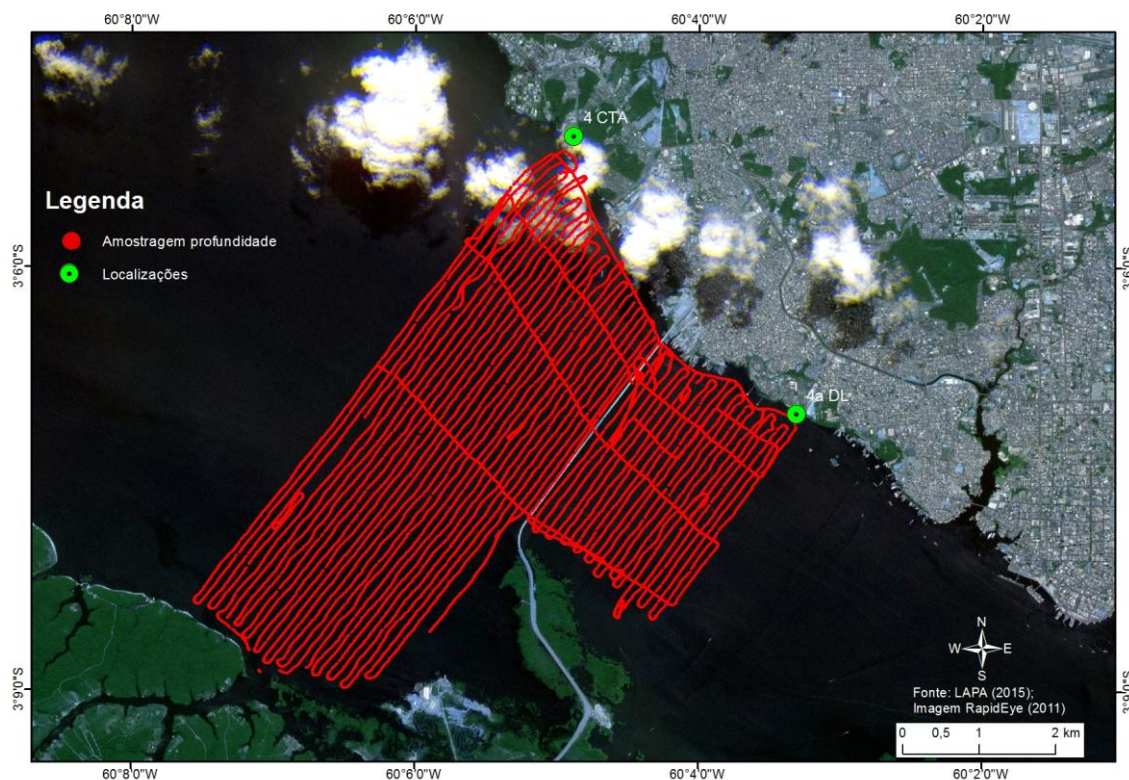


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e traçados dos dados batimétricos.

3. Material e Métodos

O trabalho foi executado em duas etapas: 1) Aquisição dos dados de profundidade em campo e; 2) Processamento geoestatístico em escritório.

3.1 Aquisição dos dados em campo

Os dados batimétricos foram coletados através de um ADCP, modelo Rio Grande, operando em 600 kHz (Teledyne RD Instruments, 2016), instalado ao lado de embarcação regional amazônica e mergulhado a ~60 cm da linha d'água. O equipamento foi programado para uma taxa de aquisição de 5 bins por segundo, sendo gerenciado através do software WinRiver II. Além do gerenciamento e armazenamento dos dados, o mesmo software também

adquiriu, simultaneamente, dados de posicionamento global obtido via satélite através do receptor GPS da marca Trimble, modelo R4.

A expedição de campo para coleta dos dados foi executada entre os dias 08 e 11 de janeiro de 2015. A obtenção dos dados se deu seguindo perfis transversais ao canal do Rio Negro, predefinidos sobre imagem de satélite georeferenciada. Os perfis transversais respeitaram um espaçamento entre si da ordem de 100 metros, além de quatro perfis longitudinais com espaçamento variável face à diferença de largura do canal. O valor de cota média do nível do Rio Negro no período, segundo o registro da régua linimétrica do porto de Manaus, estava em 21,96 metros, valor dentro da média histórica observada para o período de enchente do rio.

No total 60 perfis foram coletados no período do estudo, gerando um total de 22.224 pontos de dados de profundidades para uma área total de 25 km². Os dados dos perfis (latitude, longitude e profundidade) coletados pelo ADCP foram convertidos para o formato ASCII (x, y, z) fazendo uso de rotina computacional específica disponível no software WinRiver II. Após a conversão os dados foram importados para planilha eletrônica de cálculo e trabalhados em Sistema de Informações Geográficas (SIG) para os processamentos geoestatísticos.

3.2 Análise Geoestatística

Para as análises geoestatísticas utilizou-se o software GS+7 e para a interpolação dos dados e elaboração dos mapas temáticos utilizou-se o SIG ArcGis 10.1. Através de uma análise exploratória verificou-se a variabilidade dos dados utilizando histogramas, estatísticas descritivas (medidas de tendência central e de dispersão) e análise de tendências, para orientação do processamento geoestatístico dos dados.

Para a elaboração dos mapas batimétricos, visando a representação da morfologia fluvial do Rio Negro na região do estudo, semivariogramas experimentais foram analisados. O desenvolvimento dos semivariogramas experimentais teve por objetivo verificar a correlação espacial entre os dados e fornecer os coeficientes variográficos efeito pepita (*nugget*), patamar (*sill*) e alcance (*range*) que são utilizados pela krigagem na interpolação das superfícies (LANDIM, 2006).

A interpolação das superfícies batimétricas, executada através da krigagem ordinária disponível no pacote *Geostatistical Analyst* do ArcGis 10.1, teve a finalidade de identificar a influência do tamanho da amostragem entre perfis para a estimativa das formas do leito do rio Negro. A krigagem é uma técnica de interpolação que minimiza a variância dos erros e possibilita criar mapas da incerteza. Foram produzidos quatro modelos de superfícies batimétricas, geradas a partir dos dados coletados, porém processados com espaçamentos diferenciados entre os perfis, a saber: 100, 200, 300 e 500 metros.

3.3 Avaliação dos modelos

Antes do desenvolvimento dos semivariogramas experimentais, um conjunto de 2.222 pontos independentes foi selecionado aleatoriamente (10% do total amostrado) e separados para avaliar os resultados das superfícies interpoladas através do cálculo do Erro Médio Quadrático (RMSE). O RMSE foi calculado a partir da comparação dos valores de profundidades dos pontos de referência, com os valores de profundidades estimadas pela krigagem por meio da seguinte expressão:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Z_i - Z_{ref})^2}{N}} \quad (1)$$

onde Z_i são as profundidades da superfície estimada, Z_{ref} são as profundidades medidas nas campanhas e não usadas na interpolação, e N é o número de pontos considerados.

Perfis transversais sobre os diferentes modelos batimétricos foram elaborados a fim de realizar uma avaliação qualitativa das formas em diferentes pontos da área em estudo.

4. Resultados e discussão

Os dados coletados foram separados em três conjuntos em função do desenho amostral de 100, 200, 300 e 500 metros de espaçamento entre perfis transversais. A Tabela 1 apresenta as estatísticas descritivas dos quatro conjuntos de dados avaliados. Os dados coletados mostram uma profundidade média de 23 metros e amplitude de até 51 metros para os diferentes desenhos amostrais.

Tabela 1. Estatísticas descritivas dos diferentes conjuntos de dados.

Conjunto de Dados	100 x 100	200 x 200	300 x 300	500 x 500
Observações	20.002	10.746	8.120	6.006
Número de perfis	60	30	20	12
Profundidade média (m)	23,11	23,62	23,48	24,95
Profundidade máxima (m)	54,97	52,71	54,97	51,46
Profundidade mínima (m)	3,33	3,33	3,33	3,33
Mediana (m)	24,82	25,19	24,99	26,27
Desvio Padrão	10,90	10,81	10,69	10,61
Assimetria	-0,13	-0,20	-0,16	-0,29
Curtose	2,13	2,14	2,22	2,36

Após a análise exploratória dos dados de profundidade foram desenvolvidos semivariogramas experimentais para representar o conjunto de dados. Após o teste de diferentes modelos matemáticos na análise variográfica, o modelo Gaussiano foi o que obteve o melhor desempenho quanto ao valor residual (RSS), bem como o maior coeficiente de correlação (R^2). Nesta análise identificou-se anisotropia dos dados com direção preferencial no sentido NW-SE (135°). Os diferentes conjuntos de dados apresentaram grau de aleatoriedade menor que 0,06 (Co/C) e dependência espacial acima de 95% ($C/(Co+C)$), resultados que indicam que os dados possuem uma boa representatividade espacial.

Tabela 2. Coeficientes geoestatísticos desenvolvidos para os dados de profundidade.

Conjunto de Dados	Alcance	Efeito pepita (Co)	Patamar (C)	R^2	RSS
100 x 100	8147,567	0,046	0,899	0,972	0,749
200 x 200	8920,061	0,044	0,970	0,963	0,829
300 x 300	10252,008	0,046	1,198	0,970	0,857
500 x 500	10137,693	0,054	1,042	0,918	0,673

4.1 Mapas batimétricos

A Figura 2 apresenta os mapas de profundidade estimados por meio da krigagem ordinária utilizando os coeficientes apresentados na Tabela 2. A resolução espacial dos mapas produzido possui uma dimensão de 30 x 30 metros, ou seja, a cada 900 m² foi estimado um valor de profundidade. Neste trecho do Rio Negro foram observadas duas áreas com maior profundidade, uma na margem esquerda próximo da tomada de água da companhia de abastecimento da cidade, e outra na margem direita onde se localiza o talvegue.

Um compartimento de aproximadamente 7,60 km² na margem direita do Rio Negro destaca-se por apresentar profundidade entre 05 e 10 metros. Em anos de secas extremas, como as ocorrida nos anos de 2005 e 2010, esta extensa área pode ficar totalmente emersa, representando aproximadamente 40% da largura do canal neste trecho. Na região a montante

da ponte sobre o Rio Negro, o canal central tem profundidades máximas variando entre 25 e 30 metros.

Na área a jusante da ponte sobre o Rio Negro o canal central tem profundidades variando entre 25 e 35 metros, alguns pontos de depressões com profundidade superior a 45 metros e largura na ordem de 100 a 200 metros.

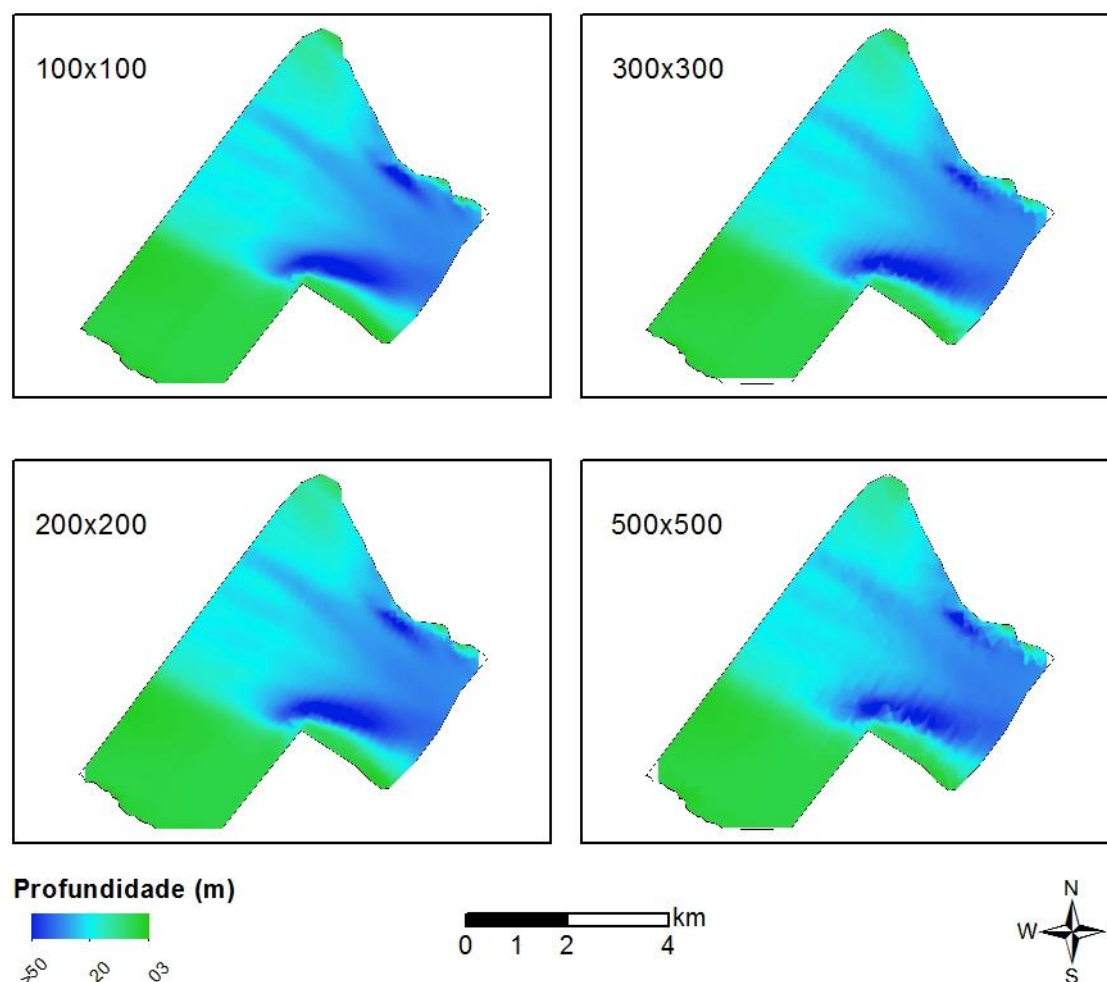


Figura 2. Mapas batimétricos interpolados com os diferentes conjuntos de dados.

4.2 Avaliação quantitativa e qualitativa

Conforme esperado, o valor do RMSE em cada modelo variou em função do desenho amostral utilizado (Figura 3), chegando a mais de 100% no conjunto de 500 x 500 metros em relação ao mapa batimétrico com maior densidade amostral (100 x 100 metros). Na análise dos desvios, os valores médios em cada modelo ficaram abaixo de 50 centímetros, no entanto, alguns pontos avaliados tiveram estimativas superiores a 10 metros em relação ao observado, principalmente nas áreas próximas ao talvegue (margem direita) e próximo da área de tomada d'água (margem esquerda), indicando que em áreas com variações bruscas de profundidade a estimativa de profundidade tem menor precisão.

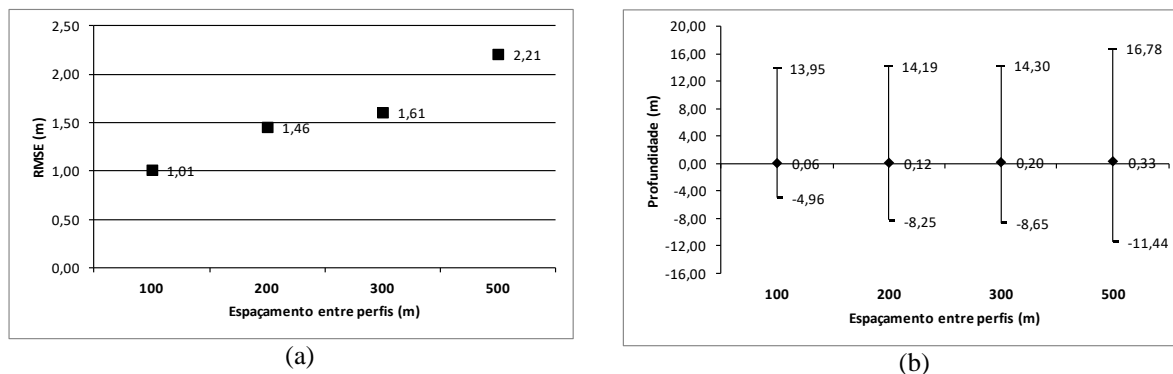


Figura 3. (a) RMSE para cada modelo avaliado. (b) desvios médios (ponto), máximos e mínimos.

A Figura 4 apresentam perfis transversais extraídos sobre as superfícies produzidas com diferentes desenhos amostrais. Nestes perfis é possível identificar algumas formas do canal, bem como visualizar o desempenho de cada modelo na representação destas formas. No primeiro perfil (Figura 4a) é possível notar a descida brusca da profundidade, um vale próximo dos 20 metros e outro próximo dos 30 metros de profundidade. No primeiro vale o modelo com espaçamento de 500 x 500 não conseguiu captar bem esta feição. Efeito similar pode ser observado no perfil da Figura 4c. No perfil da Figura 4b todos os modelos conseguiram captar formas semelhantes do leito do rio.

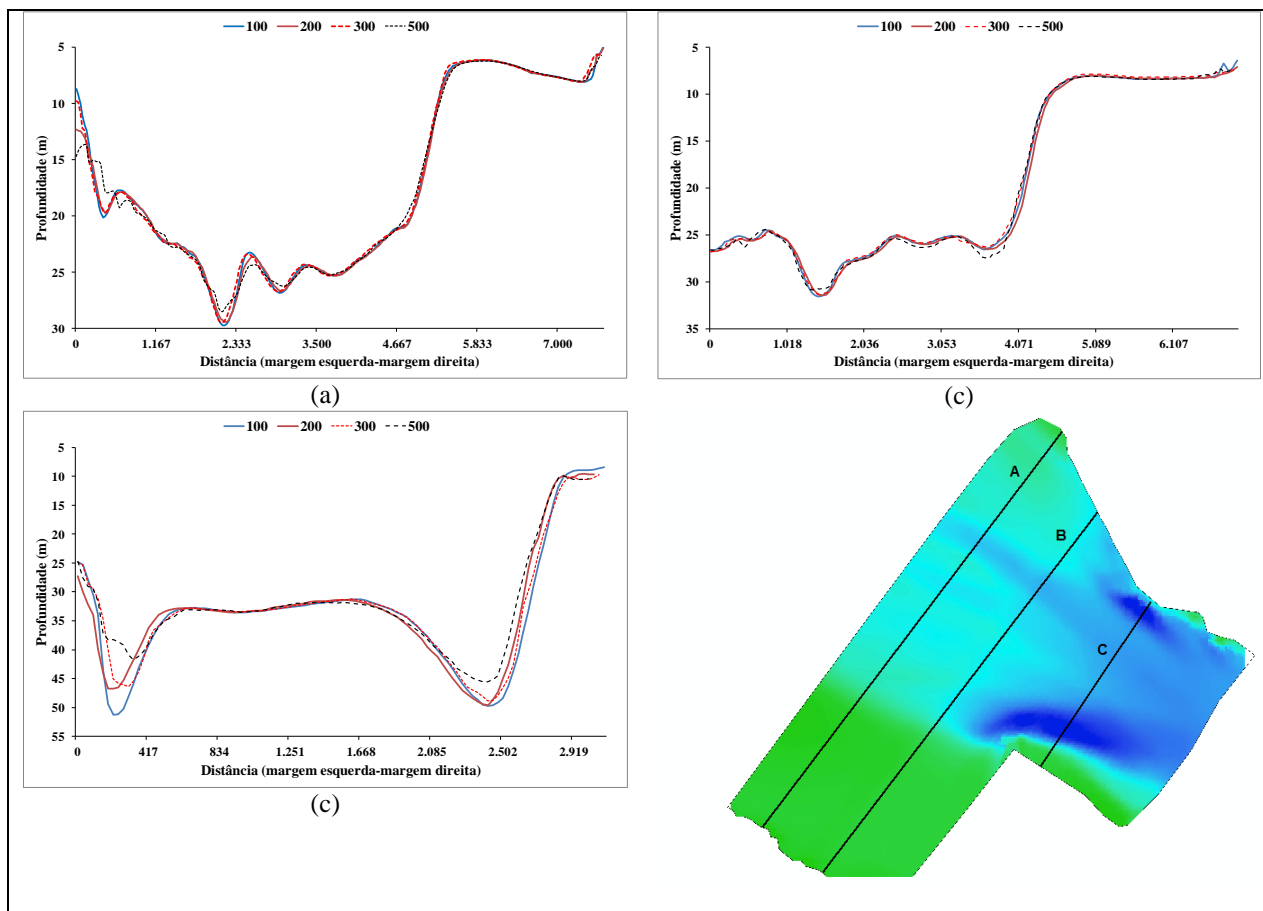


Figura 4. Perfis transversais do Rio Negro obtidos em diferentes seções e sobre diferentes desenhos amostrais.

Além do dado de profundidade, o uso do ADCP permite coletar dados simultâneos e georreferenciados de velocidade, retroespalhamento e direção/intensidade média da corrente, conforme podemos observar na Figura 5. Esses dados nos permitem fazer o mapeamento destes dados em conjunto com a profundidade.

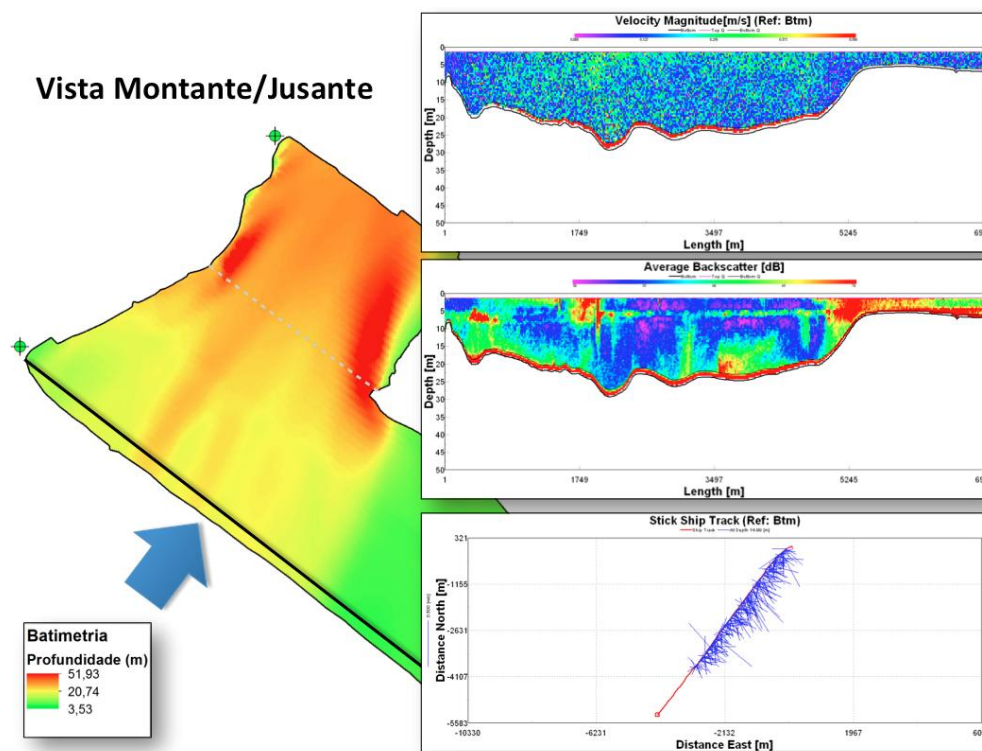


Figura 5. Perfil ADCP na porção de montante da área de levantamento.

5. Conclusões

Estimativas espaciais da profundidade de grandes rios amazônicos são informações de grande importância para segurança de navegação e obras de engenharia. Diversos são os métodos disponíveis para representação das formas do leito dos rios, sendo a sondagem multifeixe uma das técnicas que pode oferecer grande precisão. Neste trabalho foi apresentada uma metodologia alternativa de coleta e processamento de dados batimétricos para grandes rios amazônicos com dados ADCP.

Os resultados indicam que um desenho amostral de 100 metros entre os perfis transversais pode ser adequado para representar as principais formas do rio Negro nesta área em estudo. No entanto, para a aquisição de dados com esse desenho amostral sobre uma área de 25 km² são necessários quatro dias de trabalho. Como alternativa a este desenho amostral mais denso na coleta dos dados, os resultados do espaçamento de 300 metros entre os perfis são uma opção para reduzir o tempo de trabalho, e em consequência, o custo na aquisição dos dados.

Em relação à morfologia fluvial do Rio Negro, foi possível observar que a margem esquerda possui profundidades superiores em relação à margem direita. Destacam-se também duas grandes depressões em forma de “V” localizadas próximo da margem esquerda e outra na margem direita, além de um extenso depósito de sedimentos com baixa profundidade sobre uma área com mais de 3 km de extensão.

Agradecimentos

Os autores agradecem a PADTEC S.A. e ao Instituto Piatam pelo apoio na execução do projeto PHIGEON (Perfil Hidrológico e Geomorfológico do Rio Negro frente a Manaus) e

pela cessão dos dados para o Laboratório de Potamologia Amazônica da UFAM. Os autores agradecem a Fundação de Amparo e Pesquisas do Estado do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio financeiro ao projeto de iniciação científica PIB-E/0017/2015 da UFAM.

Referências Bibliográficas

- Brasil. Ministério da Defesa. Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia. **Cartografia**. Disponível em: < <http://www.sipam.gov.br/assuntos/cartografia>>. Acesso em: 25 março 2015.
- Cunha, Sandra Baptista da. Geomorfologia Fluvial. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 12 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013.
- Filizola, Naziano. et al. Caracterização Hidrológica da Bacia Amazônica. In: Rivas, A.; Freitas, C. E. C. (Orgs.). **Amazônia: uma perspectiva interdisciplinar**. Manaus: EDUA, 2002.
- Landim, P. M. B. Sobre Geoestatística e mapas. **Terræ Didática**, Campinas, v. 2, n. 1, p 19-33, 2006.
- Teledyne RD Instruments. **Workhorse Rio Grande**. Disponível em < http://rdinstruments.com/___documents/Brochures/rio_grande_datasheet_lr.pdf>. Acesso em 07 jun. 2016.
- Filizola, N; Spinola, N. M.; Arruda, W.; Seyler, F.; Calmant, S.; Santos, J. The Rio Negro and Rio Solimões confluence point - hydrometric observations during the 2006/2007 cycle. In: River, coastal and estuarine morphodynamics (RCEM), 2009, Santa Fé. **Proceedings...** London: Taylor & Francis Group, 2010. Papers, p. 1003-1006. On-line. ISBN 978-0-415-55426-8. Disponível em: http://www.jloup.fr/hyam/documents/conferences/2005-2009/2009_09_SantaFe_Filizola.pdf. Acesso em: 03 nov. 2016.
- Laraque, Alain; Guyot, Jean Loup; Filizola, Naziano. Mixing processes in the Amazon River at the confluences of the Negro and Solimões Rivers, Encontro das águas, Manaus, Brazil. **Hydrological Processes**. v. 23, p. 3131–3140, 2009.