



Análise comparativa das características acústicas e físico-químicas das águas dos rios Negro e Solimões no Encontro das Águas – Manaus (AM)

Turquetti, G. N.¹, Ianniruberto, M.¹

¹Instituto de Geociências – Universidade de Brasília (IGD/UnB)

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) is an equipment developed to study the current velocities in fluvial environments. However, the data obtained with ADCP have a certain relationship with the concentration of suspended sediments (CSS), to obtain this data is necessary the development of a calibration in order to compensate transmission losses caused by geometric spreading and absorption. In this paper, we developed a calibration with ADCP data collected in the confluence of Negro and Solimões rivers, Manaus, Brazil. A statistical relation was developed using the data of ADCP and a multiparameter sound, in order to obtain information about the behavior of physical and chemical parameters in one of the biggest confluences in the world.

Introdução

Nas últimas décadas, os equipamentos acústicos têm sido amplamente utilizados para determinar quantitativamente os diversos parâmetros que ajudam a entender o transporte e a deposição de sedimentos em ambiente fluvial.

Um dos parâmetros mais estudados é a concentração de sedimentos em suspensão (CSS), que pode ser determinada diretamente através da filtragem de amostras de água. Contudo, a análise direta dessas amostras necessita de um trabalho intenso pela necessidade das coletas de numerosas amostras para retratar a dinâmica sedimentar do local de estudo (Wren *et al.* 2000; Gray e Gartner, 2009). Em alternativa a filtragem de amostras de água, utiliza-se o equipamento denominado *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) capaz de realizar uma estimativa indireta da CSS de

forma eficiente, rápida e não intrusiva (Young *et al.* 1982; Thorne e Hanes, 2002). Baseado no efeito Doppler, o ADCP é um equipamento utilizado na medição da vazão de cursos d'água e da velocidade do fluxo em diversas profundidades dentro da coluna d'água. Enquanto que, a intensidade do sinal acústico retroespalhado permite uma avaliação quase sinóptica e fornece informações muito detalhadas sobre o processo de transporte sedimentar.

Diversos estudos como Souza *et al.* (2004), Kostaschuk *et al.* (2005), Wall *et al.* (2008), Bartholoma *et al.* (2009), Defendi *et al.* (2010), Sassi *et al.* (2012), Gutierrez *et al.* (2004), Genz *et al.* (2010), Filizola e Guyot, (2004), Latosinski *et al.* (2014) e Zaleski e Schettini, (2006) provaram que a partir do desenvolvimento de uma calibração dos dados de retroespalhamento, é possível obter quantitativamente a CSS. Assim, para que o processo de calibração seja conduzido de forma correta, é necessário processar a intensidade do sinal acústico para compensar as perdas transmissivas (espalhamento, absorção e difusão), bem como considerar a variabilidade mineralógica da CSS. Uma vez calibrada a intensidade do retroespalhamento em função da CSS, é possível utilizar os dados do ADCP para estimar a CSS.

Neste trabalho, objetiva-se o uso do ADCP e de uma sonda multiparâmetro, aplicadas na estimativa da CSS e de outros parâmetros físico-químicos na confluência do Rio Negro e Solimões (AM). Por ser uma confluência entre rios com características de carga sedimentar, vazão e características físico-químicas extremamente diferentes, é um ambiente complexo. De fato, a mistura das águas dos tributários é condicionada também pelos elementos morfológicos devido à mudanças repentinas de velocidade da corrente. Além disso, a confluência do Rio Negro e Rio Solimões é uma das maiores do mundo (Franzinelli, 2011). Portanto, o uso do ADCP nessas regiões torna-se essencial, visto que é possível observar em detalhe os dois rios que possuem propriedades completamente distintas.

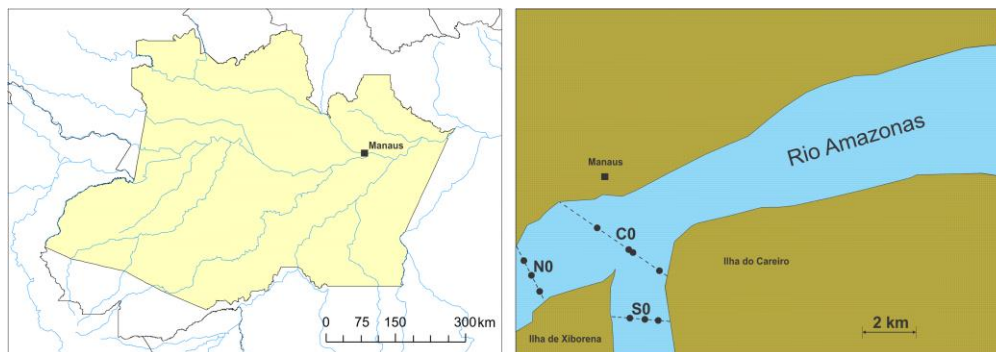


Figura 1 - Estado do Amazonas e Encontro das Águas - Localização da área de estudo com a localização das medidas feitas com a sonda multiparâmetro.

Área de estudo

A região amazônica é a região que possui a maior concentração de recursos hídricos. Além de ser a maior bacia hidrográfica do mundo (possuindo cerca de 7 milhões de km²), ela é responsável por desaguar aproximadamente 15% de toda água doce para o sistema fluvial mundial. Seu principal rio, o Amazonas, possui aproximadamente sete mil afluentes e 1100 rios tributários, dentre os quais podemos destacar os rios Negro, Solimões, Purus e Madeira.

A área de estudo situa-se na confluência do Rio Negro e Solimões, popularmente conhecida como o Encontro das Águas, próximo à cidade de Manaus (AM) como mostrado na Figura 1. Do ponto de vista geológico, a área de estudo está inserida na faixa neotectônica transcorrente que compreende a Bacia Amazônica em sua porção central, e é rodeada pelas ilhas Xiborena e Careiro, região caracterizada por rochas clásticas da Formação Alter do Chão, do Cretáceo superior (Igreja, 1998; Franzinelli, 2011). Os rios que compreendem a área de estudo, possuem propriedades completamente distintas. O Rio Solimões é do tipo anastomosado com origem nos Andes, sendo caracterizado pela alta CSS em sua maioria constituída por argilas e siltes, responsáveis pela sua coloração marrom característica (Franzinelli, 2011; Latrubesse, 2008). O Rio Negro é do tipo entrelaçado com complexas superfícies de inundação com origem no Escudo das Guianas (Franzinelli, 2011). Esse rio possui uma baixa CSS, devido às características geológicas da bacia hidrográfica, e menor descarga possuindo então, uma coloração avermelhada devido à grande quantidade de ácidos húmicos que são decorrentes da decomposição de matéria orgânica e de óxidos de ferro dissolvidos. Desta forma, quando os dois rios com características completamente distintas se encontram na confluência, a mistura entre eles não ocorre de forma imediata, resultando em uma região de dezenas de quilômetros onde ambos os rios correm lado a lado até se misturarem.

A fim de tentar entender esse fenômeno, bem como analisar como as propriedades físico-químicas da água mudam entre os rios e na sua confluência, foram feitos diversos pontos de sondagem multiparâmetro a fim de analisar essas variações (Figura 1). Foram adquiridos dados em três pontos de sondagem no braço de cada rio e quatro pontos de sondagem na confluência.

Metodologia

O ADCP é um equipamento que consiste em quatro transdutores acústicos, onde a mudança de frequência desses pulsos devido aos difusores presentes na água, causam a reflexão e espalhamento desses feixes, sendo possível determinar diversos parâmetros, como a velocidade de corrente, vazão e concentração de sedimentos em ambientes fluviais. O ADCP pode ser aplicado também à medição da CSS, visto que a mesma está diretamente relacionada com a velocidade do fluxo e o tamanho das partículas em suspensão.

Desta forma, a determinação indireta da CSS fornece informações mais detalhadas sobre o processo de transporte de sedimentos ao longo de seções transversais em rios. Para obtenção indireta da CSS, é necessária a realização de uma calibração onde a intensidade do sinal acústico dos feixes é intensificada, a fim de compensar as perdas transmissivas por espalhamento e absorção. Portanto, a importância da calibração para a obtenção da CSS pode ser facilmente observada na Figura 2, onde são apresentadas as perdas transmissivas por espalhamento, absorção e por atenuação devido a materiais de granulometria fina e grossa. Contudo, não considera-se as perdas transmissivas por atenuação devido a materiais com granulometria fina e grossa. Considera-se que a calibração é independente dessa variável, pois devido à sensibilidade do ADCP, não é possível a discriminação do material fino para o grosso. Pela análise da Figura 2, é possível observar que as correções que mais influenciam nos dados são as correções de perdas transmissivas por

espalhamento geométrico do feixe e por atenuação por absorção.

Desta forma, para realizar a calibração, o primeiro passo é equalizar a intensidade do sinal detectado pelo ADCP utilizando a equação de perdas transmissivas proposta por Latosinski *et al.* (2014).

$$TL = 20 \log z + \alpha z \quad (1)$$

Onde, z é a profundidade (ou distância percorrida pelo sinal), $20\log(z)$ corresponde a perdas transmissivas por espalhamento geométrico, e α corresponde ao coeficiente logarítmico de absorção necessário para compensar as perdas transmissivas por absorção em função da distância percorrida pelo sinal. Entretanto, visto que estamos trabalhando com regiões rasas, o efeito no coeficiente de absorção devido à variação da pressão é pequeno e a salinidade, baseada nos resultados obtidos pela sonda multiparâmetro, é um parâmetro desprezível. Logo, para calcular α , a equação proposta por Shulkin e Marsh (1962) pode ser facilmente reduzida à equação 2.

$$\alpha = 8.687 \frac{3.38 \times 10^{-4} f^2}{21.9 \times 10^{-4} - 7.227 f} \quad (2)$$

Onde, f é a frequência acústica do ADCP utilizado, fixada em 600 kHz, e T é a temperatura da água em Celsius e por fim, a constante 8.687 é o fator de conversão de nepers para decibéis. Uma vez aplicada a compensação das perdas transmissivas, a intensidade do sinal determinada pelo ADCP será exclusivamente função da CSS, já que considera-se desprezível a variabilidade granulométrica e mineralógica dos sedimentos (Latosinski *et al.* 2014). Desta forma, o segundo passo para a calibração compõe-se em correlacionar os pontos de sondagem realizada com sonda multiparâmetro com os dados de retroespalhamento dos perfis ADCP realizados aproximadamente no mesmo ponto.

Na Figura 3 são apresentados os perfis calibrados do retroespalhamento medido pelo ADCP com as localizações dos pontos de sondagem multiparamétrica do Rio Solimões (S0L, S0R e S0C), Rio Negro (N0L, N0R e N0C) e confluência (C0L, C0CL, C0CR, C0R). No gráfico relativo à confluência (C0) é evidente a diferença de retroespalhamento dos dois rios, sendo claramente explicada pelas diferenças concentrações de carga de sedimentos em suspensão. A partir dos dados obtidos da sonda multiparâmetro foi possível obter parâmetros físicos como a turbidez, pH, concentração de sólidos dissolvidos, condutividade, oxigênio dissolvido e a clorofila. A relação estatística de tais parâmetros foi determinada em função da intensidade de retroespalhamento nos diferentes locais de coleta a fim de observar eventuais padrões de comportamento e caracterizar as águas dos dois rios.

Resultados e discussões

Com o desenvolvimento da calibração, as perdas transmissivas por espalhamento geométrico e absorção foram compensadas a fim de poder limitar a variabilidade da intensidade do sinal apenas as características do sedimento em suspensão (Zaleski *et al.* 2006). Deste modo, baseado nos resultados obtidos, observou-se que a confluência do Rio Negro e Rio Solimões é um ambiente extremamente heterogêneo, onde as variações de ponto a ponto são bastante discrepantes umas das outras. Sendo assim, em primeira análise não é possível definir uma tendência geral para o padrão de variabilidade dos parâmetros físico-químicos, fazendo-se necessária a realização de uma análise local.

A Tabela 1 apresenta as médias das medidas de retroespalhamento (MR), turbidez, pH, temperatura (T), total de sedimentos dissolvidos (TDS), condutividade e oxigênio dissolvido (ODO) realizadas no Rio Negro (N0), no Rio Solimões (S0) e na confluência entre os dois rios (C0). Primeiramente, é possível observar que os rios possuem valores dos parâmetros físico-químicos completamente distintos,

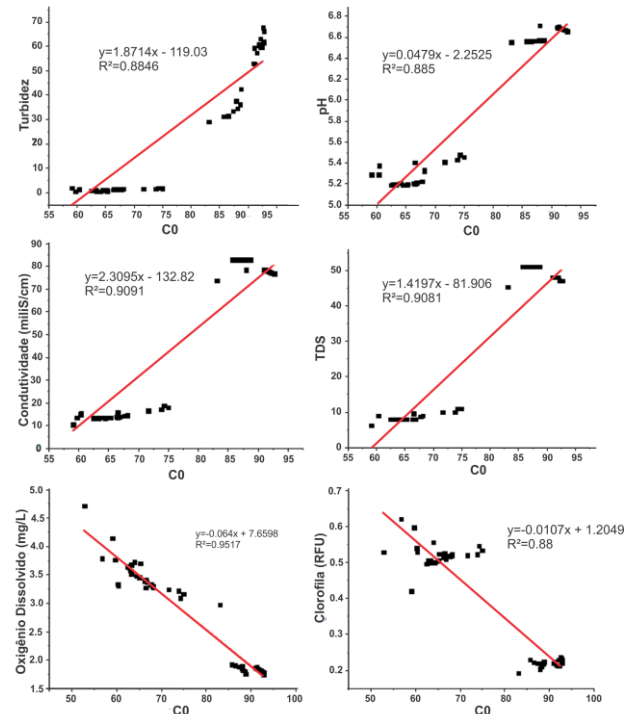


Figura 4 – Parâmetros físicos - Gráficos obtidos a partir da correlação entre os parâmetros físicos descritos com a média do retroespalhamento.

O primeiro parâmetro a ser observado segundo a Tabela 1, corresponde à média obtida a partir dos valores de retroespalhamento dos perfis ADCP (MR). O Rio Solimões apresenta os maiores valores de

retroespalhamento, sendo facilmente associado à alta concentração de sedimentos em suspensão, conseqüentemente gerando uma difusão maior da energia dos feixes, como é possível observar na Figura 3.

Tabela 1 - Média dos parâmetros obtidos com a sonda em correlação com os dados de retroespalhamento dos perfis ADCP.

A turbidez é um parâmetro físico baseado na quantidade de luz que é espalhada pelo material em suspensão em uma amostra de água. Quanto maior a intensidade da luz espalhada, maior será a turbidez. Os materiais normalmente que causam a turbidez da água incluem argilas, siltes e matérias orgânicas e inorgânicas. Portanto, baseado na Tabela 1, observa-se que os valores de turbidez para os dois rios são completamente distintos, sendo o Solimões muito mais turvo do que o Negro. Na Figura 4, é possível observar que os valores de turbidez para o Rio Negro são praticamente constantes, enquanto para o Rio Solimões, que possui uma alta carga sedimentar em suspensão, esses valores são diretamente proporcionais com o retroespalhamento dos feixes.

Quando relacionado à temperatura, o Rio Negro, pela sua cor escura, apresenta as maiores temperaturas devido a sua maior capacidade de absorver energia solar. Quando relacionado a concentrações de clorofila e oxigênio dissolvido, o Rio Negro apresenta maiores valores devido à grande concentração de matéria orgânica e algas, o que conseqüentemente irá levar ao aumento da concentração de clorofila sendo também, diretamente proporcional à quantidade de oxigênio dissolvido na água.

A condutividade obtida para o Rio Solimões é extremamente elevada se comparada com o Rio Negro, fator que está diretamente relacionado com a concentração de íons nos sedimentos em suspensão. A salinidade calculada a partir da condutividade é desprezível para os dois rios, onde o Rio Solimões apresenta valores acima do limiar de medição na faixa de 0,03 psu.

E finalmente, observa-se nos gráficos da Figura 4, a relação entre retroespalhamento e os parâmetros físico-químicos medidos pela sonda, possuindo um coeficiente de correlação (R^2) alto entre 0.8 e 0.9. Todavia, é preciso observar que a correlação observada para cada um dos rios não é sempre significativa, indicando que a relação entre o retroespalhamento e os parâmetros físico-químicos é mais complexa. Contudo, a relação encontrada retrata adequadamente o região de mistura dos dois rios e também, a possibilidade de observar a mistura a partir da observação de qualquer um dos parâmetros observados pelo ADCP e pela sonda.

Conclusões

O uso conjunto do ADCP e da sonda multiparâmetro se mostrou uma ferramenta útil para caracterizar indiretamente a carga de sedimentos em suspensão nos rios Negro e Solimões, e também, para observar os fenômenos de mistura que ocorrem na confluência. Obviamente, o método de observação indireta permite o monitoramento de sedimentos suspensos de forma rápida e eficiente, principalmente quando comparada com o método de filtragem de água para a obtenção da CSS.

Para os rios Negro (N0) e Solimões (S0), não se obteve uma boa correlação entre os parâmetros físico-químico estudados e a média do retroespalhamento. Entretanto, esta relação é muito significativa quando observada na confluência, onde as duas águas apresentam um comportamento completamente distinto, sendo possível então, a observação da região de mistura.

Referências

- Bartholoma, A., Kubicki, T. H., Badewien, B. W., Flemming, B. W. (2009). "Suspended sediment transport in German Wadden Sea – Seasonal variations and extreme events". *Ocean Dyn.*, 59(2), 213-225.
- Defendi, V., Kovacevic, V., Arena, F., Zaggia, L. (2010). "Estimating sediment transport from acoustic measurements in the Venice Lagoon inlets". *Cont. Shelf Res.*, 30(8), 883-893.
- Filizola, N., Guyot, J. L. (2004). "The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon". *Hydrological Sciences – Journal-des Sciences Hydrologiques.*, 49(1).
- Franzinelli, E. (2011). "Características morfológicas da confluência dos rios Negro e Solimões (Amazonas, Brasil)". *Revista Brasileira de Geociências.* 41(4): 587-596.
- Garnier, J., Billen, G., Hannon, E., Fonbonne, S., Videnina, Y., Soulie, M. (2002). "Modeling transfer and retention of nutrients in the drainage network of the Danube River". *Estuarine. Coast. Shelf Sci.* 54, 286-308.
- Gray, J. R., Gartner, J. W. (2009). "Technological advances in suspended-sediments surrogate monitoring. *Water Resour.* Res., 45.
- Genz, F., Cirano, M., Lessa, G. C. (2010). "ProcED: A matlab package for processing ADCP estuarine data". *Revista Brasileira de Geofísica.* 28(2): 183-192.
- Igreja, H. L. S. (1998). "Aspectos do modelo neotectônico da Placa sul-americana na Província estrutural amazônica, Brasil". Tese Concurso Prof. Titular, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 155.
- Kostaschuk, J., Best, R., Villard, P., Peakall, J., Franklin, M. (2005). Measuring flow velocity and sediment transport with a acoustic Doppler current profiler. *Geomorphology*, 68, 25-37.

- Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., García, C. M., Guerrero, M., Amsler, M. L. (2014). "Estimation of Concentration and load of suspended bed sediments in a large river by means of acoustic doppler technology". J. Hydraul. Eng. 140.
- Latrubesse, E. (2008). "Patterns of anabranching channels: the ultimate end-member adjustments of mega-rivers. *Geomorphology*". 101(1-2), 130-145.
- Sassi, M. G., Hoitink, A. J. F., Vermeulen, B. (2012). "Impact of sound attenuation by suspended sediment in ADCP backscatter calibrations". *Water Resources Research*. 48.
- Shulkin, M., Marsh, H. W. (1962). "Sound absorption in sea water". *The Journal of the Acoustic Society of America*. 34(6), 864.
- Souza, A. J., Alvarez, L. G., Dickey, T. D. (2004). "Tidally induced turbulence and suspended sediment". *Geophys. Res. Lett.* 31.
- Thorne, P. D., Hanes, D. M. (2002). "A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes". *Cont. Shelf Res.* 22, 603-632.
- Wall, G. R., Nystrom, E. A., Litten, S. (2008). "Suspended sediment transport in the freshwater reach of the Hudson river estuary in eastern New York". *Estuaries and Coasts.*, 31, 542-553.
- Wren, D. G., Barkdoll, B. D., Kuhnle, R. A., Darrow, R. W. (2000). "Field techniques for suspended-sediments measurement". *J. Hydraul. Eng.* 126(2), 97-104.
- Young, R. A., Merrill, J. T., Clarke, T. L., Proni, J. R. (1982). "Acoustic profiling of suspended sediments in the marine bottom boundary layer". *Geophys. Res. Lett.* 9(3), 175-178.
- Zaleski A. R., Schettini, C. A. F. (2006). "Procedimentos para Calibração de Perfiladores Acústicos de Corrente por efeito Doppler para a Determinação da Concentração de Material Particulado em Suspensão na água". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 11(3):191-200.

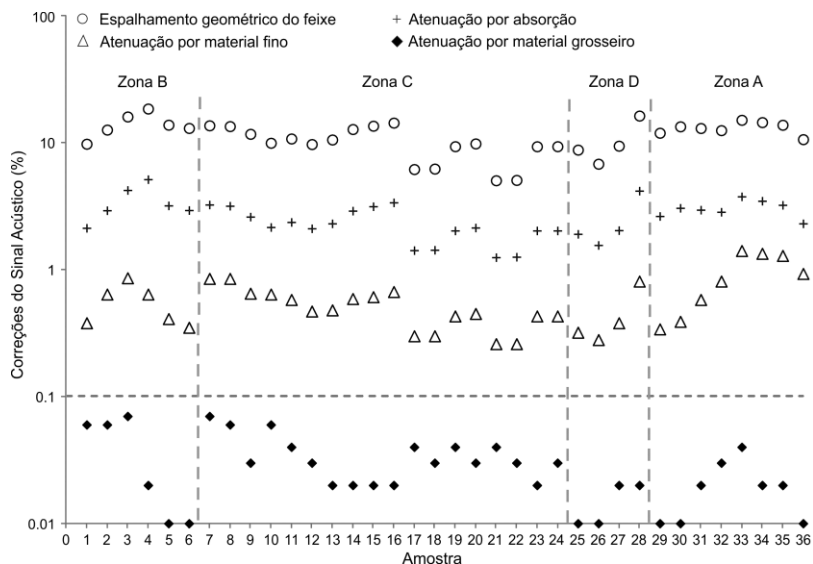


Figura 2 – Gráfico de calibração - Correções do sinal acústico em porcentagem. Adaptado: Latosinski *et al.* (2014).

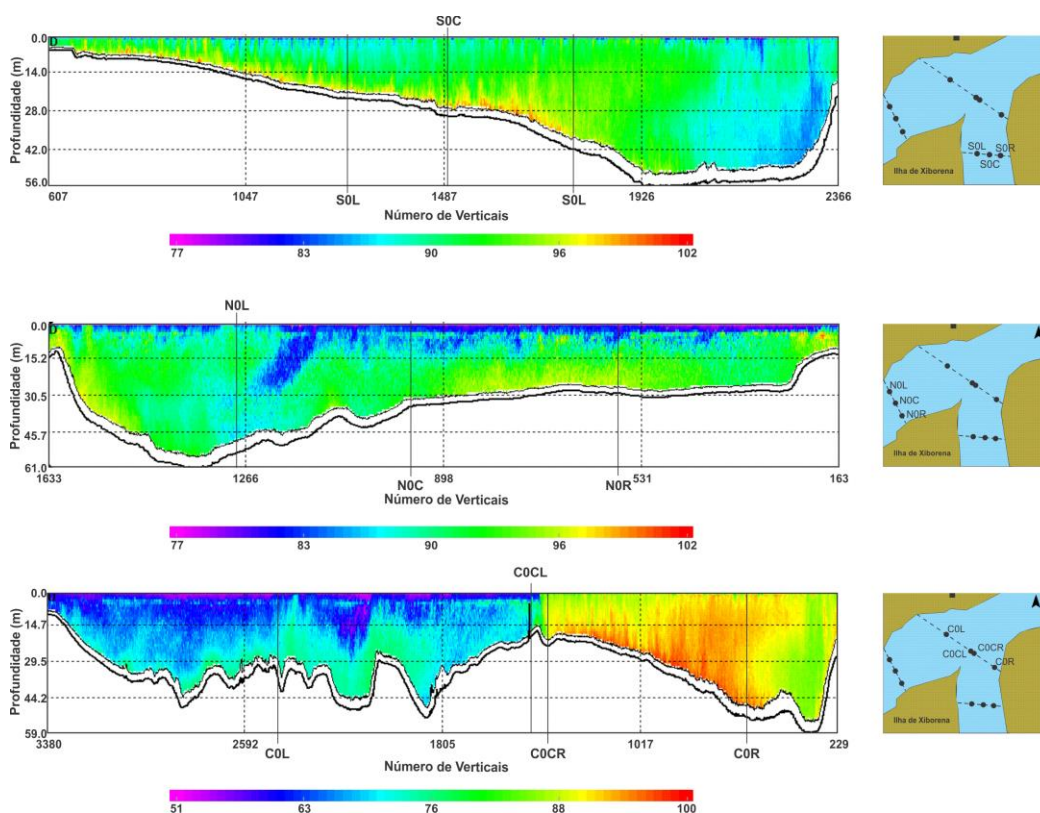


Figura 3 – Seções de ADCP - Perfis de ADCP de Retorno Médio do Eco (retroespalhamento) com a localização dos pontos de sondagem feitos com a sonda multiparâmetro.