

IO-USP

Tiago Carrilho Biló N°USP: 6444559

**Interpolação de seções verticais de velocidade,
medida com LADCP, entre 23-26°S**

IOF5805 - Oc. Física Observacional

Trabalho Final

São Paulo

Setembro de 2013

Sumário

1	Introdução	3
2	Área de Estudo	4
3	Conjunto de Dados	5
4	Métodos	9
5	Resultados	12
6	Conclusões	17
	Referências	18

1 Introdução

Em águas profundas (> 500 m), há poucas formas de se observar sinótica e diretamente velocidades em toda a coluna de água. Entre elas, destaca-se o perfilador de velocidade *Lowered Acoustic Doppler Current Profiler* (LADCP). Como seu próprio nome sugere o LADCP utiliza o princípio do Efeito Doppler para medir a velocidade da água em diferentes profundidades. Uma vez acoplado em um sistema CTD-Rosette, este equipamento pode ser baixado até próximo ao fundo oceânico, permitindo a perfilagem de toda a coluna de água em uma dada posição geográfica (Firing, 1998). A Figura 1 ilustra o processo de aquisição de dados por um LADCP.

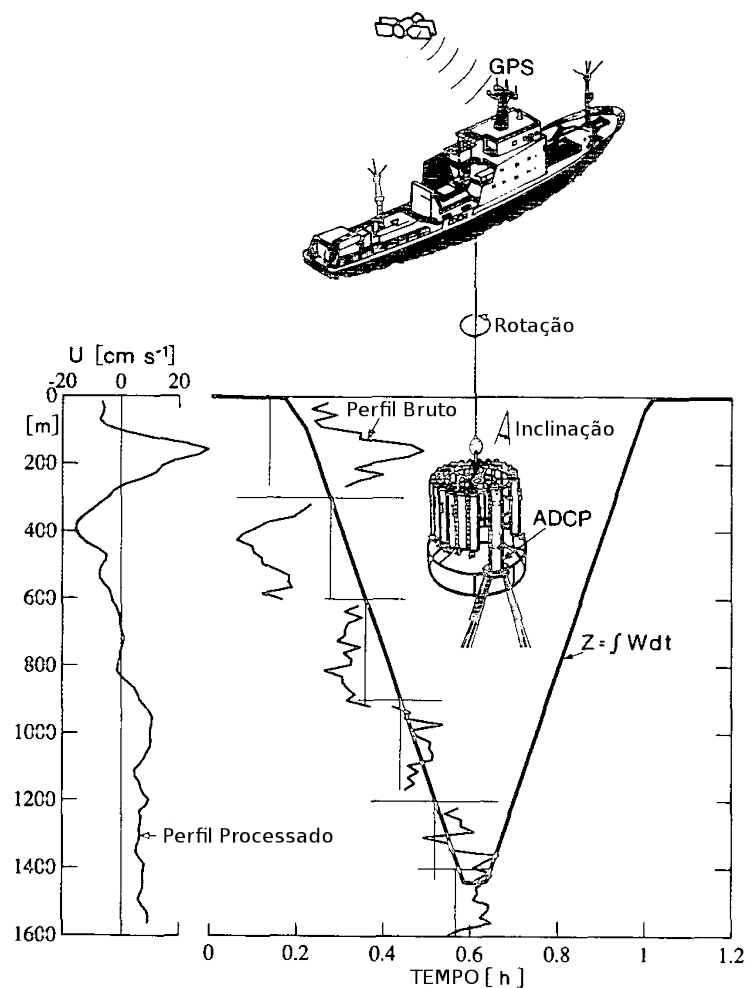


Figura 1: Esquema de aquisição de dados com o LADCP. Adaptado de Fischer & Visbeck (1993).

Esse tipo de informação é oriunda de cruzeiros oceanográficos. Estes possuem limitações de tempo e dinheiro para serem realizados, assim como objetivos específicos de amostragem. Portanto a resolução espacial dos dados obtidos nos permite fazer apenas certas inferências sobre os fenômenos “capturados” e, por vezes, há a necessidade de interpolação das informações para fazê-las.

Uma característica importante de conjuntos de dados derivados de cruzeiros oceanográficos é a distribuição irregular das amostragens. Diversos métodos de interpolação requerem uma distribuição regular das informações para seu funcionamento adequado (*Emery & Thompson, 2001*). No entanto existem métodos de se estimar campos de uma dada propriedade, distribuída regularmente no espaço-tempo, utilizando-se de informações estatísticas dos dados. Esses métodos são baseados nos fundamentos da Análise Objetiva (AO) apresentada por *Gandin (1965)*. Um bom exemplo de AO aplicada a dados oceanográficos, não regularmente espaçados, encontra-se no trabalho de *Carter & Robinson (1987)*. Os autores supõe que a autocorrelação pode ser aproximada por diferentes funções analíticas, permitindo que se estime os valores da propriedade em questão em qualquer ponto da região de estudo.

Então, no contexto da disciplina **IOF5805**, este trabalho possui o objetivo de interpolar seções verticais de velocidade observada com LADCP, de modo a não distorcer ou alisar demasiadamente o padrão espacial do sinal medido. Este processo resultará em parte fundamental da descrição dos padrões de circulação de mesoescala da dissertação de mestrado do aluno Tiago Carrilho Biló.

2 Área de Estudo

A região de estudo corresponde a margem continental e parte da planície abissal ao largo da costa brasileira, entre as latitudes de 23 e 26°S. O padrão de circulação de meso e grande escalas nesta área corresponde ao sistema de correntes de contorno oeste do Atlântico Sul (*Stramma & England, 1999*). Nas proximidades da quebra da plataforma continental encontra-se o eixo da Corrente do Brasil (CB) que flui para sul-sudoeste, nos primeiros 500 m de profundidade e com cerca de 100 km de extensão (*Stramma & England, 1999; Silveira et al., 2001*). Segundo a revisão de *Silveira et al. (2001)* as velocidades máximas da CB variam de 0,25 a 0,75 m s⁻¹, na faixa latitudinal em questão.

Junto ao talude continental, em profundidades superiores à 500 m, o escoamento inverte de sentido e este é denominado de Corrente de Contorno Intermediária (CCI). Segundo os esforços de *Boebel et al. (1999)* e, recentemente, de *Legeais et al. (2012)* com flutuadores, a CCI na região de estudo possui largura inferior a 100 km e velocidades máximas superiores à 0,15 m s⁻¹, sendo o núcleo da corrente localizado

em, aproximadamente, 20 km ao largo da isóbata de 800 m. A única inferência sobre a extensão vertical da CCI, a partir de velocidade observada, é oriunda de *Silveira et al.* (2004). Estes autores revisitaram dados históricos de perfiladores Pegasus e descreveram padrões de escoamento da CCI, na Bacia de Campos (22°S), com extensão vertical e largura de aproximadamente 1000 m e 60 km, respectivamente. A velocidade máxima é cerca de $0,3 \text{ m s}^{-1}$.

3 Conjunto de Dados

Com o intuito de investigar e entender a circulação de meso e grande escalas na Bacia de Santos (23-28°S), região de exploração de óleo e gás do Pré-Sal, o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello da empresa PETROBRAS, em parceria com o Laboratório de Dinâmica Oceânica do IO-USP desenvolveram o projeto “Célula de **Recirculação** da Corrente do Brasil na Bacia de Santos”(CERES). O projeto contou com quatro cruzeiros oceanográficos quase-sinóticos de levantamento de dados hidrocorrentográficos entre janeiro de 2008 e junho de 2010. A última campanha do Projeto CERES ocorreu em junho de 2010, a bordo do N/Oc. Antares da Marinha do Brasil, e foi denominada CERES-IV. A rede de estações foi composta por 4 radiais compreendendo 95 estações oceanográficas sobre todo o talude continental da Bacia de Santos.

Neste trabalho, foram utilizados perfis verticais de velocidade do CERES-IV obtidos com LADCP. Estes perfis foram previamente processados, de modo que somente os dados de qualidade atestada foram incorporados ao trabalho. O processamento em questão possui como cerne a metodologia descrita em *Fischer & Visbeck* (1993) e *Visbeck* (2002). A Figura 2 apresenta as posições geográficas dos dados efetivamente utilizados.

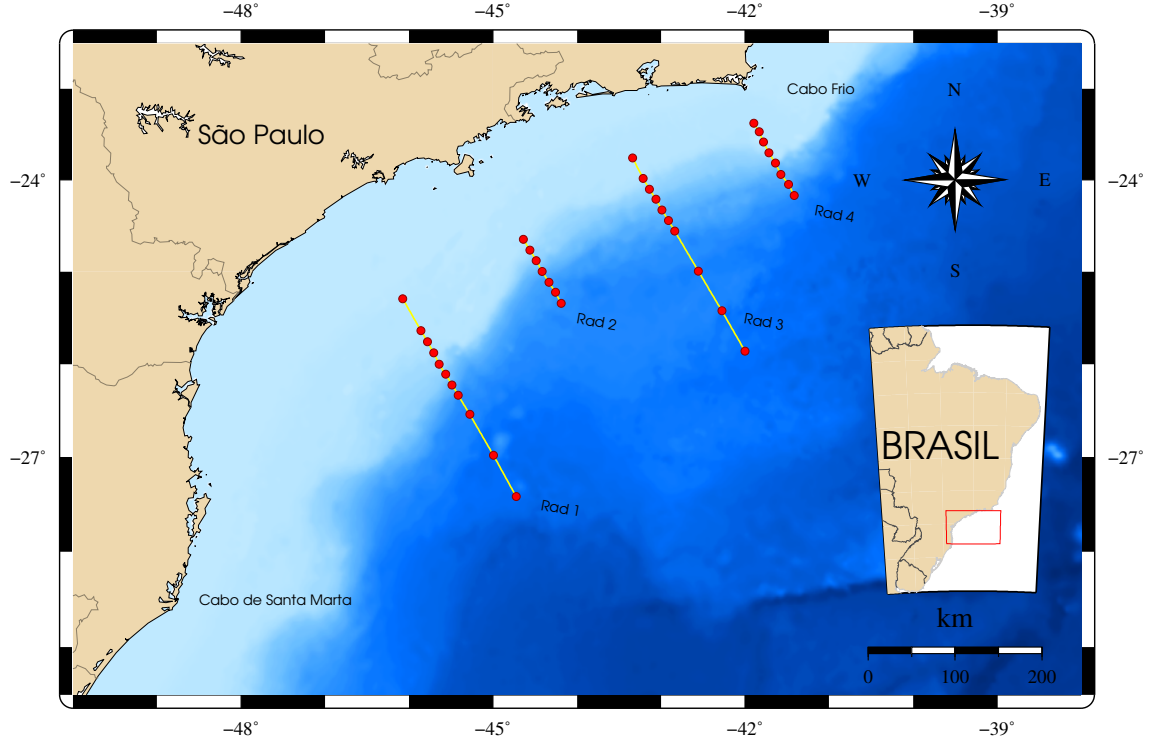


Figura 2: Localização geográfica das 36 estações oceanográficas em que foram realizadas perfilagens com LADCP utilizados no presente trabalho. Os dados foram obtidos durante o cruzeiro oceanográfico CERES-IV realizado em junho de 2010, a bordo do N/Oc. Antares da Marinha do Brasil, na região compreendida entre 23 e 28°S e denominada Bacia de Santos

As radiais desta campanha foram desenhadas, aproximadamente, perpendiculares ao escoamento considerado médio na literatura. Sendo assim, por facilidade em se trabalhar com interpolação de dados de natureza escalar optou-se por analisar a componente da velocidade perpendicular às radiais. Deste modo o conjunto de dados se resume à quatro transectos de velocidade igualmente espaçados na vertical (20 m) e de espaçamento horizontal irregular. A resolução horizontal dos transectos varia entre ~ 15 km, sobre o talude continental, e ~ 30 km em regiões sobre a sopé continental e planície abissal.

Sendo o Co-intervalo de Nyquist (K_N , Equação 1) o maior número de onda de um determinado fenômeno, no caso corrente, que podemos resolver:

$$K_N = \frac{1}{2 \times \Delta x}, \quad (1)$$

onde Δx é a resolução espacial dos dados. Os transectos nos permitem resolver correntes cuja espessura mínima (K_N^{-1}) é de 40 m e largura mínima de 30 km (60 km) sobre o talude (sopé e planície abissal). No entanto na prática, devido a ruído e erro de amostragem, é necessário pelo menos $4 \times \Delta x$ (Emery

& Thompson, 2001). Deste modo podemos resolver, apenas correntes cuja espessura é superior à 80 m e largura superior à 60 km (120 km) sobre o talude (sopé e planície abissal). Portanto, assim como visto na Seção 2 o conjunto de dados é adequado para descrevermos os padrões de escoamento referentes à CB e CCI.

As Figuras 3 à 6 ilustram o conjunto de dados descrito e o sinal predominante contido nos mesmos. Nestas seções verticais o sinal da velocidade perpendicular às radiais é representado pela escala de cores e a batimetria pela máscara preta. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. Vale ressaltar que a precisão do LADCP é em média de $5,0 \text{ cm s}^{-1}$ e a topografia de fundo é derivada da batimetria global ETOPO 1 (Amante & Eakins, 2009).

O sinal dos dados não interpolados sugerem a presença do sistema de correntes de contorno oeste, porém devido ao espaçamento horizontal das estações e o caráter ruidoso dos perfis é difícil definir as reais dimensões do sistema de correntes. Sendo assim, se faz necessário um processo de interpolação e alisamento do sinal medido, de modo a realçar os padrões de interesse.

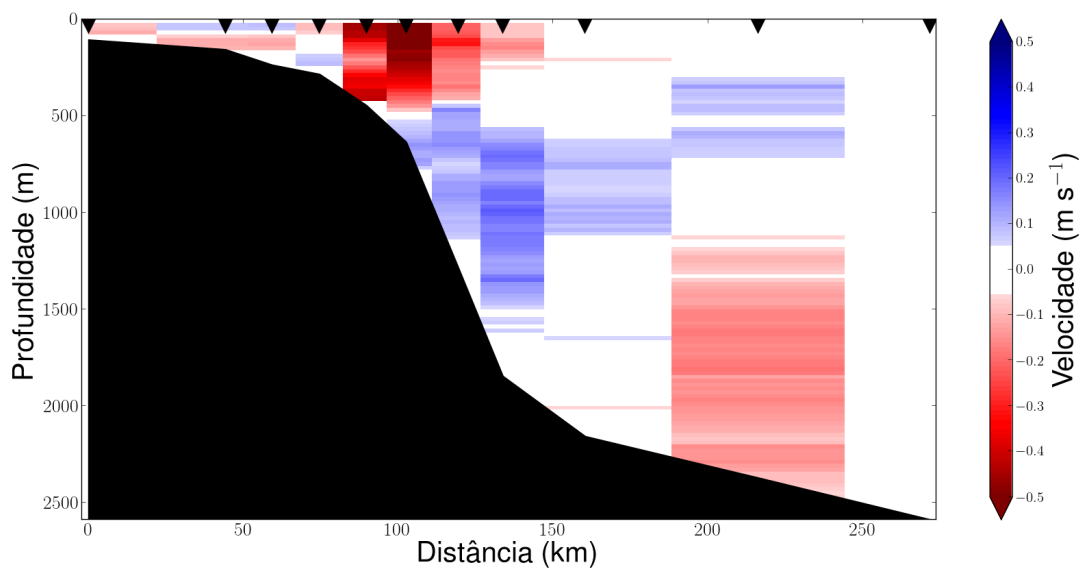


Figura 3: Seção vertical de velocidade perpendicular à radial 2 do cruzeiro CERES-IV. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

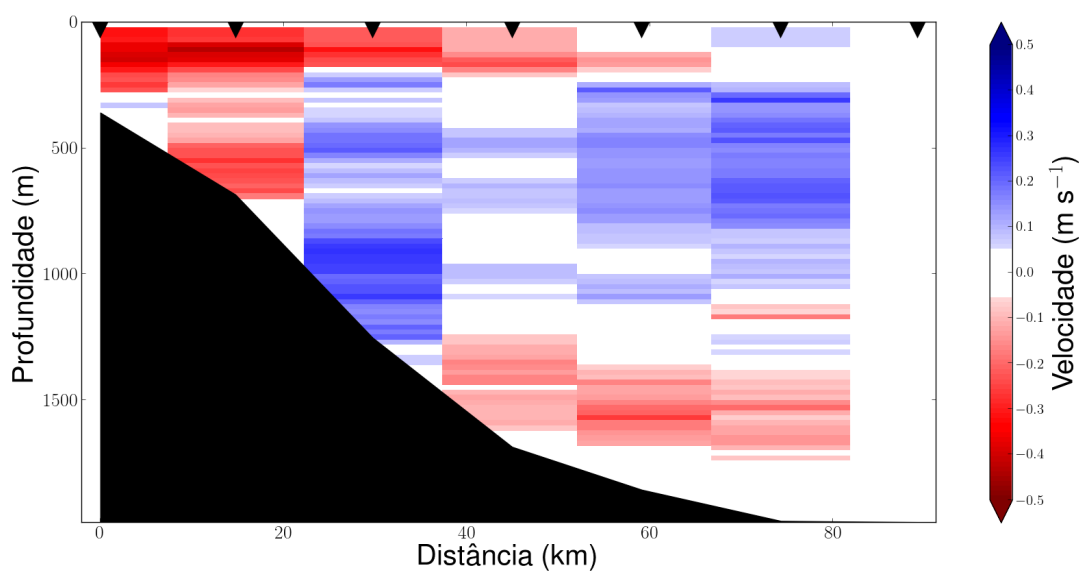


Figura 4: Seção vertical de velocidade perpendicular à radial 2 do cruzeiro CERES-IV. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

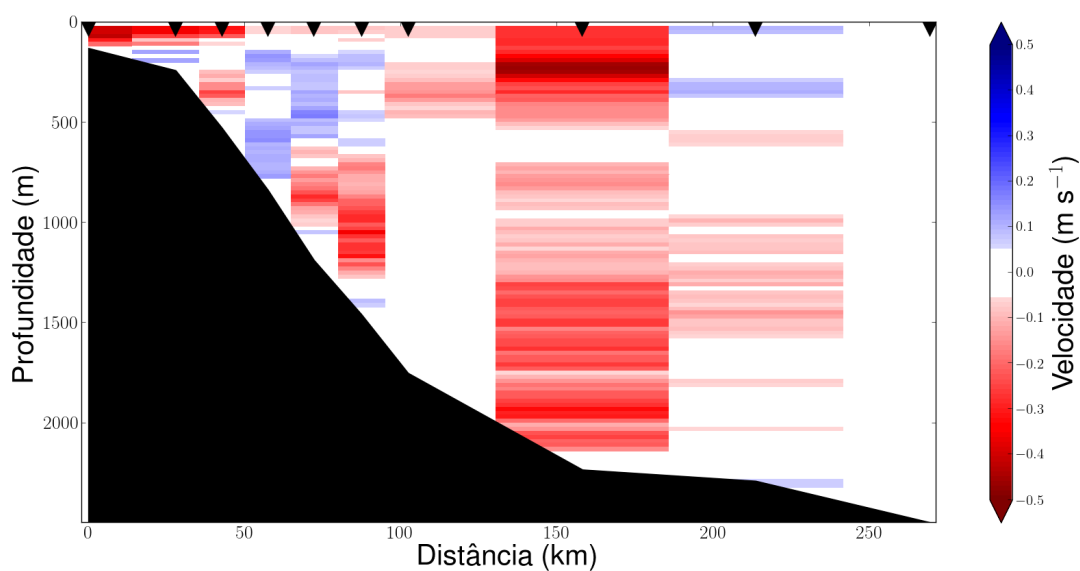


Figura 5: Seção vertical de velocidade perpendicular à radial 3 do cruzeiro CERES-IV. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

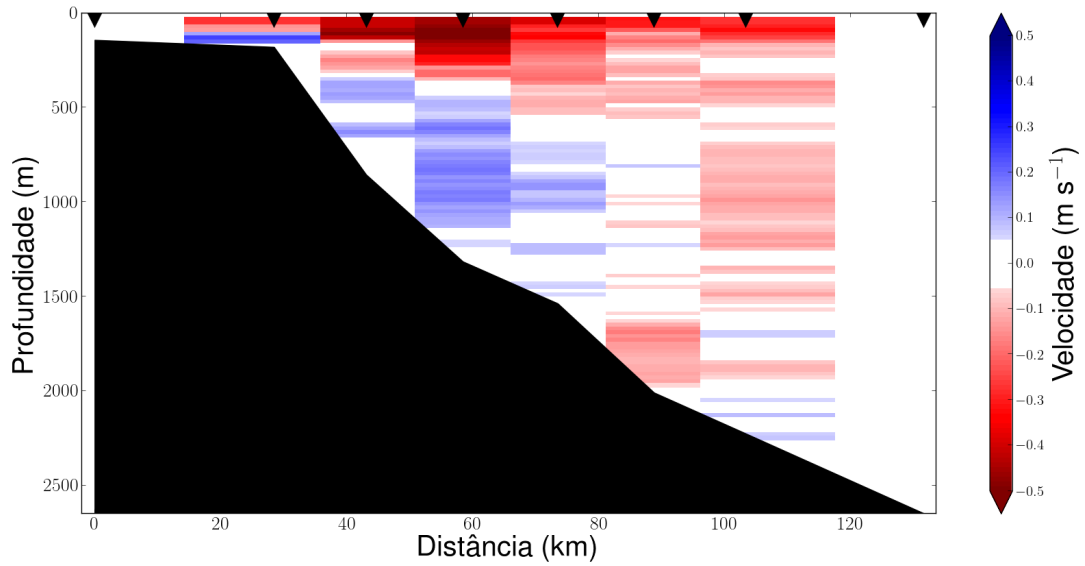


Figura 6: Seção vertical de velocidade perpendicular à radial 4 do cruzeiro CERES-IV. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

4 Métodos

Para que o objetivo deste trabalho fosse alcançado optou-se por interpolar as seções apresentadas através de uma interpolação baseada na correlação dos dados, porém sem que fosse imposto uma função de autocorrelação analítica, como na AO de *Carter & Robinson (1987)*. O processo foi conduzido baseado no procedimento descrito por *Polito et al. (1999)*. Estes autores apontaram problemas ao considerar a estatística constante (função analítica), na região a ser interpolada dados globais de vento medidos por escaterômetros. No caso do presente trabalho o problema surge em áreas, de uma dada seção, em que o padrão de velocidade é muito diferente, assim como a densidade de dados. Deste modo ao impor uma função analítica, para todo o domínio de interpolação, os padrões de velocidade podem vir a ser distorcidos ou super-alisados.

O método consiste em um algoritmo de interpolação simples. Tal algoritmo requer como *input* dados organizados em uma grade de interpolação regular. Contudo, os dados não estão dispostos em tal grade. Portanto, cada seção vertical de velocidade foi inicialmente interpolada linearmente para a resolução desejada. A grade escolhida possui resoluções vertical e horizontal de 5 m e 1 km, respectivamente.

Sendo $z_i(x_i, y_i)$ a velocidade perpendicular a radial, interpolada linearmente, o algoritmo calcula a

matriz de autocorrelação na área centrada em (x_i, y_i) e limitada a *lags* (x_l, y_l) escolhidos arbitrariamente de modo a garantir a integridade do sinal original (Equação 2).

$$\begin{aligned}x_l &= x_i \pm X \\y_l &= y_i \pm Y\end{aligned}\tag{2}$$

onde os valores máximos de X e Y são 5 km e 70 m, respectivamente.

Portanto, para cada ponto de grade uma matriz de autocorrelação é calculada. A velocidade perpendicular à radial $z'_i(x_i, y_i)$, interpolada, consiste portanto na média ponderada dos valores de z_i no perímetro de x_l e y_l , sendo os pesos os valores da autocorrelação normalizados pelo seu valor máximo (c_N). A Equação 3 ilustra como foram calculados os coeficientes c_N e a Equação 4 os valores interpolados $z'_i(x_i, y_i)$.

$$c_N(x_l, y_l) = \sum_{x_l, y_l} Z z_l \times \frac{1}{c_{max}}\tag{3}$$

onde $Z(x_i, y_i)$ corresponde ao z_i no perímetro de x_l e y_l , $z_l = Z(x_i + x_l, y_i + y_l)$ e c_{max} o valor máximo da autocorrelação no *lag* igual a zero.

$$z'_i(x_i, y_i) = \frac{\sum c_N Z}{\sum c_N}\tag{4}$$

Vale ressaltar que, nas regiões próximos as bordas da grade de interpolação, ou seja se alguma condição descrita pela Equação 5 for satisfeita, assume-se que a estatística dos dados contidos em Z próximos a essa borda permanece inalterada. Em outras palavras, ao longo de topo o processo de interpolação Z não muda de tamanho, de modo que nas áreas próximas aos limites da grade, impõe-se que o centro da matriz de autocorrelação deve corresponder ao ponto a ser interpolado em (x_i, y_i) .

$$\begin{aligned}x_i - 5 &< 0 & x_i + 5 &> x_{imax} \\y_i - 70 &< 0 & y_i + 70 &> y_{imax}\end{aligned}\tag{5}$$

Outro ponto importante a ser incluído na descrição no procedimento de interpolação é a remoção da média e tendência linear da seção de velocidade, antes de iniciar o procedimento. O intuito é calcular as

matrizes de autocorrelação apenas a partir da variabilidade dos dados. Ao final do processo as médias e tendências foram somadas ao campo interpolado.

Com a finalidade de quantificar a eficiência da interpolação elaborou-se um teste simples. Do conjunto de dados original foram retirados aleatoriamente cerca de 10% dos dados (Figura 7). Então aplicou-se o processo de interpolação, afim de se estimar a velocidade nas posições dos dados retirados. A raiz do erro médio quadrático (*Root Mean Square*, rms) das estimativas em relação aos dados retirados, foi calculada.

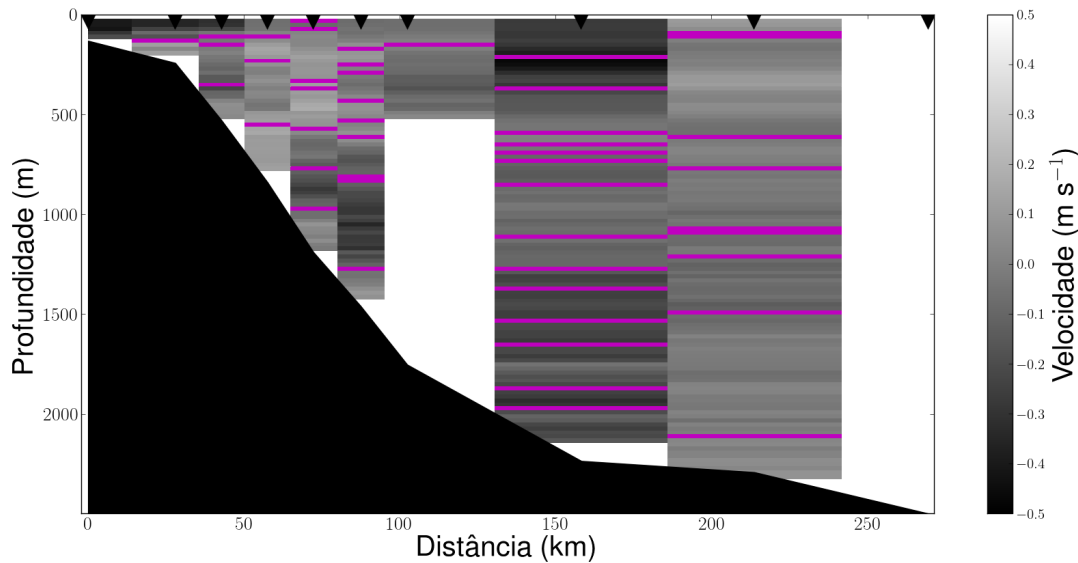


Figura 7: Seção vertical de velocidade perpendicular à radial 3 do cruzeiro CERES-IV. As áreas em magenta representam um exemplo de 10% das posições em que os dados foram retirados, com a finalidade em realizar o teste de qualidade. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

Este teste foi repetido 500 vezes para quatro diferentes processos de interpolação, além do esquema descrito, de modo a obtermos uma série de rms para cada um. Os processos testados foram:

1. Linear
2. Cúbica
3. AO cuja a função de correlação é uma Gaussiana, seguindo a aplicação de *Silveira et al.* (2004)
4. Mínima curvatura utilizado pelo *Generic Mapping Tools* (GMT) (*Smith & Wessel*, 1990)

Estes quatro esquemas foram ajustados de modo a melhor representar o sinal de interesse. Os critérios para a definição dos ajustes foram meramente visuais.

5 Resultados

Uma vez realizado o processo de interpolação pode-se apresentar seções de velocidade interpolada perpendicular as radiais. As Figuras 8 à 11 apresentam uma comparação entre o campo interpolado e o original. Fica claro que a interpolação manteve os padrões do sinal original, como desejado. As Figuras 8 e 11 apresentam o sistema de correntes esperados, junto ao talude continental. Vale ressaltar que nas radiais 2 e 3 o padrão de escoamento é mais complexo e isto ocorre, provavelmente, devido ao meandramento da CB e CCI.

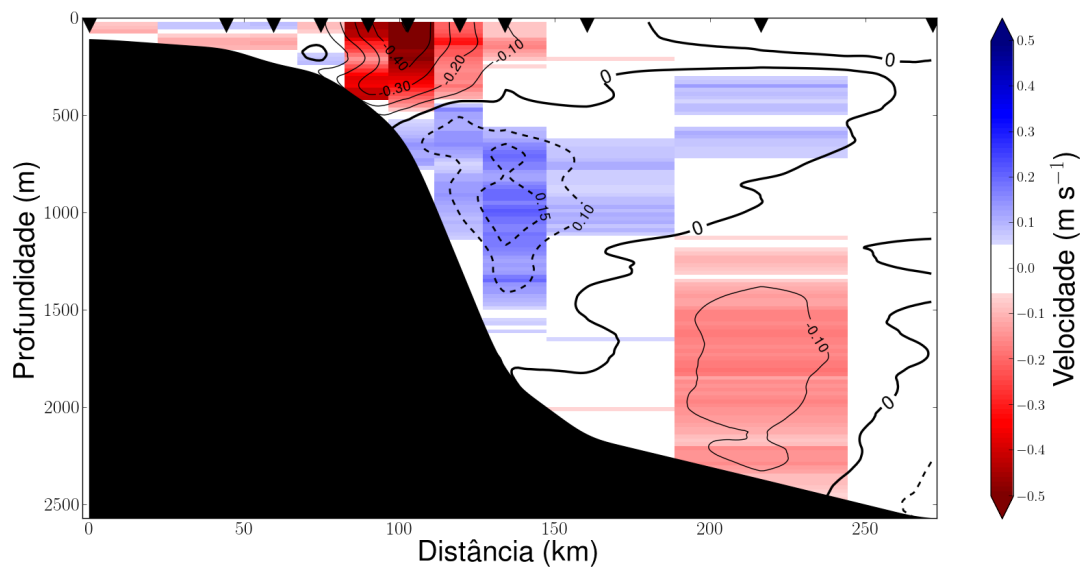


Figura 8: Seção vertical de velocidade perpendicular à radial 1 do cruzeiro CERES-IV. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. A escala de cores representa o sinal original e os contornos o sinal interpolado. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

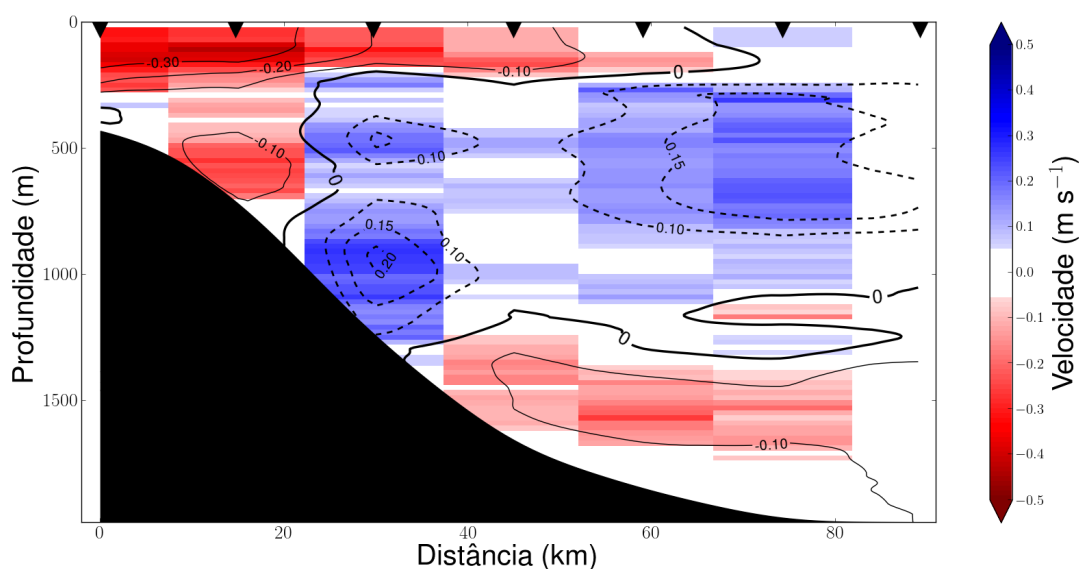


Figura 9: Seção vertical de velocidade perpendicular à radial 2 do cruzeiro CERES-IV. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. A escala de cores representa o sinal original e os contornos o sinal interpolado. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

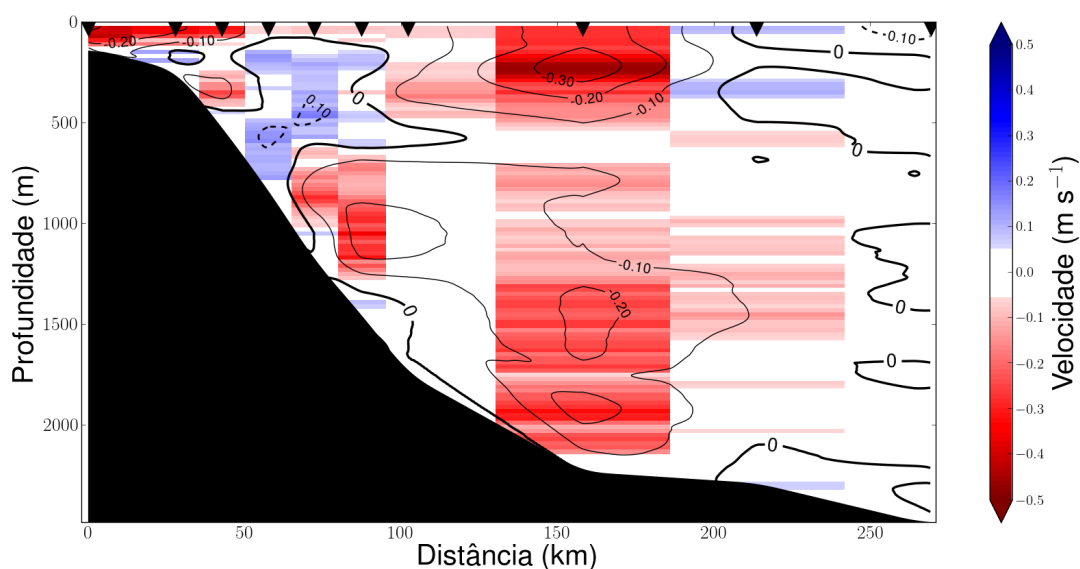


Figura 10: Seção vertical de velocidade perpendicular à radial 3 do cruzeiro CERES-IV. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. A escala de cores representa o sinal original e os contornos o sinal interpolado. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

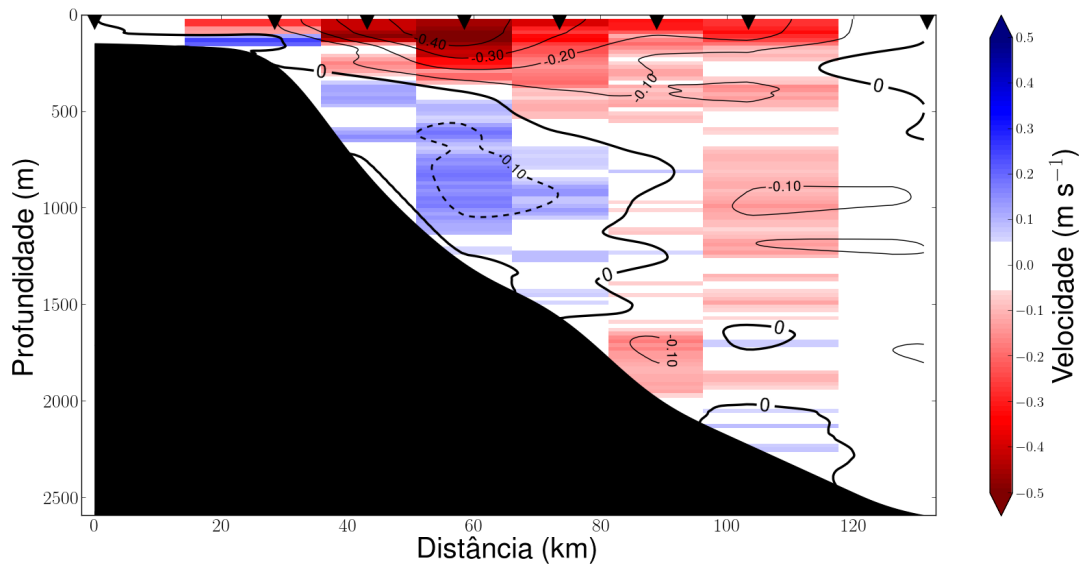


Figura 11: Seção vertical de velocidade perpendicular à radial 4 do cruzeiro CERES-IV. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. A escala de cores representa o sinal original e os contornos o sinal interpolado. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

Com o intuito de quantificar a eficiência da interpolação e garantir que o procedimento realizado não é apenas um suavizador da interpolação linear, foi elaborado o teste descrito na seção anterior. A média do rms obtido para a interpolação empregada foi de $0,044 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão $0,003 \text{ m s}^{-1}$. O valor do rms demonstra que a diferença média entre os dados ocultados e os estimados não ultrapassa o erro do LADCP, portanto a Interpolação Baseada na Correlação (IBC) é estável.

A Figura 12 apresenta os *boxplots* das séries de rms calculadas para os diferentes tipos de interpolação. É possível notar que a IBC estima melhor os valores retirados, dos dados, em comparação a interpolação linear. É interessante notar que para o conjunto de dados em questão, alternativas como a interpolação GMT e aquela aplicada por *Silveira et al.* (2004) estimam bem o campo de velocidades. Por fim as Figuras 13 à 16 apresentam as seções de velocidade interpoladas.

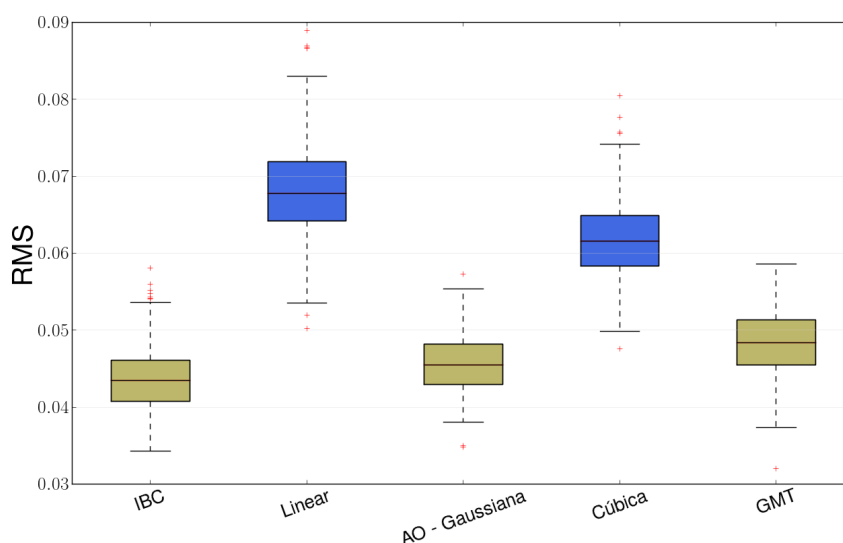


Figura 12: *Boxplots* das séries rms dos diferentes tipos de interpolações empregados no teste de eficiência. Os intervalos delimitados pelas linhas tracejadas representa o intervalo com 95% de confiança. As cruces vermelhas representam os valores fora do intervalo de confiança.

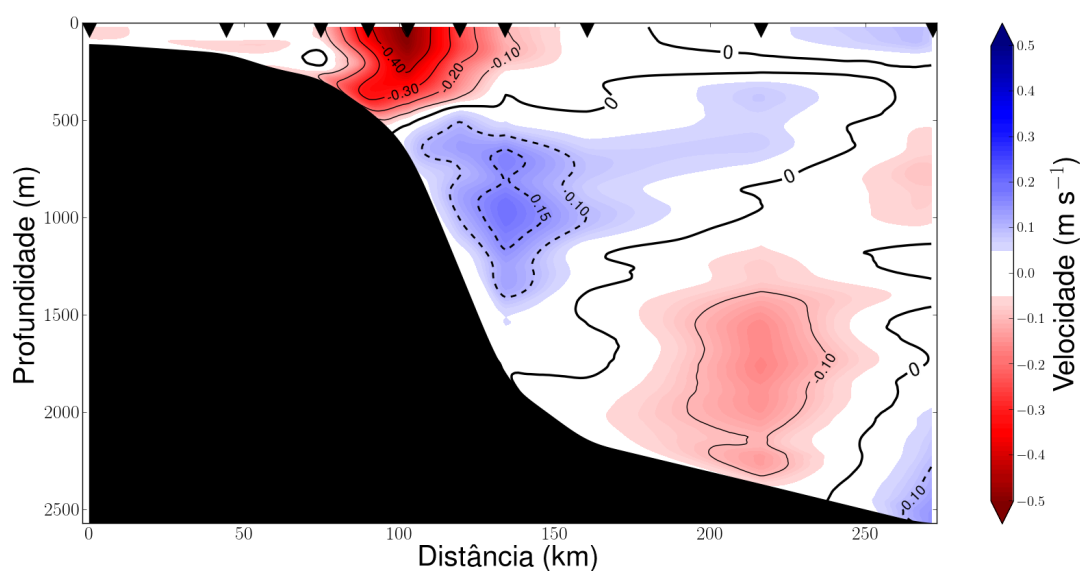


Figura 13: Seção vertical de velocidade interpolada perpendicular à radial 1 do cruzeiro CERES-IV. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

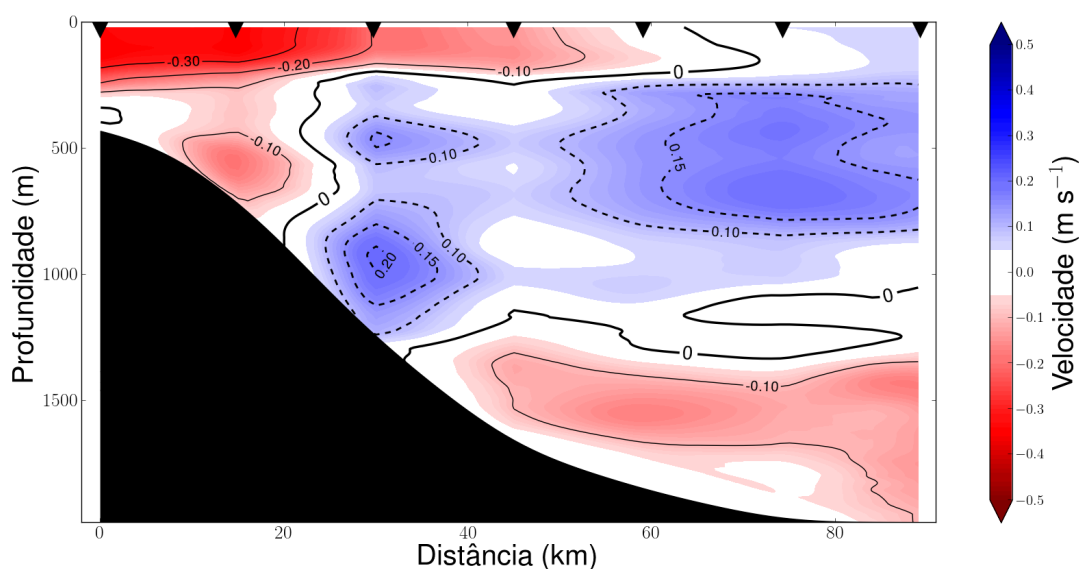


Figura 14: Seção vertical de velocidade interpolada perpendicular à radial 2 do cruzeiro CERES-IV. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

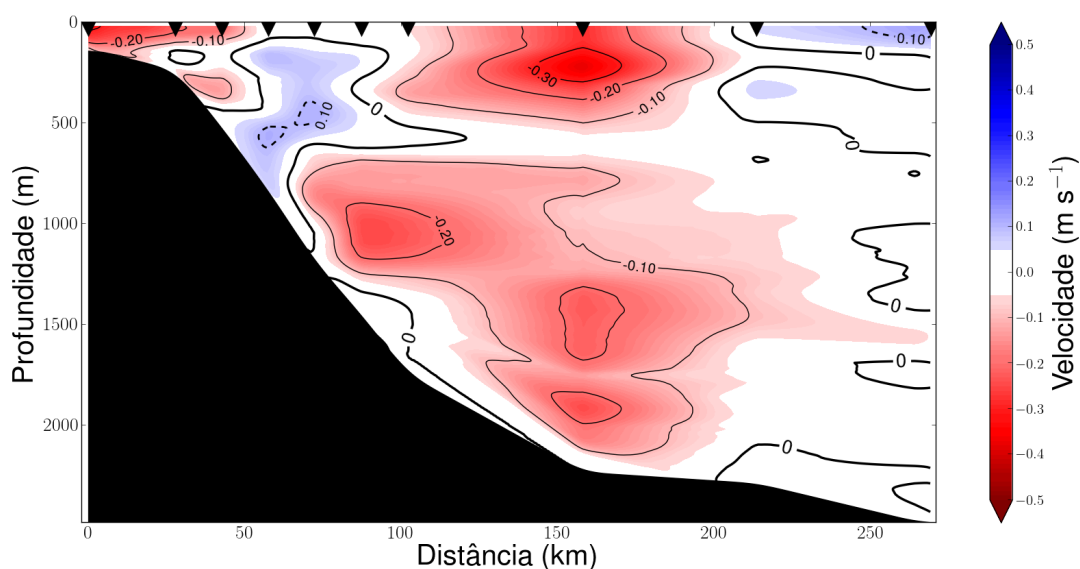


Figura 15: Seção vertical de velocidade interpolada perpendicular à radial 3 do cruzeiro CERES-IV. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

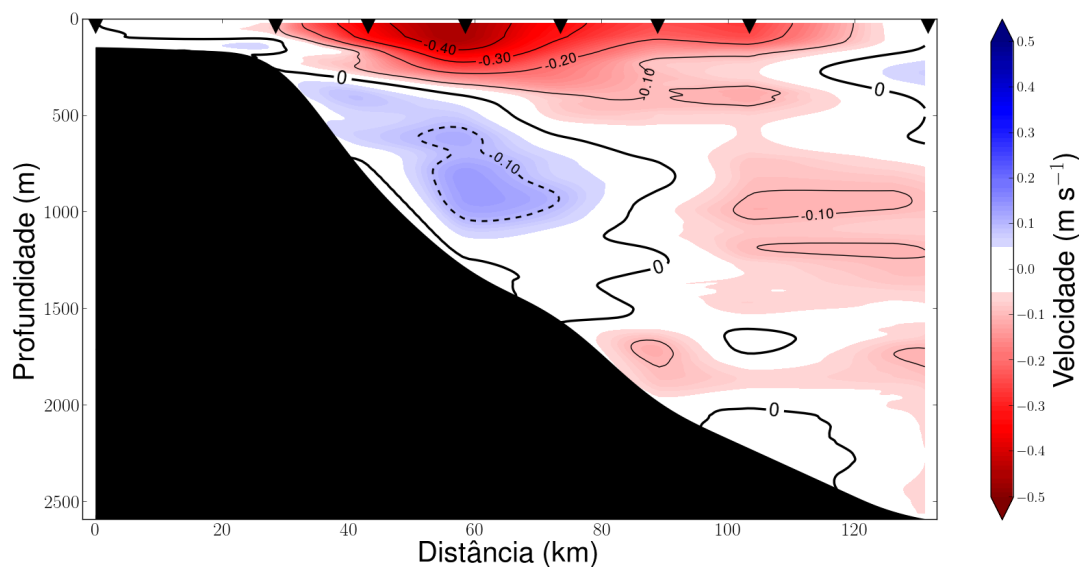


Figura 16: Seção vertical de velocidade interpolada perpendicular à radial 4 do cruzeiro CERES-IV. Velocidades negativas representam escoamentos para sudoeste e positivas para nordeste. Os triângulos pretos apresentam a posição das estações oceanográficas.

6 Conclusões

O procedimento de interpolação IBC mostrou-se eficiente para o conjunto de dados de LADCP do CERES-IV. Um próximo passo a seria sofisticar o algoritmo, adequando o cálculo da matriz de autocorrelação somente para os dados observados em função da densidade de dados em uma dada área da seção a ser interpolada. Outro teste interessante, a ser aplicado, seria uma comparação mais rigorosa entre as interporlações cuja média do rms ficaram abaixo do erro do LADCP.

Referências

- Amante, C. & B. W. Eakins, 2009: Etopo1 1 arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis. Relatório técnico, NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24.
- Boebel, O., R. E. Davis, M. Ollitrault, R. G. Peterson, P. L. Richardson, C. Schmid, & W. Zenk, 1999: The Intermediate Depth Circulation of the Western South Atlantic. *Geophys. Res. Lett.*, 26(21), 3329 – 3332.

- Carter, E. F. & A. R. Robinson, 1987: Analysis Models for the Estimation of Oceanic Fields. *J. Atmos. Oc. Tech.*, *4*, 49–74.
- Emery, W. J. & R. E. Thompson, 2001: *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier, 2ª edição.
- Firing, E., 1998: Lowered ADCP Development and Use in WOCE. *Int. WOCE Newlett.*.
- Fischer, J. & M. Visbeck, 1993: Deep Velocity Profiling with Self-contained ADCPs. *J. Atmos. Oc. Tech.*, *10*, 764–773.
- Gandin, L. S., 1965: *Objective analysis of meteorological fields*. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 242 pp.
- Legeais, J.-F., M. Ollitrault, & M. Arhan, 2012: Lagrangian observations in the Intermediate Western Boundary Current of the South Atlantic. *Deep-Sea Res. II*. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.07.028>.
- Polito, P. S., W. T. Liu, & W. Tang, 1999: Correlation-Based Interpolation of NSCAT Wind Data. *J. Atmos. Oc. Tech.*, *17*, 1128–1138.
- Silveira, I. C. A., L. Calado, B. M. de Castro, M. Cirano, J. A. M. Lima, & A. S. Mascarenhas, 2004: On the Baroclinic Structure of the Brazil Current-Intermediate Western Boundary Current at 22°-23°S. *Geophys. Res. Lett.*, *31*, 4308.
- Silveira, I. C. A., A. C. K. Schmidt, E. J. D. Campos, S. S. de Godoi, & Y. Ikeda, 2001: A Corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *R. bras. Oceanogr.*, *48*(2), 171–183.
- Smith, W. H. F. & P. Wessel, 1990: Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, *55*(3), 293–305.
- Stramma, L. & M. England, 1999: On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, *104*(C9), 20.863–20.883.
- Visbeck, M., 2002: Deep Velocity Using Acoustic Doppler Current Profilers: Bottom Track and Inverse Solutions. *J. Atmos. Oc. Tech.*, *19*, 794–807.