

# COMO OS VÓRTICES INTERAGEM COM A CONFLUÊNCIA BRASIL-MALVINAS?

**Cayo Prado Fernandes Francisco, André Campos Kersten Schmidt, Ilson Carlos Almeida da Silveira**

Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo – Praça do Oceanográfico, 191  
Cidade Universitária – São Paulo/SP  
cayoprado@io.usp.br

**Resumo-** A Confluência Brasil-Malvinas é uma das regiões mais energéticas do oceano mundial. Formada pelo encontro da Corrente do Brasil com a Corrente das Malvinas é demarcada por um intenso gradiente de temperatura. Imagens de satélites e observações *in situ* mostram a presença de vórtices, tanto ciclônicos como anticiclônicos, na região. O objetivo deste trabalho é investigar a interação destas estruturas coerentes com o escoamento médio da Confluência Brasil-Malvinas e suas implicações. Para tanto, modelamos o sistema confluyente utilizando o método semi-analítico denominado Dinâmica de Contornos. Observamos nos experimentos que os vórtices alteram o escoamento médio significativamente, induzindo vorticidade na frente modelada e com seus efeitos relacionados fortemente à posição e intensidade inicial das perturbações.

**Palavras-chave:** Corrente do Brasil, Corrente das Malvinas, confluência, oceanografia física.

**Área do Conhecimento:** I – Ciências Exatas e da Terra

## Introdução

O exemplo de retroflexão de Correntes de Contorno Oeste (CCOs) no Atlântico Sul é a separação da Corrente do Brasil (CB) em sua região de confluência com a Corrente das Malvinas (CM). A CB flui quase meridionalmente para sul até aproximadamente 36°S onde começa a sua separação do continente estendendo-se até 38°S. Esta separação ocorre devido à confluência das águas quentes da CB com as águas de origem subpolar da CM, originando uma região de intenso gradiente de propriedades físicas denominada Confluência Brasil-Malvinas (CBM). É talvez o caso mais evidente de convergência de duas correntes de contorno do oceano mundial e está associado à intensa atividade vortical e energética. A Figura 1 apresenta uma imagem AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) desta região, extraída de Olson et al (1988). Podemos observar a presença marcante de estruturas típicas de mesoescala, como a separação em retroflexão da CB, a formação de um vórtice de separação carregando águas originárias da CB para o domínio da CM e a presença de filamentação.

Os fenômenos observados na Figura 1 são recorrentes na região. De fato, imagens de satélites e medições *in situ* mostram a ocorrência e recorrência de vórtices, tanto ciclônicos como anticiclônicos, na região.

O objetivo deste trabalho é investigar a interação e o efeito destas estruturas coerentes sobre o escoamento médio da CBM. Particularmente desejamos responder a duas questões: Podem, essas perturbações,

desenvolvidas por instabilidades no escoamento médio, afetar sua velocidade e direção? Se podem, por quais mecanismos isso ocorre?

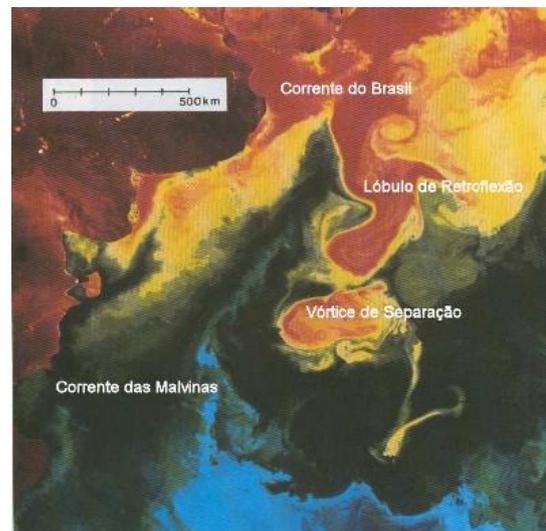


Figura1: Imagem AVHRR da Confluência Brasil-Malvinaseditada a partir de Olson et al (1988).

## Metodologia

Os efeitos das interações dos vórtices emitidos na região da CBM e o escoamento médio são estudados através do desenvolvimento do modelo teórico de Francisco (2007), baseado em Schmidt (2004) e Silveira e Flierl (2002). O modelo consiste de uma confluência de duas correntes de contorno oeste simétricas num oceano de 1-½ camadas quase-geostrófico, não viscoso e inercial no plano *f*. Este sistema de correntes, por sua vez, interage

com dois vórtices pontuais, um ciclônico, localizado no domínio da CB, e um anticiclônico, localizado no domínio da CM, a fim de mimetizar a região da CBM. Adicionalmente é utilizada a técnica semi-analítica da Dinâmica de Contornos (DC), que nos permite simplificar o problema através da discretização do campo de vorticidade potencial (VP) do escoamento. O modelo DC apresenta as seguintes características:

- Conservação de vorticidade potencial (VP):

$$\frac{d}{dt}q_i = \left[ \frac{\partial}{\partial t} + u_i \frac{\partial}{\partial x} + v_i \frac{\partial}{\partial y} \right] q_i = 0. \quad (1)$$

- Relação de inversibilidade:

$$M_{ij}\psi_j = [\delta_{ij}\nabla^2 + Z_{ij}] \psi_j = q_i. \quad (2)$$

- Discretização da VP:

$$q_i = q_{0i} + \Delta_i \mathcal{H}(y - \bar{y}_i - \eta_i) + \delta_{i,k} \Gamma_k f(R_k). \quad (3)$$

No modelo, o índice  $i$  representa o número de camadas,  $\Delta_i$  o salto de vorticidade entre as camadas,  $\delta_{i,k}$  é a função delta de Kronecker,  $k$  é o número de vórtices pontuais,  $\Gamma_k$  é a circulação associada aos vórtices e  $f(R_k)$  é a função que descreve os vórtices, lembrando que a repetição indicial implica soma.

Para a dinâmica equivalente-barotrópica, podemos simplificar a função acima para

$$q = q_0 + \Delta \mathcal{H}(y - \bar{y} - \eta) + \Gamma_k f(R_k), \quad (4)$$

devido à aproximação de 1-½ camadas apresentar somente uma camada dinamicamente ativa. Podemos reescrever a função  $f(R_k)$ , para cada vórtice, como

$$f(R) = \Gamma \delta(x - x_v(t)) \delta(y - y_v(t)), \quad (5)$$

com  $\delta(x - x_v(t))$  sendo a função delta de Dirac e o par  $(x_v(t), y_v(t))$ , a posição do vórtice num instante  $t$  qualquer.

Separando o campo  $q$  em um estado básico e um estado perturbado, temos:

$$\bar{q} = q_0 + \Delta \mathcal{H}(y - \bar{y}) e \quad (6)$$

$$q' = \Delta [\mathcal{H}(y - \bar{y} - \eta) - \mathcal{H}(y - \bar{y})] + \Gamma_k f(R_k), \quad (7)$$

com a relação de inversibilidade dada acima.

Adicionalmente, realizamos a evolução temporal do contorno e dos vórtices pontuais através das equações lagrangeanas

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x &= \bar{u} + u' \\ \frac{d}{dt}\eta &= \bar{v} + v'. \end{aligned} \quad (8)$$

Resolvemos então, o sistema lagrangeano não linear calculando as soluções para os campos  $v$  e  $v'$ , e as velocidades correspondentes podem ser obtidas a partir da definição de função de corrente por

$$[u, v] = \left[ -\frac{\partial \psi}{\partial y}, \frac{\partial \psi}{\partial x} \right]. \quad (9)$$

O escoamento básico (Figura 2), por sua vez, é fornecido pelo escoamento baroclínico associado à convergência de duas CCOs.

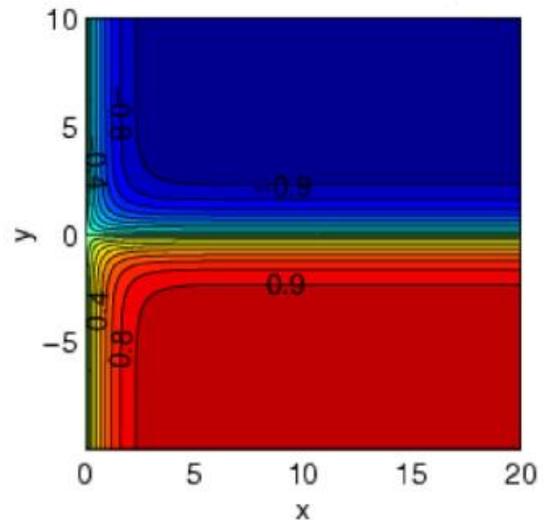


Figura 2: Escoamento baroclínico representando a convergência de duas CCOs.

## Resultados

Foram realizados experimentos onde variamos as posições iniciais e intensidades dos vórtices. A configuração inicial do campo de VP foi obtida a partir da evolução prévia do estado básico, sem a presença de perturbações, a fim de simularmos o padrão característico de escoamento na região, marcado pela presença da retroflexão da CB. A Figura 3 representa esquematicamente esta condição inicial.

Estes experimentos revelaram que os vórtices pontuais alteram o escoamento médio significativamente, com seus efeitos relacionados fortemente à posição e intensidade iniciais das perturbações. Observa-se nos experimentos a formação de novos vórtices devido à absorção, pela frente, dos vórtices pontuais. A formação de dipolos e perturbações sem padrões claramente definidos na frente demarcam a indução de vorticidade adicional pelos vórtices pontuais na

estrutura de retroflexão. Tais feições foram dependentes das posições iniciais dos vórtices pontuais e da intensidade de sua circulação. Os experimentos também mostraram que ocorrem trocas de água intensas entre as duas regiões, principalmente nos eventos de formação de vórtices devido ao enrolamento da frente.

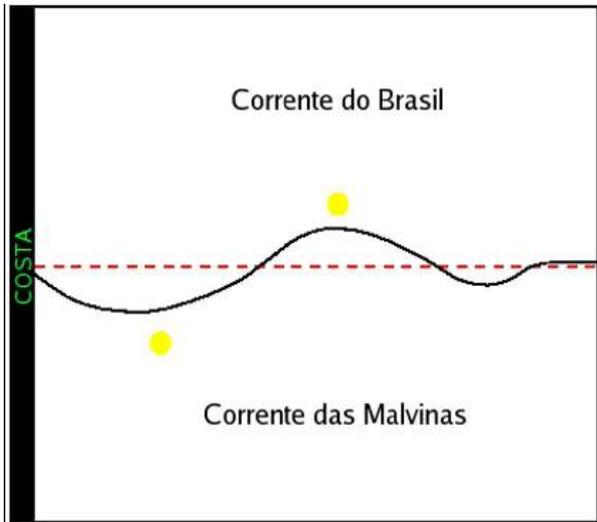


Figura 3: Campo inicial para os experimentos DC.

Como exemplo dos resultados obtidos mostramos na Figura 4 o experimento denominado *Exp3*.

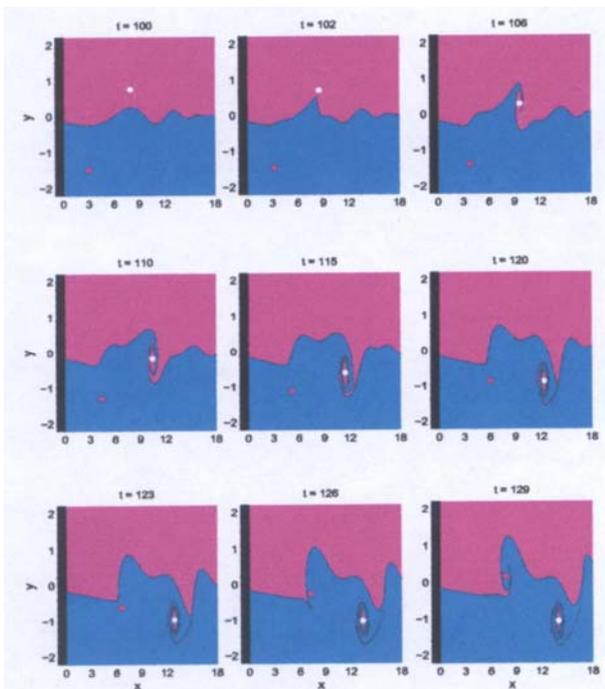


Figura 4: Experimento *Exp3*.  $x_{v1} = 3$ ,  $x_{v2} = 8$ ,  $y_{v1} = -1,5$  e  $y_{v2} = 0,5$  e  $[\Gamma] = 1$ . Os pontos amarelo e magenta representam os vórtices pontuais.

No experimento *Exp3* (Figura 4) as posições iniciais das perturbações são  $x_{v1} = 3$ ,  $x_{v2} = 8$ ,  $y_{v1} = -1,5$  e  $y_{v2} = 0,5$ , onde 1 representa a posição no domínio da CM e 2 a posição no domínio da CB. A evolução do sistema começa em  $t = 100$  e  $t = 102$ , há clara advecção de águas de baixa VP, da região da CM, pelo vórtice ciclônico. Em  $t = 108$ , a frente se enrola sobre o vórtice configurando a formação de um vórtice. O vórtice que se encontra mais distante da frente interage significativamente com esta, devido ao efeito imagem, causado por sua maior proximidade da parede, pela interação com a anomalia inicial da frente pela advecção causada pelo fluxo médio. Esta interação provoca uma deformação, já visível em  $t = 111$ , quando também observamos que o vórtice ciclônico entra no domínio da CM. Entre  $t = 118$  e  $t = 127$  verificamos a absorção pela frente do vórtice ciclônico carregando águas do domínio da CB, já totalmente localizado na região da CM. Durante este mesmo período o vórtice anticiclônico também é absorvido pela frente, carregando águas de CM em direção à região de alta VP, devido à interação entre os vórtices.

O comportamento modelado no experimento *Exp3* é compatível com os resultados de algumas observações na CBM. Lentini et al (2006), analisando dados altimétricos TOPEX/Poseidon na região da CBM, entre janeiro de 1993 e outubro de 1998, relataram que alguns vórtices emitidos pela CB são reabsorvidos pela corrente como mostrado no experimento *Exp3*. Buss et al (2005), utilizando dados de satélite originários de diferentes fontes, observaram a evolução de um vórtice anticiclônico, em setembro de 2002, que foi gerado e absorvido na região da CBM.

## Conclusão

Os experimentos mostram que a ação das estruturas coerentes altera o escoamento médio significativamente, com seus efeitos relacionados fortemente à posição e intensidade iniciais das perturbações.

São observadas a formação de dipolos e perturbações sem padrão claramente definido na frente, dependendo das posições iniciais dos vórtices e da intensidade de sua circulação. Pode-se verificar que os vórtices anticiclônico e ciclônico interagem fortemente com a frente de VP e em determinadas situações há interação entre os mesmos. Os experimentos evidenciam as trocas de água intensas entre as duas regiões, principalmente nos eventos em que os vórtices pontuais promovem o enrolamento da frente.

Os experimentos também evidenciam, de forma clara, o efeito das forças de origem barotrópica sobre a dinâmica da frente da CBM.

Sua análise nos permite concluir que o efeito das perturbações induz vorticidade no escoamento. Todos os experimentos realizados revelam esta característica, com as velocidades geradas pelos vórtices pontuais propiciando efetivamente o aumento de vorticidade na frente da CBM.

### **Agradecimentos**

Gostaríamos de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento deste trabalho através do processo 02/12006.

### **Referências**

- BUSS, R.S.; MATA, M.M.; GARCIA, C.A.E.; KAMPEL, M.; OLIVEIRA, E.N.; Lorenzetti, J.A. Multi sensor satellite and in situ measurements of a warm core ocean eddy south of the Brazil-Malvinas Confluence region. **Rem. Sens. Envir.**, 100: 52-66, 2005.
- FRANCISCO, C.P.F. Dinâmica da mesoescala da Confluência Brasil-Malvinas. Tese (Doutorado em Oceanografia Física). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 2007.
- LENTINI, C.A.D.; GONI, G.J.; OLSON, D.B. Investigation of the Brazil Current rings in the confluence region. **J. Geophys. Res.**, 111: 1-17, 2006.
- OLSON, D.; PODESTÁ, G.P.; BROWN, O. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas currents. **Deep Sea Res.**, 35: 1971-80, 1988.
- SCHMIDT, A.C.K. Interação margem continental, vórtices e jatos geofísicos. Tese (Doutorado em Oceanografia Física). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 2004.
- SILVEIRA, I.C.A.; FLIERL, G.R. Eddy formation in 2-½ layer quasigeostrophic jets. **J. Phys. Oceanogr.**, v.62, 729-45, 2002.