

## **Processos de formação dos anticiclones da Corrente de Contorno Profunda no Atlântico Sul**

**Vilela-Silva<sup>1</sup>, F.; da Silveira<sup>2</sup>, I.C.A.; Gangopadhyay<sup>3</sup>, A.**

*<sup>1,2</sup>Universidade de São Paulo - Instituto Oceanográfico - IO*

*<sup>1,2</sup>Praça do Oceanográfico, 191 - Butantã, São Paulo, SP - 05508-120*

*<sup>1,3</sup>University of Massachusetts Dartmouth - School for Marine Science and Technology - SMASST*

*<sup>1,3</sup>706 South Rodney French Blvd - New Bedford, MA - 02744-1221*

*<sup>1</sup>felipe.vilela.silva@usp.br; <sup>2</sup>ilson.silveira@usp.br; <sup>3</sup>avijit.gangopadhyay@umassd.edu*

### **RESUMO**

O clima no planeta Terra é fortemente influenciado pela MOC (Meridional Overturning Circulation ou, em português, Circulação de Revolvimento Meridional). Na costa nordeste brasileira, a Corrente de Contorno Profunda (CCP) é responsável por transportar a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) inter-hemisfericamente para o Oceano Austral e representa o ramo inferior da MOC no Atlântico. A CCP flui adjacente à margem continental americana e tem sido consideravelmente estudada entre o sul do Mar do Labrador (48°N) e cerca de 35°S, ao largo da costa leste brasileira. Ao atingir a faixa latitudinal entre 5°S e 11°S, a corrente se quebra em vórtices anticiclônicos que migram para o sul. A presente investigação propõe dar indícios para o mecanismo hidráulico responsável pela formação dos anticiclones da CCP no Atlântico Sul.

Palavras chave: anticiclones, CCP, Atlântico Sul

### **INTRODUÇÃO**

A Corrente de Contorno Profunda (CCP) se forma partir do afundamento de água fria no Talude Continental ao leste da Groenlândia e Mar do Labrador. Esta transporta a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) para o Atlântico Sul em direção à Corrente Circumpolar Antártica (CCA). Depois de adentrar no Hemisfério Sul e cruzar o arquipélagos de montes submarinos associados ao Atol das Rocas, a CCP se apresenta como um jato organizado em 5°S, ao largo de Recife, entre 1200 e 4000 metros de profundidade, fluindo adjacente ao talude continental e Platô de Pernambuco. Seu núcleo atinge velocidades de  $0,3 \text{ m s}^{-1}$  em torno de 2000 m. Seu transporte, baseado em estimativa a partir de 5 seções sinóticas de LADCP, é de  $22,1 \pm 5,3 \text{ Sv}$ , de acordo com Schott et al. (2005).

Dengler et al. (2004) apontaram, baseado em seções de velocidade perfiladas por LADCP, a persistência de dois lobos antissimétricos de velocidade abaixo de 1000 m em 11°S em março de 2000 e maio de 2003. Este padrão é consistente com aquele de um anticiclone no hemisfério austral. Os autores identificaram que os anéis de rotação anti-horária possuíam núcleo de velocidades em 2000 m e ocupavam a mesma porção da coluna de água da CCP tanto em profundidade como em limitação isopical. A conclusão era óbvia: entre 5°S e 11°S, a CCP se quebra e forma vórtices anticiclônicos robustos, de cerca de 200 km de diâmetro. De

acordo com a anomalia positiva de temperatura resultante do modelo FLAME, Dengler et al. (2004) apontam que os anticiclones são formados em 8°S. Notamos que em 8°S existe um prolongamento do Talude que cria uma inclinação na linha de costa que sugerimos ter influência na investigação em estudo. Com a intenção de facilitar a discussão, chamaremos tal variação da batimetria de “*Elevação de Maragogi*”.

A hipótese é levantada pelo fato do sistema se assemelhar ao problema apresentado por Stern & Whitehead (1990). Os autores apresentam a separação de um jato escoando ao longo de uma parede até encontrar uma inclinação obtusa que cria rotação no fluido. O problema é discretizado por um modelo invíscido com vorticidade em função de grau e testado por experimentos em laboratório. O trabalho fornece parâmetros como o ângulo crítico da parede curvada e a razão entre a vorticidade *inshore* e *offshore* que podem ser usados como referência para testar a semelhança com outros sistemas.

## OBJETIVOS

As variações temporais observadas na MOC dependem de mudanças espaciais e temporais nas correntes que pertencem ao sistema. Como a CCP faz parte do ramo inferior da MOC no Atlântico, o esclarecimento dos fenômenos apresentados pela corrente auxiliam na compreensão de flutuações de transporte de massa e calor na circulação termohalina em determinados sítios ou até mesmo em escala global (Caesar et al. 2018). Sendo assim, almejamos dar indícios para o esclarecimento do mecanismo hidráulico responsável pela quebra da CCP em anticiclones após cruzar a *Elevação de Maragogi*.

Pretendemos atingir o objetivo calculando os parâmetros fornecidos por Stern & Whitehead (1990) em termos médios (com dados de modelo) e a partir de instantâneos (observações). Os parâmetros são:

- Razão entre o tamanho da vorticidade negativa e positiva no núcleo da corrente ( $s$ );
- Inclinação da linha de costa.

## METODOLOGIA

Dados hidrográficos coletados durante duas comissões oceanográficas realizadas pela Marinha do Brasil (Comissões Oceano Nordeste I e II – ONeI e ONeII) são utilizados para mapear a estrutura vertical e padrão de circulação da CCP a montante e jusante da *Elevação de Maragogi*. Estações oceanográficas foram amostradas da superfície ao fundo do oceano por perfilador de condutividade-temperatura-pressão (CTD). Dado ao alcance limitado do perfilador Doppler de velocidades de bordo (VMADCP) do navio oceanográfico, os dados hidrográficos são usados para estimar velocidades geostróficas via Método Dinâmico Clássico (MDC).

As velocidades das correntes estimadas pelo MDC são referenciadas na isopical de  $\sigma_1 = 32.15$  (Eq. 1). As velocidades estimadas são combinadas com as de VMADCP pela função de correlação Gaussiana anisotrópica na Análise Objetiva (da Silveira et al. 2004) além de impor condições de contorno de *no-slip* (imposição de velocidades nulas na batimetria) sobre o fundo do oceano (detalhado em Krelling et al. (submetido)).

A formação dos anticiclones também é identificada pelo modelo hidrodinâmico HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model ou, em português, Modelo Oceânico de Coordenadas Híbridas). Os dados observados são usados para validação do modelo que também é comparado com as seções apresentadas em Schott et al. (2005). No intuito de visualizar o problema, o grupo fez uso do modelo (experimento 19.1) para produzir médias

temporais e mapas diários de vorticidade relativa em 2000 m e analisar as variações do sistema entre 1996 e 2011.

Com as duas fontes de dados, a razão de vorticidade ( $s$ ) pode ser estimada em termos médios e instantâneos (Eq. 2). A vorticidade relativa ( $\xi$ , Eq. 3) está sendo considerada como a variação zonal da velocidade meridional ( $v$ ), pois as velocidades zonais do modelo são menores que  $v$  em duas ordens de grandeza.

$$v(p) = \frac{-1}{f_0} \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial x} \quad [1] \quad s = \frac{d_1}{d_2} [2] \quad \xi = \frac{\partial v}{\partial x} \quad [3]$$

## RESULTADOS

Assim como o esperado, observamos a quebra da corrente em anticlones após cruzar o paralelo de 8°S, como indicado por Dengler et al. (2004), tanto nos mapas diários do modelo quanto nas seções de velocidade dos dados da ONeI. Apresentamos aqui a distribuição horizontal média (16 anos do modelo) da magnitude de velocidade (Fig. 1a) no núcleo da corrente (2000 m). Evidenciamos, na Figura 1b, o padrão de vorticidade a montante da *Elevação de Maragogi* (linha verde, Fig. 1a). O valor de  $s$  obtido (0.3) pode ser combinado com o ângulo da linha de costa ( $\theta = 78^\circ$ ) para formar o par de valores que será inserido no diagrama em Stern & Whitehead (1990) para definir o regime de separação do jato em relação à costa.

O mesmo pode ser feito com dados da ONeI e ONeII para aumentar a quantidade de evidências. A distribuição vertical das velocidades estimadas com os dados da ONeI (Fig. 1c) mostram a CCP, em 6°S, como um jato organizado e também será explorada com o mesmo método para comparação com a Figura 1b.

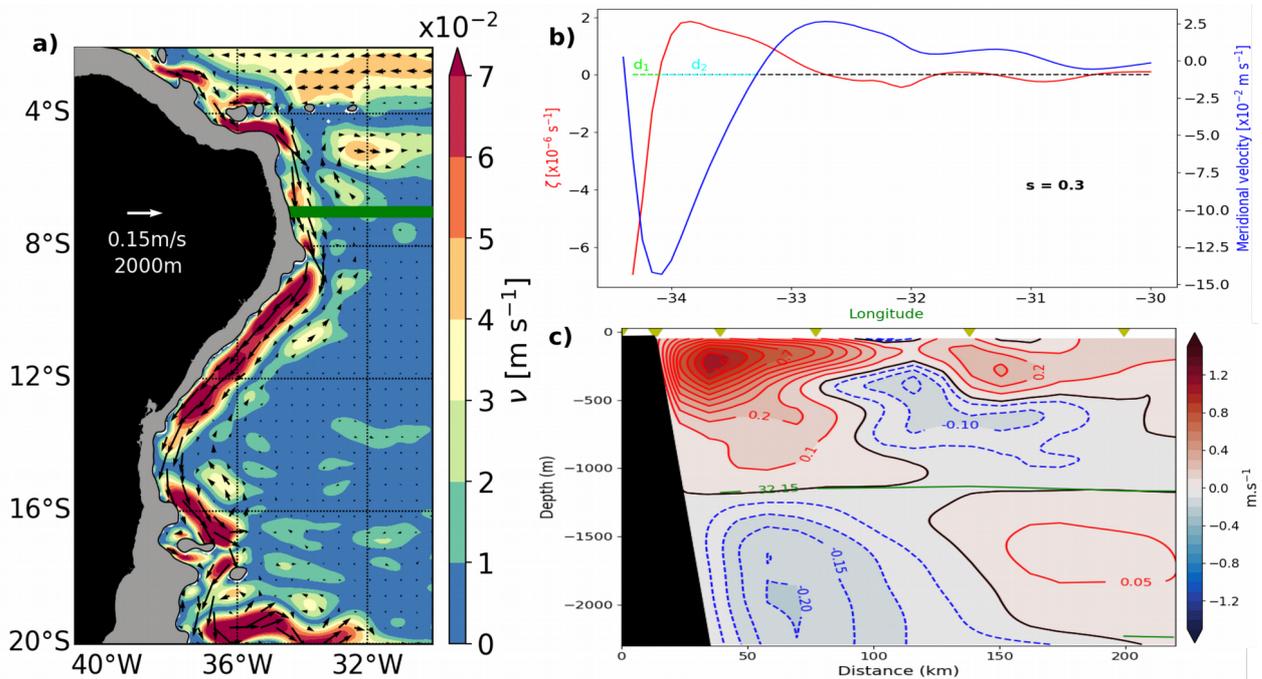


Figura 1: a) Mapa da distribuição horizontal média de magnitude de velocidade em 2000 m entre 1996 e 2011 do HYCOM. b) Padrão de velocidade meridional e  $\xi$  para o transecto da linha verde do mapa. c) Seção da combinação dos campos de velocidade de ADCP e

geostrófica referenciada na isopicnal de  $\sigma_1$  com condição de contorno de *no-slip* dos dados da ONeI em 6°S.

## CONCLUSÕES

O resultado preliminar sugere que a formação dos anticiclones da CCP se aproxima do problema discutido por Stern & Whitehead (1990), pois o par ( $s, \theta$ ), encontrado para o nosso sistema, pode ser inserido no diagrama de regime de separação de um jato costeiro ao longo de uma parede curvada apresentado pelos autores. Há também *snapshots* semelhantes no modelo hidráulico dos autores com o mapas diários do HYCOM.

Ainda é necessário um número maior de evidências que propomos investigar com o cálculo de  $s$  para dados *in situ*, além da estimativa do número lateral de Reynolds, tanto para o HYCOM quanto para os dados dos cruzeiros, que também será comparada com outro diagrama do trabalho de Stern & Whitehead (1990).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAESAR, L.; RAHMSTORF, S.; ROBINSON, A.; FEULNER, G. & SABA, V. 2018. Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation. **Nature**. 556 (7700), 191.

DA SILVEIRA, I.C.; CALADO, L.; DE CASTRO, B.M.; CIRANO, M.; LIMA, J. & MASCARENHAS, A.D.S. 2004. On the baroclinic structure of the Brazil current–intermediate western boundary current system at 22°–23°S. **Geophysical Research Letter**. 31 (14).

DENGLER, M.; SCHOTT, F.; EDEN, C.; BRANDT, P.; FISCHER, J. & ZANTOPP, R.J. 2004. Break-up of the Atlantic Deep Western Boundary Current into eddies at 8°S. **Nature**. 432 (7020), 1018-1020.

KRELLING, A.P.M.; GANGOPADHYAY, A.; DA SILVEIRA, I.C.A.; VILELA-SILVA, F. SUBMETIDO. Development of a Feature Oriented Regional Modeling System for the North Brazil Undercurrent region (1°-11°S) and its application to a Process Study on the Genesis of the Potiguar Eddy. **Journal of Operational Oceanography**. TJOO-2019-0011.

SCHOTT, F.A.; DENGLER, M.; ZANTOPP, R.; STRAMMA, L.; FISCHER, J. & BRANDT, P. 2005. The shallow and deep western boundary circulation of the South Atlantic at 5–11°S. **Journal of Physical Oceanography**. 35 (11), 2031-2053.

STERN, M.E. & WHITEHEAD, J.A. 1990. Separation of a boundary jet in a rotating fluid. **Journal of Fluid Mechanics**. 217, 41-69.