

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N<sup>o</sup> 66/6: 1231-1246  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **SOBRE A VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA (EKE) NA CONFLUÊNCIA BRASIL- MALVINAS**

*On the Spatial and Temporal Variability of Eddy Kinetic Energy (EKE) at Brazil-  
Malvinas Confluence*

**Caio Sampaio Fonteles<sup>1</sup>, Carlos Cesar Yoshihiro Otuka Fujita<sup>1</sup>, José Luiz  
Lima de Azevedo<sup>1</sup> & Mauricio Magalhães Mata<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande - FURG**

**Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima (LEOC), Instituto de Oceanografia**

Av. Itália, Km 8, Campus Carreiros, Rio Grande, RS, 96203-900, CP 474, Brasil.

fontelescaio@gmail.com; ocufujita@gmail.com;

joseazevedo@furg.br; mauricio.mata@furg.br

*Recebido em 09 de Abril, 2013/ Aceito em 14 de Agosto, 2013*

*Received on April 09, 2013/ Accepted on August 14, 2013*

### **RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo estudar a variabilidade da energia cinética turbulenta (EKE) oceânica na região da Confluência Brasil-Malvinas (CBM). Dados altimétricos de anomalia de velocidade geostrofica foram utilizados para a estimativa da EKE e, ao mesmo tempo, o produto altimétrico de topografia oceânica foi empregado para a investigação de feições oceanográficas na região de estudo, entre 1992 e 2011. A variabilidade espacial foi investigada a partir de análises de composições em diferentes estágios energéticos da EKE (baixa, média e alta). Foram utilizadas tendências lineares, análises espectrais e de ondeletas para avaliar a variabilidade temporal desta forma de energia. Ainda, foram feitas correlações cruzadas em relação a índices de modos de variabilidade climática. De maneira geral, foi observado que no regime de baixas energias a corrente atinge sua maior extensão ao sul e o regime mais energético ficou marcado pela presença de vórtices liberados pela corrente seguido de retração do primeiro meandro de retroflexão. A EKE teve tendência de aumento significativa ao longo dos 18 anos estudados, com uma taxa positiva de 0,23 cm<sup>2</sup> s<sup>-2</sup> por mês. Esse aumento pode ter ocorrido devido a duas causas: (i) o aumento da atividade de mesoescala na região e (ii) a uma variabilidade interanual da posição média da CBM, relacionada com a intensificação dos campos de ventos de larga escala do hemisfério Sul.

**Palavras chaves:** Confluência Brasil-Malvinas, Energia Cinética, Variabilidade Interanual, Altura Superficial do Mar, Anticiclone Zapiola.

### **ABSTRACT**

This work aimed to study the eddy kinetic energy (EKE) variability of the Brazil-Malvinas Confluence (CBM). We used geostrophic velocity anomalies data derived from satellite altimetry measurements between 1992 and 2011 in order to estimate the EKE and Mean Absolute Dynamic Topography data to investigate oceanographic features of that region. Spatial variability was assessed from composite analyses in different EKE energetic stages (low, medium and high). Linear trends, spectral and wavelet analyses were performed in order to assess EKE temporal variability. Moreover, we

also investigated EKE correlations with climate variability. It was observed that during low energy regimes the Brazil Current reached its southernmost excursion. The highest energetic stage was marked by the currents eddy shedding followed by a retraction of the first retroflexion meander. The EKE presented significant increasing trend, marked by a  $0.23 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$  monthly rate since 1992. This positive rate may have occurred due to two reasons: (i) increasing in the mesoscale activity associated with eddies and (ii) interannual variability in the average position of BMC, caused by large scale wind fields intensification over the SH.

**Keywords:** Brazil Malvinas Confluence, EKE, Interannual Variability, Sea Surface Height, Zapiola Drift.

## 1. INTRODUÇÃO

No oceano Atlântico Sul, as principais correntes associadas ao giro subtropical são: Corrente de Benguela (corrente de contorno leste), Corrente Sul Equatorial, Corrente do Brasil (CB) e Corrente do Atlântico Sul, fechando o giro subtropical (e.g., TOMCZAK & GODFREY; SCHMITZ, 1996 e TALLEY et al., 2011).

A CB é a Corrente de Contorno Oeste (CCO) associada ao giro subtropical e se forma a partir da bifurcação da Corrente Sul Equatorial em torno de  $10\text{-}20^\circ\text{S}$  (RODRIGUES et al., 2007). Desta bifurcação surgem a Corrente Norte do Brasil, que flui para o Equador, e a CB, que flui para sul (STRAMMA & ENGLAND, 1999; SILVEIRA et al., 2000; RODRIGUES et al., 2007). Próximo a sua região de origem, a CB ocupa um pequeno estrato da coluna de água (aproximadamente 100 m), sendo composta apenas pela Água Tropical. Nas latitudes aproximadas de  $20^\circ\text{S}$  e  $25^\circ\text{S}$  a corrente torna-se mais profunda e passa a transportar também a Água Central do Atlântico Sul e a Água Intermediária Antártica, respectivamente (STRAMMA & ENGLAND, 1999). Quanto mais ao sul ( $20^\circ\text{S}$  a  $25^\circ\text{S}$ ), maior a profundidade (100 a 670 m) e a intensidade média da CB (1,3 a 16 Sv) (MÜLLER et al., 1998).

As CCOs, como a CB, possuem importante papel no transporte de propriedades físico-químicas, como calor, salinidade e nutrientes. Dessa maneira, elas possuem um relevante papel na dinâmica dos oceanos e no clima global, sendo de suma importância o conhecimento tanto do seu comportamento médio como da sua variabilidade, estando esta última associada à mesoescala nos oceanos (e.g., JIA et al., 2011 FERRARI & WUNSCH, 2009; ZHAI & MARSHALL, 2013). Essa escala de movimento é representada principalmente por oscilações de intensidade e posição das correntes, meandros e

vórtices.

O limite sul da CB (Fig. 1) é marcado pelo seu encontro com a Corrente das Malvinas (CM), um ramo da Corrente Circumpolar Antártica (CCA) que, ao atravessar a passagem de Drake, se desloca para norte seguindo a quebra de Plataforma Continental Argentina até encontrar a CB, formando uma região altamente dinâmica e de grande relevância biológica, conhecida como Confluência Brasil-Malvinas (CBM) (e.g., TOMCZAK & GODFREY, 1994; MOORE & ABBOTT, 2000; SARACENO E PROVOST, 2012). Nesta região observa-se uma alta variabilidade de atividade de mesoescala associada a vórtices e meandramentos da CB e da CM (LENTINI et al., 2002; GARCIA et al., 2004; SARACENO et al., 2005; LENTINI et al., 2006). Além disso, a posição média da confluência varia sazonalmente de  $33^\circ\text{S}$  (inverno austral) a  $38^\circ\text{S}$  (verão austral) (GORDON, 1989) e também em escalas interanuais (GONI E WAINER, 2001), podendo esta flutuação estar associada a fatores locais, como o deslocamento sazonal da corrente, ou a fatores remotos, tais como oscilações dos campos de ventos de larga-escala (LUMPKIN & GARZOLI, 2011). Essa alta variabilidade torna a CBM uma das regiões mais energéticas dos oceanos (WILKIN & MORROW, 1994; STAMMER et al., 2006). A figura 1 ainda mostra de forma esquemática a circulação na região em diferentes cenários energéticos: em preto, a Corrente do Brasil no cenário de baixa energia e, em cinza, no cenário de alta energia, resultando na liberação de um vórtice pelo primeiro meandro de retroflexão, em branco a Corrente das Malvinas e as setas circulares representam a circulação no Anticiclone Zapiola (com base em GORDON, 1989; LENTINI et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2009). Por sua grande importância na circulação do oceano Atlântico Sul, a região da CBM será estudada neste trabalho em termos das suas

variabilidades espaciais e temporais.

Uma forma de entendermos a dinâmica de meso e larga escala nos oceanos é através da energia cinética associada a estes movimentos. Esta forma de energia pode ser dividida em energia cinética média (*Mean Kinetic Energy*, MKE) e energia cinética turbulenta (*Eddy Kinetic Energy*, EKE), sendo a última relacionada com a variabilidade do campo médio de velocidades (FERRARI & WUNSCH, 2009). Os principais processos que representam essa variabilidade são as oscilações sazonais dos fluxos médios, principal fonte de EKE nas regiões equatoriais, e os meandramentos e vórtices, associados principalmente às CCOs, onde estão as áreas de maior concentração de EKE nos oceanos (FERRARI & WUNSCH, 2009).

As primeiras descrições em escala global sobre esse tipo de energia só foram possíveis com o advento dos satélites altimétricos no início dos anos 1990 (e.g., STAMMER, 1997; STAMMER & WUNSCH, 1999). Ducet et al. (2000) descreveram a circulação oceânica a partir de dados altimétricos multisatelitais de alta resolução espacial ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) mostrando características globais desses campos de energia e também as maiores concentrações de EKE nos domínios das CCOs.

A distribuição espacial da EKE na CBM é caracterizada por uma forma de “C”, com os maiores valores concentrados na zona de encontro das correntes do Brasil e Malvinas e de liberação de vórtices. O valor máximo do campo médio de EKE na área da CBM é  $1700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$  (WILKIN & MORROW, 1994; STAMMER et al., 2006).

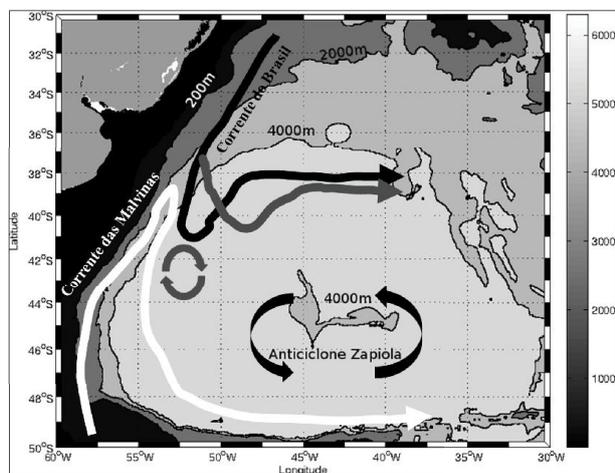


Fig. 1 - Representação esquemática da circulação na região da CBM. Barra de cores em metros.

No centro do “C”, situado aproximadamente em  $45^\circ\text{S}$  e  $45^\circ\text{W}$ , as energias são baixas pois estão relacionadas com uma feição denominada Anticiclone Zapiola, caracterizado por uma circulação quase-estacionária (DE MIRANDA et al., 1999; TEIXEIRA et al., 2009; SARACENO et al., 2009).

As principais formas de dissipação da EKE nessa região estão relacionadas à interação de vórtices com a batimetria e com a borda continental (ZHAI et al., 2010; AZEVEDO et al., 2012), sendo a última uma das principais fontes e sumidouros de energia de mesoescala. Zhai et al. (2010) se referiram a essas áreas como “cemitérios de vórtices”, uma vez que essas feições tendem a atingir as bordas continentais devido à sua autopropulsão para oeste (e.g., NOF, 1981; AZEVEDO & MATA, 2010; AZEVEDO et al., 2012).

Zhai & Marshall (2013) calculam que cerca de 80% da energia que entra no giro subtropical do oceano Atlântico Norte, através dos campos de ventos, é retirada do campo médio pela liberação de vórtices gerados por instabilidades baroclínicas. Além disso, 90% da energia cinética dos oceanos está armazenada em forma de EKE, associada principalmente à presença dos vórtices (FERRARI & WUNSCH, 2009).

Dentre os principais períodos de variabilidade dos oceanos em larga escala podemos citar o ciclo anual e o semianual. Esses padrões de oscilação são razoavelmente bem conhecidos e descritos, diferentemente da variabilidade interanual, visto que as séries temporais ainda não são longas o suficiente para a completa compreensão desta. Dois modos de variabilidade climática podem estar modulando parte da variabilidade da circulação oceânica, o Modo Anular Sul (SAM) e o El Niño-Oscilação Sul (ENSO).

O SAM é resultado das variações no campo de pressão atmosférica no entorno do continente antártico entre as médias ( $40^\circ\text{S}$ ) e as altas latitudes ( $65^\circ\text{S}$ ) no Hemisfério Sul (HS) (GONG & WANG, 1999). No HS, a diferença na pressão atmosférica entre médias e altas latitudes é responsável por forçar os ventos de oeste. Estes possuem grande intensidade e são as principais fontes de energia da CCA. O SAM é o principal modo de variabilidade climática no

HS (Thompson & Wallace, 2000) e, portanto, espera-se que tenha efeito sobre a circulação oceânica. Morrow et al. (2010), através da utilização de dados altimétricos, relacionaram as variações interanuais da EKE no HS com o SAM. Neste estudo, os autores encontraram que a resposta da EKE varia regionalmente em cada bacia oceânica.

O ENSO é um padrão de variabilidade climática que está relacionado a oscilações nas propriedades atmosféricas e oceânicas na região equatorial do oceano Pacífico. Esses eventos ocorrem, geralmente, em períodos entre 2 e 7 anos.

As principais propriedades estudadas para definir esse modo de variabilidade são o campo de pressão atmosférica e a temperatura superficial do mar (TSM). Este modo de variabilidade climática apresenta uma fase quente, conhecida como El Niño, que é caracterizada por um aumento na TSM próximo a América do Sul e uma diminuição do gradiente de pressão atmosférico no oceano Pacífico (OP) equatorial. Além disso, há também a fase fria, chamada de La Niña, com características contrárias ao El Niño. As temperaturas das águas no OP leste ficam mais frias que a média e ocorre a intensificação do gradiente de pressão.

Eventos de ENSO causam uma alteração dos ventos e das correntes na região do OP equatorial. No entanto, esse efeito não é sentido apenas localmente, pois a oscilação do padrão de ventos e da diferença entre as alturas superficiais do mar no OP, geram movimentos nos oceanos e na atmosfera, que afetam outros locais no globo.

Morrow et al. (2010) relacionaram a variação da EKE com o ENSO no OP Sul. Durante a fase quente, ele contribui para uma diminuição da atividade de mesoescala, enquanto na fase fria o efeito é inverso e existe um ganho de EKE na área estudada. No entanto, a circulação nessa região é modulada também pelo SAM, sendo a combinação dos dois modos determinantes para a circulação do OP Sul.

Considerando que a EKE está diretamente relacionada à energia que dirige a circulação de grande escala dos oceanos e que seus maiores valores se concentram nas CCOs, o estudo da variabilidade dessa energia nessas regiões é fundamental no entendimento da variabilidade da circulação oceânica. Desta forma, este estudo

analisa as variabilidades espaciais e temporais da EKE na região da CBM, bem como possíveis modulações causadas por modos de variabilidade climática.

Os dados altimétricos, usados neste trabalho para entender melhor a dinâmica dos oceanos, possuem importante papel nos estudos de geodésia marinha. No entanto, para fazer uso desses dados na geodésia, é necessário retirar o sinal gerado por marés, ventos e correntes que podem modificar a altura da superfície medida pelo altímetro. Assim o entendimento da variabilidade de feições oceânicas (correntes, vórtices, etc) pode auxiliar nos estudos relacionados à geodésia marinha.

## 2. DADOS E MÉTODOS

A descrição dos dados utilizados neste trabalho ocupa a primeira parte desta seção, mais especificamente os dados de altimetria por satélite e os índices dos modos de variabilidade climática provenientes da *National Oceanographic and Atmospheric Agency* (NOAA) e empregados neste estudo. Posteriormente, é apresentada a parte metodológica do trabalho, onde os diversos tipos de análise espacial e temporal aqui empregados são descritos com maiores detalhes.

### 2.1 Dados

Neste trabalho foram utilizados os dados provenientes do banco de altimetria satelital produzido pelo Ssalto/Duacs (*Segment Sol multimissions d'ALTimétrie, d'Orbitographie et de localisation précise/Data Unification and Altimeter Combination System*) distribuído gratuitamente pelo AVISO (*Archive, Validation et Interpretation des données des Satellite Oceanographiques*), com suporte do CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*, [oceanobs.com/duacs](http://oceanobs.com/duacs)). Mais especificamente, foram usados os produtos de topografia dinâmica absoluta (*Maps of Absolut Dynamic Topography*, MADT) e as anomalias de velocidade geostrófica zonal ( $u'$ ) e meridional ( $v'$ ), calculadas a partir das medidas multisatelitais de campos de anomalia do nível do mar (*Maps of Sea Level Anomaly - MSLA*). Estas anomalias foram calculadas (em  $\text{cm s}^{-1}$ ) com as equações geostróficas zonal e meridional, expressas na forma (JIA et al., 2011):

$$u' = -\frac{g}{f} \frac{\Delta\eta'}{\Delta y}, \quad (1)$$

$$v' = \frac{g}{f} \frac{\Delta\eta'}{\Delta x}, \quad (2)$$

onde  $u'$  e  $v'$  são as velocidades geostróficas zonal e meridional, respectivamente,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $f$  é o parâmetro de Coriolis,  $\eta'$  é a anomalia do nível do mar (SLA),  $\Delta y$  e  $\Delta x$  são distâncias entre dois pontos nos eixos meridional e zonal, respectivamente.

Os produtos utilizados foram da versão *Reference Series* do AVISO, onde sempre são utilizados dados de dois altímetros (TOPEX/Poseidon e Jason-1,2,3 e ERS-1,2 e Envisat) a fim de se obter os dados unificados. Essa versão é recomendada para estudos de variabilidade, uma vez que mantém o número de amostragem estacionário ao longo do tempo, em oposição à *Updated Series*, onde todos os altímetros em órbita no momento da elaboração do mapa são utilizados. Os campos disponibilizados são produtos semanais com resolução espacial de  $1/3^\circ \times 1/3^\circ$  para o período de outubro de 1992 a janeiro de 2011, totalizando 954 mapas. A fim de representar a região da CBM, os campos foram limitados em  $60^\circ\text{W}$ - $30^\circ\text{W}$  e  $30^\circ\text{S}$ - $50^\circ\text{S}$ .

Além dos campos de altimetria, foram também utilizados os índices dos modos de variabilidade climática: (i) Modo Anular Sul (SAM), (ii) Índice de Oscilação Sul (SOI), (iii) Índice do El Niño (NINO 3.4) e (iv) Oscilação do Atlântico Norte (NAO). Estes índices foram adquiridos junto ao *Climate Prediction Center* (CPC) da NOAA com dados mensais para cada modo compreendendo todo o período do banco altimétrico utilizado neste trabalho.

Calculou-se a EKE na região de estudo, por unidade de massa, conforme a equação (e.g., AZEVEDO et al., 2008):

$$EKE = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2) \quad (3)$$

Através dos valores de EKE obtidos para cada campo de dados semanal, calculou-se a média para toda a área, definindo-se um valor médio para cada campo de dados e gerando-se então uma série temporal. A partir destes valores médios, foram feitas médias mensais para reduzir

os ruídos de alta frequência e para possibilitar a comparação com os índices mensais dos modos de variabilidade climática, seguindo-se a mesma metodologia empregada em JIA et al. (2011). A fim de analisar a variabilidade de longo período (superiores a um ano) aplicou-se um filtro passa-baixa na série de EKE e dos modos de variabilidade climática.

## 2.2 Análise de Variabilidade Espacial

Os padrões espaciais da EKE na região da CBM, nos cenários de baixa, média e alta energia, são avaliados nesta seção através de uma análise de composição similar à empregada por Mata et al. (2006). Estes autores aplicaram esta técnica no estudo da variabilidade espaço-temporal da Corrente Leste Australiana, em sua latitude de separação da costa, a partir de dados de altimetria combinados de vários satélites, a qual foi a versão que deu origem ao MSLA. Com isso foi possível descrever, com maior robustez, as diferentes fases (ou modos) da variabilidade daquele sistema oceânico, o qual é o análogo da CBM no Pacífico Sul.

### 2.2.1 Análise de Composições

O primeiro passo desta análise de composição consistiu na definição dos cenários energéticos. Para isso, utilizou-se a série de EKE com intervalo semanal para separar quais campos comporiam cada cenário. Dessa forma, foram considerados como momentos de baixa energia todos os campos de dados com valor de EKE médio inferior à média de todo o período analisado menos um desvio-padrão (Fig. 2). De forma semelhante, todos os campos de dados com valor médio de EKE superior à média mais um desvio-padrão foram considerados cenários de alta energia. Os demais campos, com valor de EKE médio compreendido entre a média e mais ou menos um desvio-padrão foram considerados como eventos de média energia. Dessa maneira, os 18 anos de dados foram separados em eventos mais energéticos (16%), menos energéticos (16%) e eventos com energia mais próxima da média (68%).

Os campos de MADT utilizados na análise de composição tiveram as mesmas datas de referência que as composições de EKE. Esta classificação possibilitou analisar a distribuição das alturas do nível do mar e possíveis feições

dinâmicas associadas a esses níveis da superfície como, por exemplo, correntes, meandros e vórtices.

### 2.3 Análises de Variabilidade Temporal

Para a avaliação da variabilidade temporal da EKE durante 18 anos foram aplicadas três análises: (a) regressão linear, a fim de identificar as tendências lineares da EKE neste período; (b) Análise de Ondeletas (TORRENCE & COMPO, 1998; HIRATA et al., 2011) e (c) correlação cruzada, ambas a fim de inferir sobre possíveis modulações de longo período.

#### 2.3.1 Análise de Ondeletas (*Wavelet Analysis*):

A fim de conhecer as frequências dominantes de variabilidade da EKE, realizou-se uma Análise de Ondeletas das médias mensais desta propriedade. Esta análise utiliza a Transformada de Ondeletas para o estudo de séries temporais, sendo uma ferramenta para suprir as limitações das Análises de Fourier, possibilitando captar sinais não-estacionários (EMERY & THOMPSON, 2001).

A Análise de Ondeletas possui janelas móveis, no tempo ou no espaço, que se dilatam (comprimem) para capturar sinais de baixa (alta) frequência. Dessa forma, a técnica analisa as variações locais de energia dentro de uma série temporal pela decomposição da mesma

em tempo-frequência-espaço, possibilitando a determinação dos modos dominantes de variabilidade e como estes variam no decorrer do tempo (TORRENCE & COMPO, 1998).

Neste trabalho foi escolhida a ondeleta complexa *Morlet* como ondeleta-mãe, a qual é amplamente utilizada em análises de séries temporais de dados atmosféricos e oceanográficos (TORRENCE & COMPO, 1998; HIRATA et al., 2011) e eficiente na captura de sinais não-estacionários (HIRATA et al., 2011).

A ondeleta *Morlet* é representada pela seguinte equação:

$$\psi_0(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{1}{2}t^2} \quad (4)$$

onde  $\Psi_0$  é a função de ondeleta,  $i$  é uma unidade complexa,  $\omega_0$  é uma frequência adimensional e  $t$  representa cada valor da série temporal. Depois de escolhida a ondeleta-mãe, outros parâmetros de entrada do método foram adaptados de acordo com as características das séries temporais de EKE. Para a série analisada calculou-se o “ruído vermelho” (*red noise*) através da autocorrelação da série com uma defasagem de 1 (um) passo de tempo, responsável por gerar linhas de significância mais robustas para a análise das séries. Desta forma, foi utilizado um valor de “ruído vermelho” de 0,61.

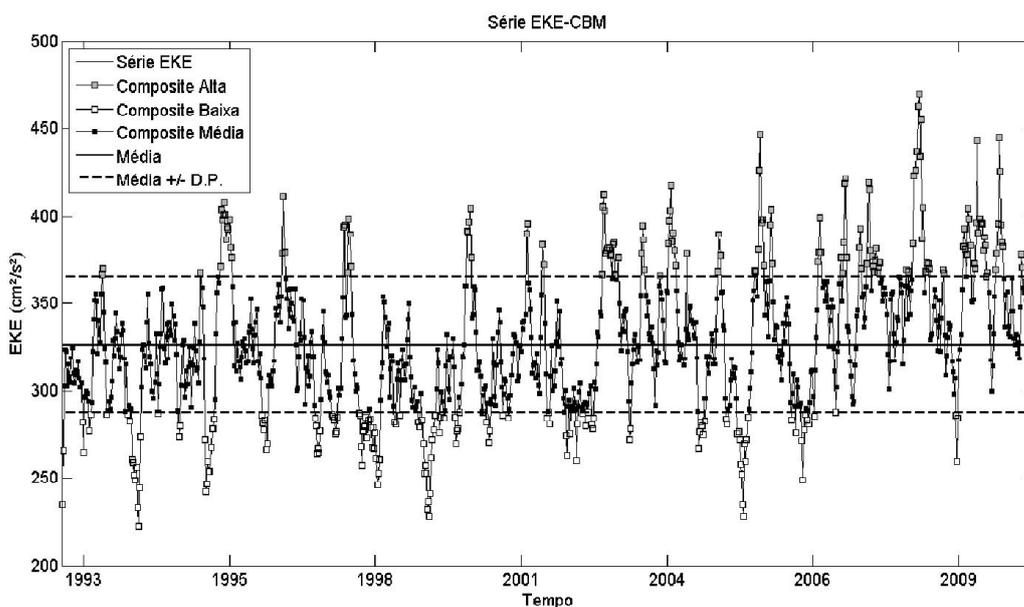


Fig. 2 - Série temporal de Energia Cinética Turbulenta (EKE) média na Confluência Brasil-Malvinas. Marcadores representam os três estágios energéticos da região definidos nesse estudo.

Todas as análises e figuras foram geradas utilizando o software Matlab®.

### 2.3.3 Correlação cruzada

Para comparar a variabilidade das séries de EKE com os modos de variabilidade climática (SAM, SOI, NINO3.4 e NAO), visando avaliar uma possível modulação da energia da região estudada por parte destes modos de variabilidade climática, um estudo de correlação cruzada (JIA et al., 2011) foi realizado. Esta é, portanto, uma ferramenta complementar aos resultados obtidos nas análises de ondeletas. O cálculo da correlação foi semelhante ao da correlação simples, porém foram obtidos coeficientes de correlação para cada defasagem (“lag”) temporal aplicada (EMERY & THOMPSON, 2001; TRIOLA, 2005).

## 3. RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir de cada tipo de análise de variabilidade estão apresentados nesta seção. As composições de EKE e de MADT, para os cenários de baixa, média e alta energia, obtidas a partir da análise da variabilidade espacial na região da CBM, são apresentadas e comparadas entre si. A variabilidade temporal da EKE e a análise da sua correlação com os índices de alguns modos de variabilidade climática complementam esta seção.

### 3.1.1 Variabilidade espacial

A CBM teve o valor máximo da EKE em torno de  $1700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ , próximo de  $42^\circ\text{S}$  e  $52^\circ\text{W}$  (Fig. 3). O padrão em forma de “C” na distribuição da EKE na região ficou evidente, assim como os baixos valores na variabilidade da superfície do mar conhecida como o Anticiclone Zapiola, evidenciado pelos baixos valores de EKE.

Os cenários energéticos gerados a partir da análise de composição para a região da CBM são apresentados na figura 4. É possível observar que a composição dos eventos de baixa energia (Fig. 4a) atingiu valores próximos a  $1000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ , o que representa quase dois terços do valor máximo da composição dos eventos médios (Fig. 4b), aproximadamente  $1700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ . Por sua vez, os eventos de alta energia na região (Fig. 4c) apresentaram valores máximos próximos a  $3000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ . Dessa forma, a variação de energia entre

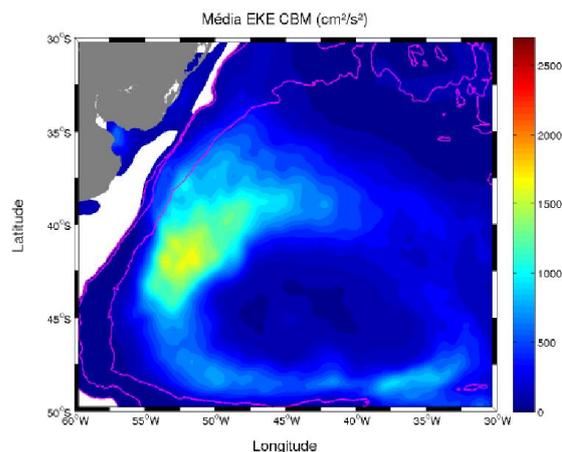


Fig. 3 - Campo médio de energia cinética turbulenta (EKE), em  $\text{cm}^2 \text{ s}^{-2}$ , para a região da CBM.

os períodos de alta, média e baixa atividade de mesoescala encontra-se bem caracterizada pelos cenários apresentados. Notou-se também que o Anticiclone Zapiola está ocupando uma região similar nas diferentes situações energéticas.

A diferença entre as composições de máxima e mínima energia (Fig. 4d) mostrou maiores valores na região da CBM, com uma diferença máxima em torno de  $2000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ . Observa-se que o valor máximo da diferença entre as composições é superior ao valor máximo da composição de média energia, o que mostra que o campo de mesoescala é muito variável na região. Maiores valores da diferença ficaram dispostos em três regiões alongadas na direção norte-sul, posicionadas quase paralelamente, com a porção central atingindo as maiores diferenças.

Na figura 5 são apresentados os resultados das composições de MADT na CBM. A posição da confluência atingiu o maior deslocamento para sul ( $44^\circ\text{S}$ ) na composição de menor energia (Fig. 5a). No estado de maior energia (Fig. 5c), a altura superficial demonstrou a formação de um centro de circulação anticiclônico, consistente como o de um grande vórtice quente liberado na retroflexão da CB, evidenciado por maiores valores centrados em  $43^\circ\text{S}$  e  $54^\circ\text{W}$ . Além disso, nota-se a contração da CB para menores latitudes juntamente com um deslocamento para leste. A elevação da superfície do oceano causada pelo Anticiclone Zapiola permanece com características similares nos três estágios energéticos, com um pequeno aumento da altura

no centro da área ocupada pelo anticiclone no cenário de alta energia.

A diferença das composições de alta e baixa energia (Fig. 5d) mostrou quatro núcleos principais. Um mais próximo à costa, com valores positivos, seguido a leste por um centro com valores negativos com formato mais alongado e, por último, outro centro com diferença positivas (entre 39-43°S e 55-48°W). A área onde a corrente afasta-se da costa, a leste, também mostra valores positivos (42°S e 50°W).

### 3.1.2 Variabilidade Temporal da EKE

A variação temporal da EKE ao longo dos 18 anos estudados é representada na figura 6, onde foram expostas a série bruta, com dados semanais, e a série filtrada, com filtro passa-baixa de um ano (retendo somente as variações interanuais).

O valor médio da série bruta de EKE para a região da CBM foi de  $326 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$  e o desvio-padrão foi  $38,84 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ . Na série bruta (em cinza, Fig. 6), notou-se a alta variabilidade da EKE

na região. A série filtrada também mostra uma variabilidade significativa, chegando próximo a um desvio-padrão. Analisando a série filtrada, valores extremos mínimos se concentram no início da série, enquanto extremos máximos ocorreram com maior frequência a partir do ano 2000.

A partir da série filtrada, observa-se um aumento significativo na energia ao longo dos 18 anos de dados analisados, com uma taxa de  $0,23 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$  por mês. Vale ressaltar que depois de um período com elevação da EKE (entre 1993 e 1995), houve um intervalo com diminuição significativa (entre 1996 e 1998), com posterior aumento da energia.

A figura 7a representa a análise espectral da EKE na CBM, onde os principais períodos de variabilidade em termos energéticos dentro do nível de confiança de 95% foram o semianual e o anual. Conforme observado na Análise de Ondeletas correspondente, a banda de energia anual ganha mais importância em alguns momentos da série (Fig. 7b), como nos períodos

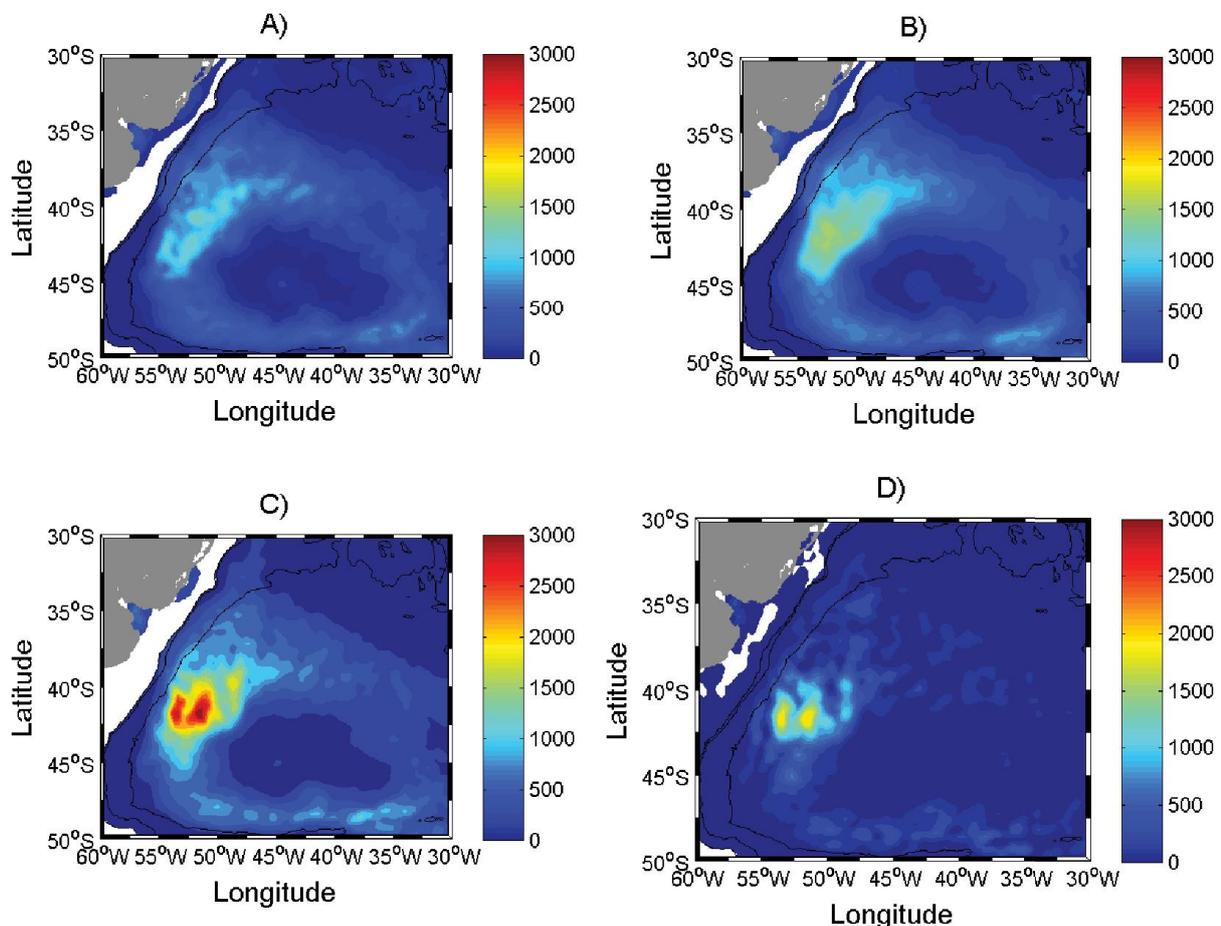


Fig. 4 - Composições da EKE ( $\text{cm}^2 \text{ s}^{-2}$ ) na região da CBM: (A) cenário de baixa energia, (B) cenário de média energia, (C) cenário de alta energia e (D) diferença entre os cenários de alta e baixa energia.

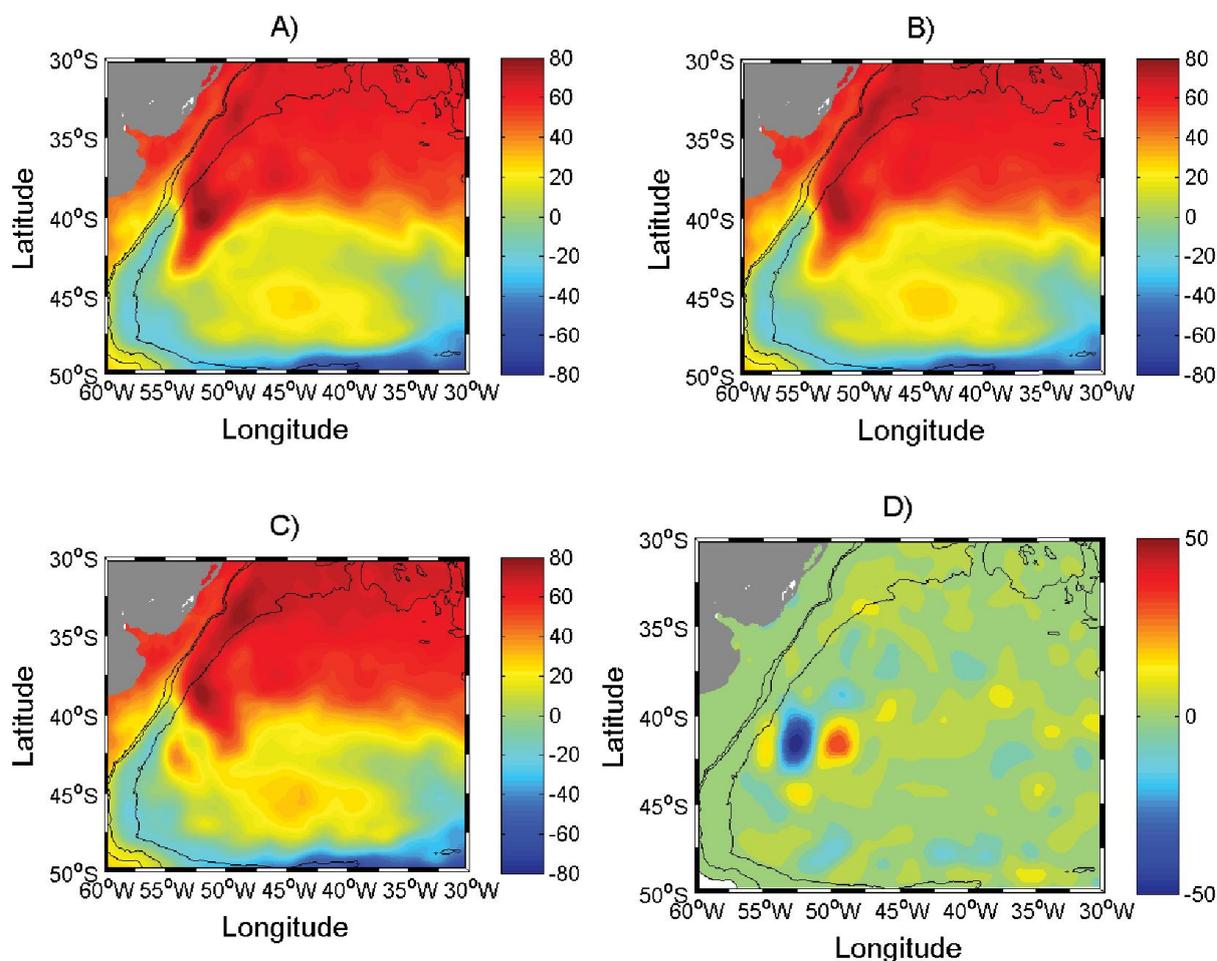


Fig. 5 - Composições de MADT (cm) na região da CBM: (A) cenário de baixa energia, (B) cenário de média energia, (C) cenário de alta energia e (D) diferença entre o cenário de alta e baixa.

entre 1996-1998, 2005-2006 e 2009. A banda de energia da mesoescala (entre dois e seis meses), por sua vez, oscilou significativamente em vários momentos (1994, 1996, 1998, 2000, 2001, 2007 e 2009).

Na figura 7c podemos observar os meses nos quais houve maior energia associada à variabilidade em períodos entre dois e seis meses (mesoescala). Nos anos de 1995, 2004, 2007 e 2010 a média da variância foi significativa, de modo que essa banda de energia sugere ter variações em escala interanual.

Na figura 8 são apresentadas as correlações entre a série de EKE e os índices dos modos de variabilidade climática citados anteriormente. A maior correlação (0,26) se deu entre a EKE e o índice SAM, com uma defasagem de tempo de 5 meses. Os outros índices não apresentaram correlações significativas nas defasagens positivas.

#### 4. DISCUSSÃO

Na margem ocidental dos oceanos, as intensas Correntes de Contorno Oeste são as feições oceanográficas mais marcantes. Estas correntes possuem grande capacidade de transporte de propriedades físico-químicas, como temperatura, salinidade, nutrientes, entre outros. Com isso, possuem relevante papel na dinâmica e no clima global, sendo de suma importância o conhecimento, tanto do seu comportamento médio como da sua variabilidade, estando esta última associada à mesoescala nos oceanos. Essa escala de movimentos é representada principalmente por oscilações de intensidade e posição das correntes, meandros e vórtices. Estas feições de mesoescala são particularmente marcantes nas regiões onde as Correntes de Contorno Oeste associadas aos grandes giros oceânicos subtropicais se separam da costa sendo, no caso do Atlântico Sul, a própria CBM.

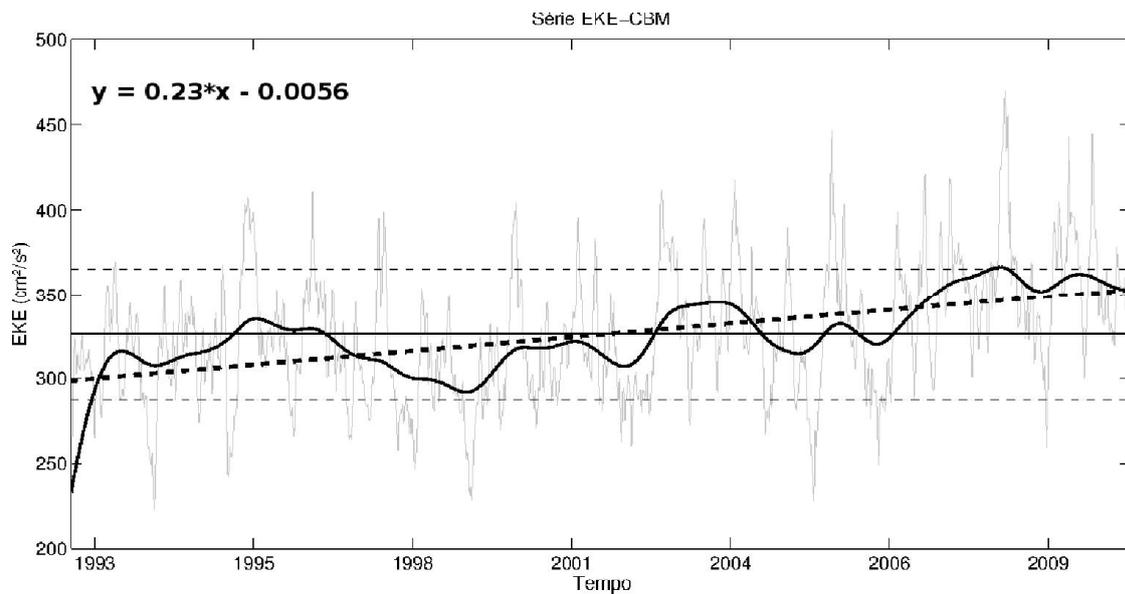


Fig. 6 - Séries de EKE (cm<sup>2</sup> s<sup>-2</sup>). Em cinza a série bruta, em preto sólido a série filtrada e em preto tracejado a tendência linear da série filtrada. A reta preta sólida é a média da série bruta e as retas tracejadas em cinzas mostram o valor da média mais e menos um desvio-padrão. A equação é referente à reta da tendência sendo x o tempo em meses.

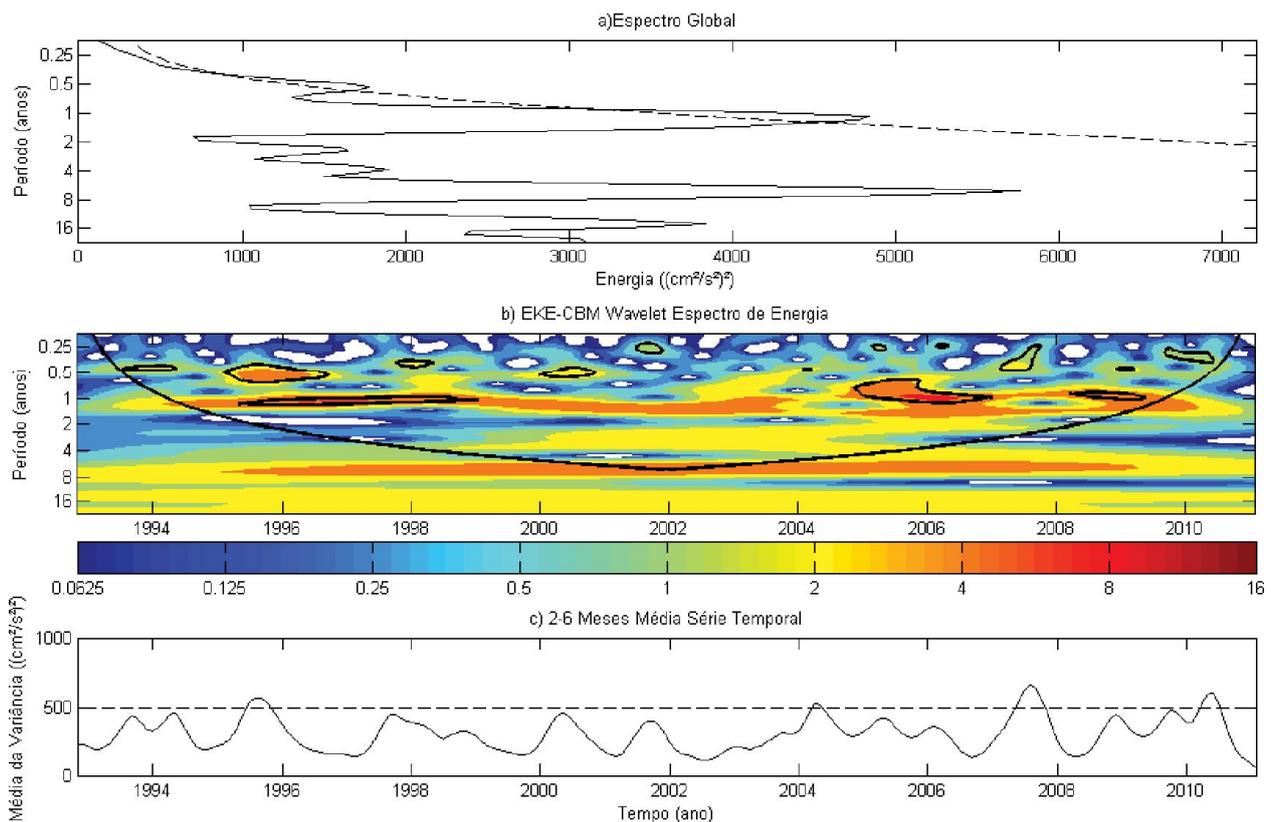


Fig. 7 - Análise de Ondeletas para a região da CBM: (a) análise espectral da série, (b) espectro de energia da ondeleta em cm<sup>2</sup> s<sup>-2</sup> (linha preta representa o cone de influência e contornos pretos o nível de significância de 5%) e (c) integração da energia para cada ponto da série para a banda de mesoescala. Linhas tracejadas representam um nível de confiança de 95%.

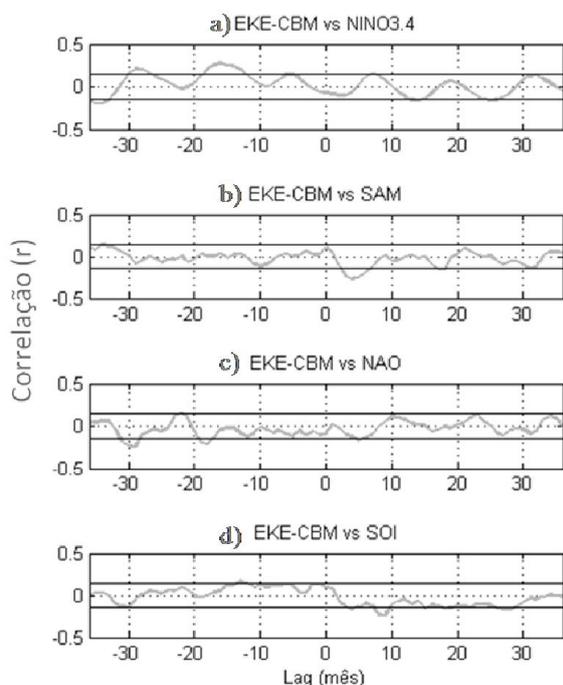


Fig. 8 – Correlações cruzadas entre a série de EKE na CBM e os índices dos modos de variabilidades climática (A-NINO 3.4, B-SAM, C-NAO e D-SOI). Em preto, intervalos de confiança de 95%.

A região da CBM é uma das mais energéticas do oceano global e neste trabalho apresentou uma distribuição média da EKE similar a diversos estudos pretéritos (e.g. WILKIN & MORROW, 1994; STAMMER & WUNSCH, 1999; STAMMER et al., 2006 e OLIVEIRA et al., 2009).

O campo médio da EKE para todo o período avaliado atingiu um máximo em torno de  $1700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ , próximo de  $42^\circ \text{S}$  e  $52^\circ \text{W}$  (Fig. 3). O valor médio de EKE foi similar aos já descritos para a CBM (WILKIN & MORROW, 1994; STAMMER et al., 2006 e OLIVEIRA et al., 2009), com algumas diferenças devido às particularidades do banco de dados usado para o cálculo. Por exemplo, Oliveira et al. (2009) utilizando dados de derivadores de superfície, encontraram valores de EKE superiores aos deste trabalho, bem como dos outros citados acima. Isso ocorreu porque os derivadores medem velocidades absolutas, as quais possuem valores superiores àquelas estimadas pelos sensores altimétricos.

A distribuição característica da EKE em forma de “C” ficou clara, evidenciando o efeito do Anticiclone Zapiola, centrado em  $45^\circ \text{S}$  e

$45^\circ \text{W}$ . Essa zona é conhecida por possuir uma circulação anticiclônica, quase estacionária, forçada por eventos de mesoescala da CBM e da Corrente Circumpolar Antártica (e.g., DE MIRANDA et al., 1999; SARACENO et al., 2005; TEIXEIRA et al., 2009). Sua presença é evidenciada pelos baixos valores de EKE no centro da feição e altos no entorno.

As composições dos diferentes estados energéticos (Fig. 4) confirmam que a distribuição geral da EKE permanece semelhante em todos os cenários. Essa distribuição define as áreas com maior ocorrência de processos de mesoescala: a CBM e as frentes subtropical e subantártica. Estas últimas se posicionam no entorno do Anticiclone Zapiola (e.g., TOMCZAK & GODFREY, 1994; SCHMITZ, 1996; TALLEY et al., 2011). A área entre  $35\text{--}45^\circ \text{S}$  e  $50\text{--}55^\circ \text{W}$ , na qual se concentram as maiores energias, é dominada pela variabilidade intra-anual da CBM (GORDON, 1989; GONI & WAINER, 2001), o que também foi constatado pela análise de ondeletas realizada no presente estudo, onde os períodos semianual e anual foram os mais energéticos e significativos.

No cenário de alta energia os maiores valores de EKE foram encontrados na porção sul da área de estudo (até  $45^\circ \text{S}$ ), o que pode ser função das flutuações interanuais da posição média da CBM. Sabe-se que o deslocamento meridional anual da Frente da Corrente do Brasil tem uma forte variabilidade interanual, de  $1^\circ$  a  $6^\circ$  (GONI & WAINER, 2001), além de terem sido encontradas tendências de deslocamento para sul da posição média anual da confluência entre 1992 e 2007, entre  $0,6^\circ$  a  $0,9^\circ$  por década (LUMPKIM & GARZOLI, 2011).

A alta atividade de mesoescala na região da CBM está relacionada, principalmente, à presença de vórtices na região (e.g., LENTINI et al., 2002; GARCIA et al., 2004; SARACENO et al., 2005; LENTINI et al., 2006). As composições de MADT (Fig. 5) mostraram a distribuição da altura da superfície do oceano para cada cenário energético. Na baixa e média energias, a CB tem o seu primeiro meandro alcançando uma maior extensão para sul ( $44^\circ \text{S}$ ), enquanto no estado de alta energia aparecem estruturas elípticas separadas da corrente no local em que estava sendo ocupado pelo primeiro meandro (Fig. 5). Provavelmente essa sucessão de feições reflete a

liberação de vórtices pelo primeiro meandro da retroflexão, sendo esse o principal mecanismo de liberação de vórtices pela CBM (LENTINI et al., 2006). Outra modificação marcante do cenário mais energético é o deslocamento do primeiro meandro para leste. Essas modificações ficaram claras na diferença entre as alta e baixa energias, com núcleos positivos associados à área ocupada pelo vórtice liberado pela corrente e ao primeiro meandro deslocado ( $42^{\circ}\text{S}$ , entre  $55^{\circ}\text{W}$  e  $50^{\circ}\text{W}$ , Fig. 5d), e núcleo negativo no local ocupado pela corrente no cenário de baixa e média energias ( $42^{\circ}\text{S}$  e  $53^{\circ}\text{W}$ ).

As séries bruta e filtrada de EKE mostraram um aumento significativo da energia nos últimos 18 anos (Fig. 6). O aumento da EKE torna-se evidente na tendência significativa de  $0,23 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$  por mês apresentadas pelas séries bruta e filtrada (Fig. 6). Por conta desta tendência, os eventos de baixos e altos valores de EKE não se encontraram distribuídos de forma homogênea ao longo da série. Particularmente, as baixas energias ocorreram no início da série, com 70% das ocorrências entre 1992 e 2001, enquanto as altas energias tiveram 80% das ocorrências no final da série, entre 2001 e 2011.

Outro resultado que corrobora com o aumento de EKE ao longo das últimas décadas é a concentração de cenários de alta energia. Esses cenários apresentaram elevações na superfície do mar, possivelmente vórtices liberados pela retroflexão da CB, e deslocamento do primeiro meandro de retroflexão. Levando em conta que existem evidências de uma aceleração do giro subtropical no oceano Atlântico (WILLIS et al., 2004), como foi confirmado no Oceano Pacífico (ROEMMICH et al., 2007), essa intensificação também poderá se refletir na CB e isso acarretará em um incremento nos processos de instabilidade associados com a corrente e, conseqüentemente, no aumento da liberação de vórtices.

Sabe-se que o Anticiclone Zapiola é forçado pela mesoescala local (DE MIRANDA et al., 1999; TEIXEIRA et al., 2009) e há uma forte correlação entre o transporte dado por essa circulação e a EKE ao seu entorno (SARACENO et al., 2009). Resultados apresentados aqui indicam que a EKE apresentou tendência significativa de aumento nas últimas duas décadas. Logo, espera-se que esta alteração tenha gerado uma intensificação da circulação

do Anticiclone Zapiola no mesmo período, o que carece de maiores investigações.

Saraceno e Provost (2012) estimaram a quantidade de vórtices presentes na região compreendida pelo Anticiclone Zapiola a partir de dados de altimetria. Os períodos que apresentaram o maior número de vórtices foram semelhantes aos de maior valor na série de EKE deste estudo, corroborando com a hipótese de que o aumento da energia também está relacionado a um incremento na quantidade de vórtices formados na região. Considerando essa informação é possível inferir, a partir da série de EKE, que houve um aumento na quantidade de vórtices liberados pela CB na última década, devido à maior ocorrência de eventos de alta energia a partir de 2000.

As flutuações da EKE aqui apresentadas também podem estar relacionadas com a variação da posição média da CBM. Essa variação está relacionada ao ciclo sazonal e às oscilações do giro subtropical no oceano Atlântico Sul. Este último também se reflete diretamente na intensidade da EKE (ZHAI & MARSHALL, 2013), sendo relatado, em análises preliminares, um aumento da altura da superfície do mar nesse giro (ROEMMICH et al., 2007). Willis et al. (2004) também identificaram o mesmo aumento nas médias latitudes ( $40^{\circ}$ ) no hemisfério Sul entre 1992 e 2003.

Essa modificação na circulação pode estar associada com variações de longo período nos campos de vento de grande escala no Atlântico Sul (YOUNG et al., 2011). Lumpkin & Garzoli (2011) observaram, usando dados de reanálises do NCEP/NCAR, que a máxima tensão relacionada ao rotacional do vento no Atlântico Sul teve uma tendência de deslocamento para sul, desde 1992 até 2008. Esse pode ter sido um dos gatilhos para a intensificação da CB e o incremento na mesoescala na região.

A tendência de aumento da EKE na região da CBM ficou evidente em todos os resultados apresentados. A ocorrência de mais valores significativos no espectro de ondeletas (Fig. 7b) a partir de 2001, tanto no ciclo anual como na energia de mesoescala (2-3 meses), reforçam as hipóteses de que o aumento da EKE aconteceu em função de deslocamentos da posição média da CBM e da maior atividade de vórtices de mesoescala na região.

Na análise espectral da EKE na CBM (Fig. 7) os principais picos de energia referem-se aos ciclos semianual e anual. Esses períodos de variabilidade foram encontrados por Goni & Wainer (2001) como sendo os principais períodos de flutuação meridional da CBM. Os resultados da análise de ondeletas mostraram que esses períodos concentraram mais energia em alguns momentos específicos, como em 1995, 2000, 2005, 2007 e 2009 (Fig. 7), mas no geral a EKE apresentou mais períodos significativos a partir de 2000.

Como tentativa para explicar a principal forçante da tendência de aumento da EKE, foram feitas correlações entre as séries de EKE e os índices dos modos de variabilidade climática. Apenas a correlação com o SAM foi significativa (0,26), mas considerada baixa para explicar a tendência positiva da EKE nos últimos 18 anos. Assim, a variação da EKE está provavelmente relacionada a uma combinação da variabilidade associada ao SAM junto com a modificação do padrão de grande escala dos ventos no Atlântico Sul, o que, contudo, ainda carece de mais investigações para ser confirmada.

## 5. CONCLUSÕES

A série de 18 anos do banco de dados altimétricos utilizado neste estudo permitiu um maior entendimento da variabilidade da CBM. Os campos altimétricos possibilitaram a identificação das tendências de longo período da EKE e, quando comparados com índices de modos de variabilidade climática, inferir sobre possíveis modulações por fenômenos de escala interanual.

A EKE na CBM apresentou uma distribuição espacial em forma de “C” e uma intensificação ao longo do período analisado (1992-2011). Tal intensificação pode, possivelmente, estar associada ao fortalecimento dos ventos na região subtropical do oceano Atlântico Sul e ao deslocamento da posição de máxima tensão do vento para sul. A área que apresentou os maiores valores de EKE foi a região de migração anual da CBM e aquela em que ocorre a liberação de vórtices pelo primeiro meandro de retroflexão. As composições de altura da superfície do mar mostraram que, nos cenários de menor energia, a CB tem sua maior extensão para sul. No cenário

de alta energia, por sua vez, a CB tende a liberar vórtices e ter o primeiro meandro da retroflexão deslocado para nordeste, com a maior ocorrência a partir de 1998. O aumento constatado da EKE se refletiu em deslocamentos da posição média da CBM e, provavelmente, em uma intensificação dos processos de mesoescala, como vórtices e meandramentos.

Os principais períodos de variabilidade da EKE na CBM foram os ciclos semianual e anual. A EKE não mostrou uma associação clara com os modos de variabilidade climática utilizados nesse trabalho (Modo Anular Sul – SAM, El Niño Oscilação Sul – ENSO, Nino3.4 e Oscilação do Atlântico Norte – NAO). Com isso, o aumento da mesoescala deve estar associado à intensificação e deslocamento para sul dos campos de ventos de larga-escala no oceano Atlântico Sul.

Outras formas de comprovar o aumento da atividade de mesoescala na região, ao longo dos últimos 18 anos, seria utilizar outras bases de dados, tais como concentração de clorofila e temperatura superficial do mar, a fim de estimar o número de vórtices presentes no período, bem como possíveis oscilações da CB e da CBM. Além disso, correlações com séries de tensão de cisalhamento do vento no oceano Atlântico Sul poderiam mensurar o impacto da variabilidade atmosférica local sobre a mesoescala na área da CBM.

O conhecimento das feições oceânicas presentes nessa região tais como a CB, CM, CBM, vórtices, e suas variabilidades, podem auxiliar em estudos sobre a geodésia marinha em regiões muito ativas dinamicamente ou de grandes gradientes batimétricos (que afetam acentuadamente o geóide marinho), podendo gerar grande variação nos dados medidos pelos altímetros. O estudo mais aprofundado sobre o efeito dessas feições nas estimativas do geóide torna-se então uma temática interessante para novos estudos.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é uma contribuição para o Projeto MOVAR (CNPq Processo 557171/2009-1). Caio S. Fonteles agradece o apoio recebido do CNPq (Bolsa Processo 138656/2010-0).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, J. L. L.; OLIVEIRA, L. R.; SOUZA, J. F. A.; SOARES, I. D.; MATA, M. M. Os processos de Conversão de Energia nos Oceanos, uma Revisão do Diagrama de Lorenz. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 26, pp. 153-172.
- AZEVEDO, J. L. L.; MATA, M. M. O Mecanismo de Autopropulsão de Vórtices Oceânicos: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 28, n. 3, pp. 331-347, 2010.
- AZEVEDO, J. L. L.; NOF, D.; MATA, M. M. Eddy-Train Encounters with a Continental Boundary: A South Atlantic Case Study. **Journal of Physical Oceanography**, v. 42, p. 1548-1565, 2012.
- DE MIRANDA, A. P.; BARNIER, B.; DEWAR, W. K. On the dynamics of the Zapiola Anticyclone. **Journal of Geophysical Research-Oceans**, v. 104, n. C9, pp. 21137-21149, 1999.
- DUCET, N.; LE TRAON, P. Y.; RIVERDIN, G. Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and 2. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. 19, pp. 477-498, 2000.
- EMERY, W. J.; THONSOM, R. E. **Data Analysis Methods in Physical Oceanography**. New York, Elsevier Science, 2001. 640 pp.
- FERRARI, R.; WUNSCH, C. Ocean circulation kinetic energy: reservoirs, sources, and sinks. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 41, pp. 253-282, 2009.
- GARCIA, C. A. E.; SARMA, Y. V. B.; MATA, M. M.; GARCIA, V. M. T. Chlorophyll variability and eddies in the Brazil-Malvinas Confluence region. **Deep-Sea Research II-Topical Studies in Oceanography**, v. 51, n. 1-3, pp. 159-172, 2004.
- GONI, G. J.; WAINER, I. Investigation of the Brazil Current front variability from altimeter data, **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. 31, pp. , 2001.
- GONG, D.; WANG, S. Definition of Antarctic oscillation index. **Geophysical Research Letters**, v. 26, pp. 459-462, 1999.
- GORDON, A. L. Brazil Malvinas Confluence - 1984. **Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers**, v. 36, n. 3, pp. 359-384, 1989.
- HIRATA F. E.; MOLLER, O. O. J.; MATA M. M. Regime shifts, trends and interannual variations of water level in Mirim Lagoon, southern Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, pp. 254-266, 2010.
- JIA, F.; WU, L.; LAN, J.; QIU, B. Interannual modulation of eddy kinetic energy in the southeast Indian Ocean by Southern Annular Mode. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. 02029, 2011.
- LENTINI, C. A. D.; OLSON, D. B.; PODESTA, G. P. Statistics of Brazil Current rings observed from AVHRR: 1993 to 1998. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 16, pp., 2002.
- LENTINI, C. A. D.; GONI, G. J.; OLSON, D. B. Investigation of Brazil Current rings in the confluence region. **Journal of Geophysical Research-Oceans**, v. 111, n. 6, 2006.
- LUMPKIN, R.; GARZOLI, S. Interannual to decadal changes in the western South Atlantic's surface circulation. **Journal of Geophysical Research**, v. 116 , 2011.
- MATA, M. M.; WIJFFELS, S. E.; CHURCH, J. A.; TOMCZAK, M. Eddy shedding and energy conversions in the East Australian Current. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, 2006.
- MOORE, J.K.; ABBOTT, M.R. Phytoplankton chlorophyll distribution and primary production in the Southern Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, pp. 28709-28722, 2000.
- MORROW, R.; WARD, M. L.; HOGG, A. M.; PASQUET, S. Eddy response to Southern Ocean climate modes. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, 2010.
- MÜLLER, T. J.; IKEDA, Y.; ZANGENBERG, N.; NONATO, L. V. Direct measurements of the western boundary currents between 20°S and 28°S. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n.3, pp. 5429-5543, 1998.
- NOF, D. On the  $\beta$ -Induced Movement of Isolated Baroclinic Eddies. **Journal of Physical Oceanography**, v. 11, pp. 1662-1672, 1981.
- OLIVEIRA, L. R.; PIOLA, A. R.; MATA, M. M.;

- SOARES, I. D. Brazil Current surface circulation and energetics observed from drifting buoys. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, 2009.
- RODRIGUES, R.R.; ROTHSTEIN, L.; WIMBUSH, M. Seasonal variability of the South Equatorial Current bifurcation in the Atlantic Ocean: A numerical study. **Journal of Physical Oceanography**, v.37, pp.16-30, 2007.
- ROEMMICH, D.; GILSON, J.; DAVIS, R.; SUTTON, P.; WIJFFELS, S.; RISER, S. Decadal spinup of the South Pacific subtropical gyre. **Journal of Physical Oceanography**, v. 37, pp. 162-173, 2007.
- SARACENO, M.; PROVOST, C.; PIOLA, A. R. On the relationship between satellite-retrieved surface temperature fronts and chlorophyll a in the western South Atlantic. **Journal of Physical Oceanography**, v. 110, pp., 2005.
- SARACENO, M.; PROVOST, C.; ZAJACZKOVSKI, U. Long-term variation in the 38 anticyclonic ocean circulation over the Zapiola Rise as observed by satellite altimetry: evidence of possible collapses. **Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research**, v. 56, n.7, pp. 1077-1092, 2009.
- SARACENO, M.; PROVOST, C. On eddy polarity distribution in the southwestern Atlantic. **Deep-Sea Research I**, v. 69, pp. 62-69, 2012.
- SCHMITZ, W. J. JR. On the eddy field in the Agulhas Retroflection, with some global considerations. **Journal of Geophysical Research**, v.101, n.16, pp. 259-271, 1996.
- SILVEIRA, I. C. A. DA; SCHMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S.; IKEDA, Y. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n.2, pp. 171-183, 2000.
- STAMMER, D. Global characteristics of ocean variability estimated from regional TOPEX/POSEIDON altimeter measurements. **Journal Of Physical Oceanography**, v. 27, pp. 1743–1769, 1997.
- STAMMER, D.; WUNSCH, C. Temporal changes in the mesoscale variability of the oceans. **Deep-Sea Research II**, v. 46, pp. 77–108, 1999.
- STAMMER, D.; WUNSCH, C.; UEYOSHI, K. Temporal changes in ocean eddy transports. **Journal of Physical Oceanography**, v. 36, pp. 543 – 550, 2006.
- STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v.104, n.9, pp. 20863-20883, 1999.
- TALLEY, L.D.; PICKARD, G.L.; EMERY, W.J.; SWIFT, J.H. **Descriptive Physical Oceanography: An Introduction (Sixth Edition)**. Boston, Elsevier, 2011. 560 pp.
- TEIXEIRA, C.E.P.; MATA, M.M., LENTINI, C.A.D., GARCIA, C.A.E. & CAMPOS, E.J.D. **On the temporal variability of the sea surface temperature in the southwestern Atlantic based on the analysis of “Pathfinder AVHRR/NOAA” images**. Revista Brasileira de Cartografia. V. 61, n. 3, pp. 207- 21. 2009.
- THOMPSON, D. W. J.; WALLACE, J. M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. **Journal of Climate**, v. 13, n. 5, pp. 1000-1016, 2000.
- TOMCZAK, M.; GODFREY, J. J. **Regional Oceanography: An introduction**. New York, Elsevier, 1994. 422pp.
- TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, pp. 61-78, 1998.
- TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro, LTC, 2005. 682pp.
- YOUNG, I. R.; ZIEGER, S.; BABANIN, A. V. Global trends in wind speed and wave height. **Science**, v. 332, pp. 451–455, 2011.
- WILLIS, J. K.; ROEMMICH, D.; CORNUELLE, B. Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermocline expansion on global scales. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, 2004.
- WILKIN, J. L.; MORROW, R. A. Eddy kinetic energy and momentum flux in the Southern Ocean: Comparison of a global eddy-resolving model with altimeter, drifter, and current-meter data. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n.4, pp. 7903 – 7916, 1994.

ZHAI, X.; JOHNSON, H. L.; MARSHALL, D. P. Significant sink of ocean-eddy energy near western boundaries. **Nature Geoscience**, v. 3, p. 608–612, 2010.

ZHAI, X.; MARSHALL, P. Vertical Eddy Energy Fluxes in the North Atlantic Subtropical and Subpolar. **Journal of Physical Oceanography**, v. 43, pp. 95-103, 2013.