

A desova da sardinha verdadeira (*Sardinella brasiliensis*) na Plataforma Continental Sudeste Brasileira: escalas espaciais de ocorrência e relações com a variabilidade oceânica.

Luiz Eduardo de Souza Moraes¹
Eduardo da Silva Gigliotti¹
Douglas Francisco Marcolino Gherardi¹
Eduardo Tavares Paes²
Mario Katsuragawa³

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{lemoraes, edsilva, douglas}@dsr.inpe.br

² Universidade Federal Rural da Amazônia
Avenida Presidente Tancredo Neves, Nº 2501, Montese - 66.077-530 – Belém – PA, Brasil
eduardo.paes@ufra.edu.br

³ Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo – IOUSP
Caixa Postal 05.508-120 - São Paulo – SP, Brasil
mkatsura@usp.br

Abstract. The relationship between the main spatial patterns and scales of Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) spawning and the Southeastern Brazilian Bight (SBB) environmental variability was investigated, using historical egg density data, remotely sensed SST anomalies from AVHRR and Wind velocity data from SSM/I. The spatial variability of egg densities at each cruise was linearly modeled using eigenvector filters as predictors. Environmental data series were analyzed using Principal Component Analysis (PCA) and Wavelet decomposition. Results showed that spawning spatial variability was expressed at rougher scales, due to a concentration of the main spawning areas at the central and southern areas of the SBB. A high mesoscale variability was also evidenced by the regression models. The evolution of spatial patterns showed a progressive increase in the relative importance of mesoscale filters when mean egg densities lowered, which is consistent with the hypothesis of contraction-expansion of the spawning habitat. Areas characterized by lower environmental variability matched the most recurrent spawning grounds which suggests that the Brazilian sardine spawning might benefit more from stable environments.

Palavras-chave: brazilian sardine, remote sensing, spawning, sardinha, sensoriamento remoto, desova.

1. Introdução

A sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*) é a espécie pequeno pelágica mais importante comercialmente no Brasil, tendo sido alvo de estudos desde a década de 1950 (CASTELLO, 2007). A série histórica de sua produção pesqueira anual é caracterizada por intensas oscilações que incluem dois colapsos ao final dos anos 80 e 90 (CERGOLE et al., 2002) e recuperações relativas nos períodos de 1977 a 1981, 1983 a 1984, 1996 a 1997 e 2008 a 2009. Estas oscilações foram atribuídas ao efeito da sobrepesca e a fatores ambientais (MATSUURA, 1996; JABLOSKI e LEGEY, 2004).

Sua distribuição é confinada a Plataforma Continental Sudeste do Brasil (PCSB). A PCSB é palco de processos oceanográficos bem conhecidos como ressurgências costeiras, durante o verão austral, a formação de meandros e vórtices pela Corrente do Brasil, e o estabelecimento da Corrente Costeira do Brasil durante o inverno (CASTRO et al., 2006; SOUZA e ROBINSON, 2004), constituindo um ambiente altamente dinâmico. A estruturação das condições físicas dos *habitats* nos quais a sardinha-verdadeira atravessa fases fundamentais de

seu curto ciclo de vida pode ser, portanto, direta ou indiretamente associada a variabilidade destes processos.

Fenômenos biológicos como a desova apresentam escalas particulares de variabilidade, inferidas através de estudos das distribuições espaço-temporais do icteoplâncton. Estas escalas de podem refletir fenômenos de contração ou expansão dos chamados *habitats* ideais (GIGLIOTTI et al., no prelo), decorrentes da variabilidade intrínseca imposta pelos fenômenos oceanográficos citados anteriormente. O estudo conjunto da variabilidade das condições oceanográficas e das escalas de ocorrência de fenômenos biológicos estratégicos como desova e as fases larvais pode, portanto, fornecer subsídios importantes a compreensão dos processos ecológicos que regulam a disponibilidade de recursos vivos importantes como a sardinha verdadeira.

Este trabalho tem como objetivos principais: 1) um diagnóstico do padrão espaço-temporal e das escalas de ocorrência da desova da sardinha verdadeira na Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSB), inferido através dos dados de distribuição das densidades de ovos na região; 2) uma avaliação preliminar da covariação entre esses padrões e os padrões de variabilidade oceânica, identificados através de análise das variáveis físicas medidas por sensores orbitais.

2. Materiais e métodos

Os dados correspondentes a distribuição espacial das densidades de ovos da sardinha verdadeira provém de coletas de icteoplâncton efetuadas ao longo de uma série histórica de cruzeiros, realizados durante os verões de 1976 a 1981, 1988 e 1991 a 1993 (Tabela I). Os cruzeiros cobriram toda a região correspondente a PCSB, com espaçamento de aproximadamente 30km entre as estações de amostragem (a exceção dos cruzeiros FINEP XI e XII, em 1980 e 1981, com espaçamento aproximado de 50km).

Tabela I. Sumário dos Cruzeiros de amostragem de icteoplâncton.

Cruzeiro	Data	Amostras	Estações positivas	Densidade média (n°.m ⁻²)	DP
FINEP V	dez/76	82	17	33.3	24.71
FINEP VI	jan/77	69	18	7.63	4.15
FINEP VII	jan/78	82	17	27.64	5.22
FINEP XI*	jan/80	42	11	8.67	6.56
FINEP XII*	jan/81	42	17	51.16	36.07
EPM	jan/88	78	9	1.09	0.67
JOPS 1	jan/91	88	13	2.99	2.03
Sardinha 1	dez/91	110	19	1.27	0.56
Sardinha 2	jan/93	110	29	15.01	9.23

* - Espaçamento entre as amostragens de aproximadamente 50 km

As variáveis físicas utilizadas neste trabalho corresponderam a medidas de Temperatura Superficial do Mar (TSM), e a valores mensais de intensidade das componentes zonal (u) e meridional (v) do vento (em m.s⁻¹). As séries de TSM foram obtidas dos sensores *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), a bordo dos satélites NOAA, e disponibilizadas pelo Projeto Pathfinder v.5.0. Os valores analisados corresponderam as anomalias de TSM dos meses de novembro a janeiro, no período de 1985 a 2007, com resolução espacial de 4 km. Os dados de intensidade do vento foram obtidos pelos sensores SSM/I (*Special Sensor Microwave/ Imager*), a bordo das plataformas DMSP-F8 (*Defense Meteorological Satellite Program*). As direções das componentes do vento são oriundas do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF), e foram agregadas *a posteriori* aos dados de

intensidade, compondo a base de dados de resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$, derivada por Atlas et al. (1996), e distribuída pelo *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PODAAC). As séries analisadas corresponderam a médias dos valores extraídos de 3 áreas (Tabela II), e compreenderam o período de janeiro de 1988 a dezembro de 2004

Tabela II – Coordenadas das subáreas de estudo e número de pixels correspondentes.

Subárea	Latitude	Longitude	Nº Pixels
1	22°S-23°S	38°W-39°W	4
2	25°S-26°S	44°W-45°W	4
3	30°S-31°S	47°W-48°W	4

Os valores de densidade de ovos de sardinha verdadeira foram analisados em duas etapas: 1) Determinação dos possíveis modos de variação espacial em cada Cruzeiro através da geração de mapas de autovetores (Matrizes de Coordenadas Principais de Vizinhança), compondo-se assim um conjunto de variáveis sintéticas, ou Filtros Espaciais (DRAY et al., 2006); 2) regressões lineares utilizando-se os Filtros Espaciais como previsores e as distribuições de ovos como variável resposta. Este conjunto de análises foi efetuado no aplicativo SAM v.4 (*Spatial Analysis and Macroecology*) (RANGEL et al., 2010). Adotou-se um critério baseado na minimização da auto correlação espacial dos resíduos (Índice I de Moran máximo de 0,05). Nos Cruzeiros FINEP XI e XII, devido ao maior espaçamento entre as amostragens, adotou-se critério diferenciado no qual foram selecionados apenas os Filtros Espaciais significativamente correlacionados a distribuição espacial. Os resultados analisados aqui baseiam na distribuição das variâncias explicadas por cada vetor sintético (Filtro Espacial), em cada modelo (Cruzeiro).

As séries de TSM foram analisadas através de uma Análise de Componentes Principais utilizando o módulo PRINCOMP do *software* MATLAB. As séries de intensidade do vento foram analisadas por transformadas de ondeleta, empregando-se a função contínua DOG (*Derivative of Gaussian*).

Efetuuou-se, por fim, análise comparativa visual entre os padrões espaço-temporais recuperados por ambos os conjuntos de dados (biológicos e físicos).

3. Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta alguns mapas de variação espacial gerados pelos vetores sintéticos (Filtros Espaciais), selecionados em função dos resultados dos modelos de regressão linear (Tabela III), mais especificamente pelos percentuais de variância (R^2) recuperados isoladamente por cada Filtro Espacial. Observa-se claramente o gradiente de escalas representado pelo aumento na ordem dos Filtros Espaciais (pares de figuras na ordem descendente), com escalas mais grosseiras nos dois primeiros (Figura 1a e 1b), e padrões formados por manchas progressivamente menores e menos esparsas entre si (Figura 1e e 1f).

A despeito dos baixos percentuais de variância explicada retornados pelos modelos de regressão linear (Tabela III), a análise revelou alguns padrões espaciais recorrentes nos Cruzeiros de amostragem. O mais evidente está associado a uma escala mais grosseira (Filtros Espaciais 1 e 2) que divide a PCSB em duas regiões distintas, separadas na altura de Ilha Bela (24°S). A ocorrência de desova apresentou-se mais intensa na porção sul. Outros padrões em meso-escala (de 100 km a 300 km) refletem a distribuição em manchas das densidades de ovos, com os Filtros Espaciais representando distribuições mais (Cruzeiro JOPS – Figura 1d) ou menos (FINEP VI – Figura 1c) esparsas destas manchas. Os padrões acima são corroborados pelos resultados de Gigliotti et al (no prelo) que analisaram as distribuições de ovos com métodos de krigagem indicativa. Os autores constataram a predominância das áreas

de desova na porção sul da PCSB e a forte variação interanual na extensão e localização destas áreas, evidenciada pelas distribuições de probabilidades.

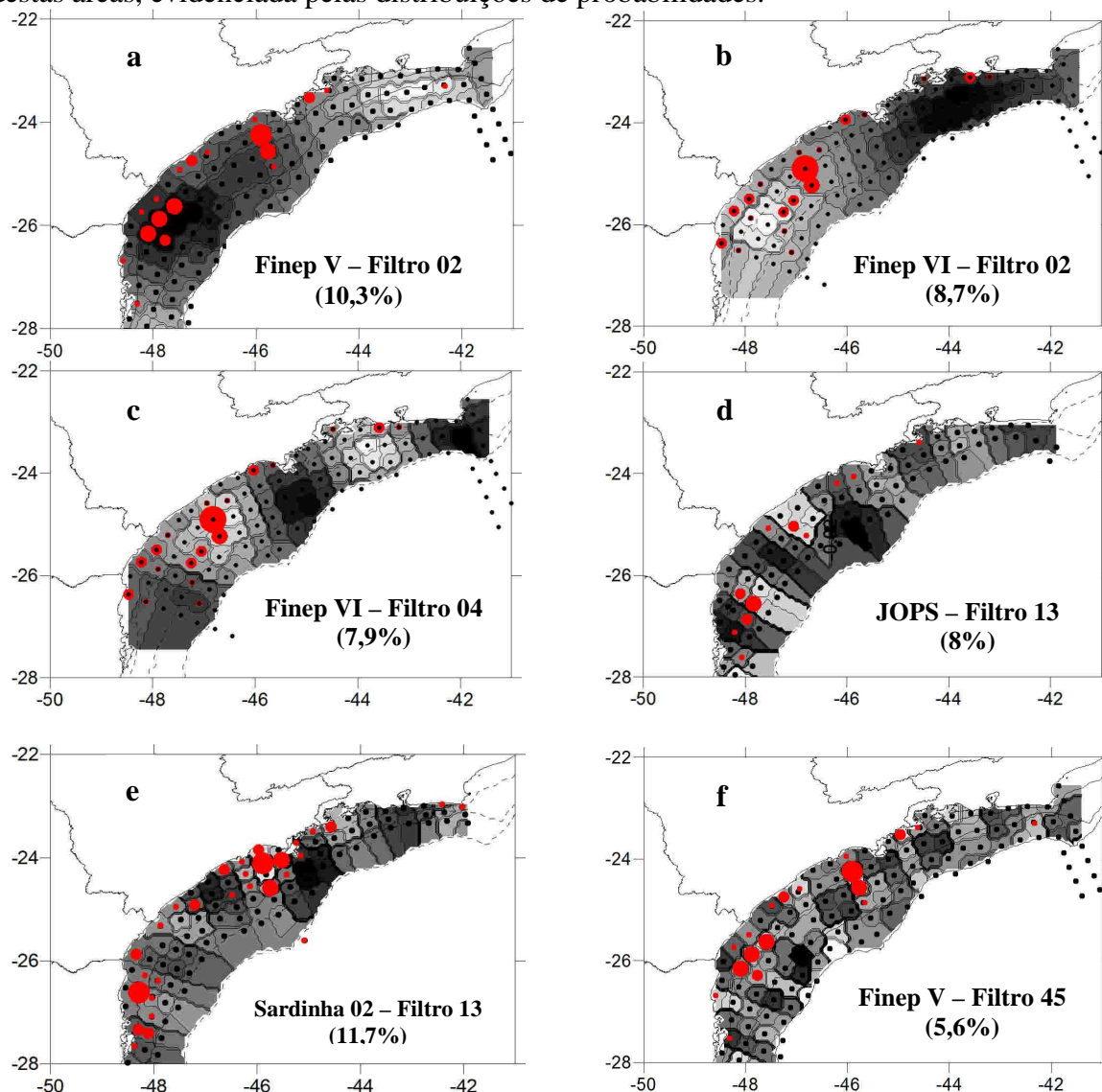


Figura 1. Resultados dos modelos de regressão linear. Exemplos de Mapas de autovetores (Filtros) com maior percentual de explicação da variação espacial da distribuição de ovos de sardinha verdadeira. As áreas escuras e claras referem-se a regiões com maior auto correlação espacial. Destaca-se a redução gradual da escala espacial representada.

As baixas variâncias recuperadas pelos modelos podem ser atribuídas, ainda, ao breve período da fase embrionária da sardinha verdadeira (cerca de 24h), o que confere um caráter instantâneo as amostragens. Possivelmente uma ampla gama de processos físicos locais e de interações biológicas, de difícil mensuração, têm influência decisiva nos padrões de distribuição, e não são adequadamente representados pela estratégia amostral empregada. Alguns destes processos como a formação de frentes de temperatura ou salinidade por eventos curtos de ressurgência, ou aporte dulcícola (CSIRKE, 1995), ou até processos de canibalismo e predação de ovos (SMITH et al, 1989), podem ocorrer em escalas espaciais menores, não representáveis pela amostragem. Curtis (2004) constatou a presença de forte estrutura espacial em pequenas escalas (0,75-2,5 km) para as distribuições de ovos de *Sardinops sagax*, atribuindo tal padrão a formação de numerosos cardumes desovantes de pequeno tamanho.

Tabela III – Sumário dos resultados das análises de regressão utilizando as densidades de ovos de sardinha verdadeira (variável resposta) e os Filtros Espaciais (variáveis predictoras).

Cruzeiro	Data	Amostras	Distância de Truncamento	Filtros Espaciais (FE)	FE Selecionados	R² global
FINEP V	dez/76	82	36.72	69	8	0.436
FINEP VI	jan/77	69	37.01	54	4	0.271
FINEP VII	jan/78	82	36.93	64	1	0.044
FINEP XI	jan/80	42	53.53	20	2*	*
FINEP XII	jan/81	42	51.13	22	2*	*
EPM	jan/88	78	35.47	37	1	0.038
JOPS 1	jan/91	88	34.72	43	3	0.128
Sardinha 1	dez/91	110	32.88	53	3	0.182
Sardinha 2	jan/93	110	33.08	52	3	0.232

* - Filtros Espaciais significativamente correlacionados ($p < 0.05$);

A Figura 2 mostra a distribuição dos percentuais de explicação o longo dos Filtros Espaciais significativamente correlacionados a distribuições de densidades de ovos. Percebe-se que o padrão de distribuição do Cruzeiro FINEP V (dezembro de 1976) foi melhor recuperado pelo modelo de regressão. Os Cruzeiros FINEP VI (janeiro de 1977) e Sardinha 2 (janeiro de 1993) também obtiveram performances razoáveis de seus modelos lineares. Adicionalmente observa-se, nos dois primeiros, algum percentual da variância sendo explicado por Filtros de ordem superior, o que sugere um padrão menos esparsos das manchas de ocorrência de ovos. Nos Cruzeiros EPM (janeiro de 1988) e JOPS (janeiro de 1991), onde ocorreram as mais baixas médias de densidade (Tabela II), houve uma drástica redução da variância explicada, e a predominância de Filtros Espaciais associados a meso-escala. Tais amostragens concentraram-se em torno do primeiro colapso da produção de sardinha (1990, com 32.000 ton. capturadas). Gigliotti e colaboradores (no prelo) sugeriram um processo de contração-expansão do habitat de desova, apresentando como exemplos de ambas situações, respectivamente, os Cruzeiros EPM (janeiro de 1988) e Sardinha 2 (janeiro de 1993). Neste trabalho as evidências desse mecanismo se resumiram a um maior percentual de variância concentrado em Filtros Espaciais de maior ordem (Sardinha 2), e a uma maior recuperação da variância espacial global (Tabela II).

A figura 3 mostra as duas primeiras componentes principais da ACP aplicada às anomalias de TSM. Um padrão de divisão espacial Norte-Sul similar ao observado na distribuição das áreas de desova, pode ser observado na segunda componente principal (Figura 3b). De modo geral a variabilidade da TSM na porção centro-sul apresenta-se mais atenuada em comparação ao norte, o que sugere que o padrão espacial de maior escala na distribuição de áreas de desova está relacionado a uma maior estabilidade relativa das condições termais. Essa idéia é reforçada pela presença de uma estreita faixa costeira com menor variabilidade interanual entre 25°S e 28°S, retratada na primeira componente principal (53% da variância) (Figura 3a), coincidente com as áreas com maiores probabilidades de desova (GIGLIOTTI et al, no prelo). A maior variabilidade da TSM ao norte está relacionada a fenômenos sazonais de mesoescala como a Ressurgência Costeira e os meandramentos da Corrente do Brasil, fenômenos com maior assinatura superficial, e associados a um transporte superficial mais intenso.

Há uma relação notória entre a direção e intensidade dos ventos e o fenômeno de ressurgência costeira observado no setor Norte da PCSB (CASTRO et al, 2006). A redução do habitat de desova na porção norte pode estar relacionado ao padrão de circulação induzido pelo vento (a *offshore*), ou a uma maior instabilidade relativa da termoclina, devido aos

constantes afloramentos na região de Cabo Frio e aos deslocamentos da pluma para SW, até cerca de 24°S. Jablosnki e Legey (2004) detectaram uma relação não linear entre a intensidade do vento e o recrutamento da sardinha verdadeira, associando seu aumento ao estabelecimento de “janelas ótimas”, caracterizada por valores intermediários, mais prováveis em um regime de ventos mais “estável”.

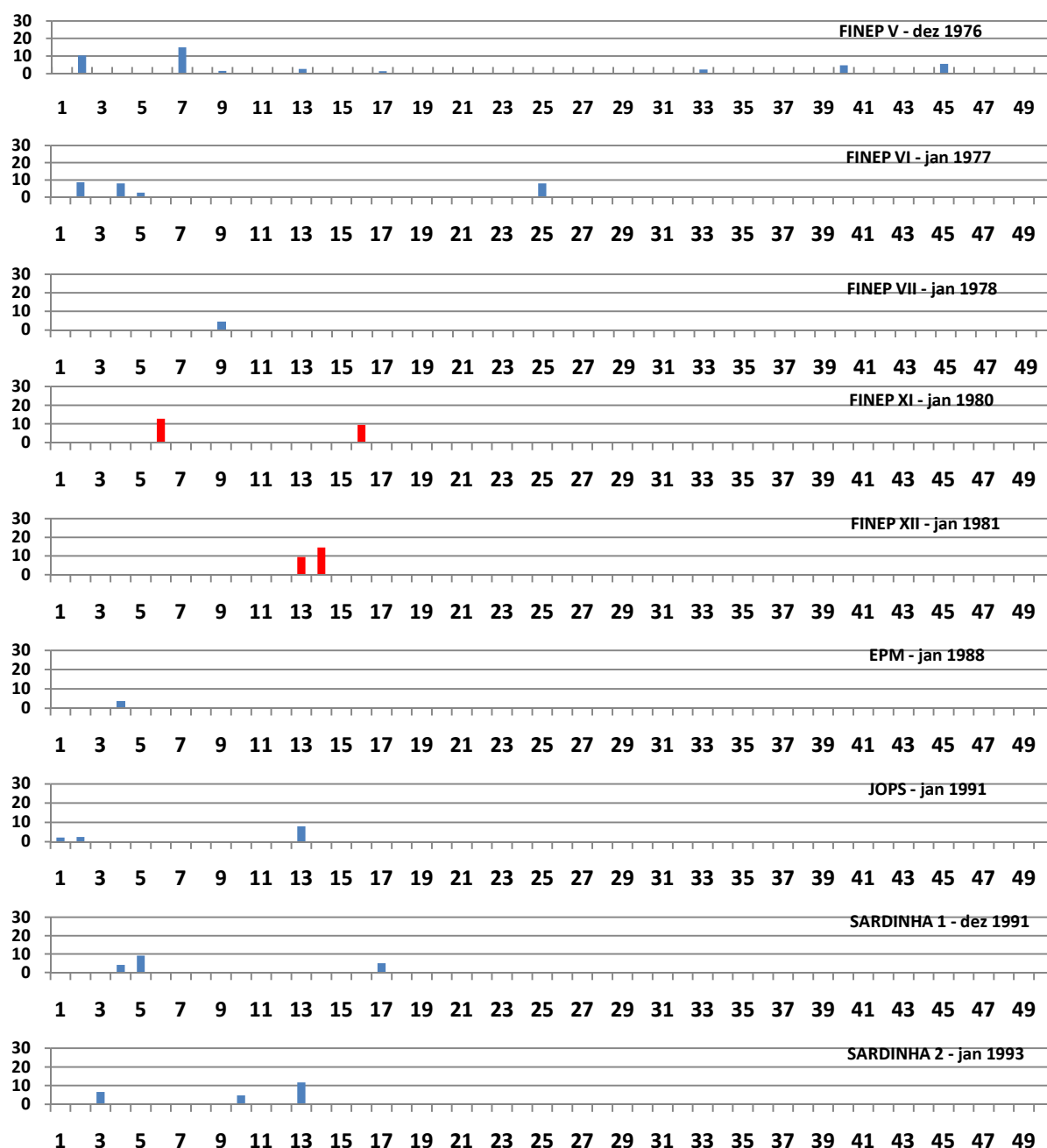


Figura 2. Percentuais de variância explicada (eixo y) para cada modelo de regressão utilizando as distribuições de ovos de sardinha verdadeira (variável resposta) e os Filtros Espaciais (variáveis predictoras, eixo x), em cada Cruzeiro. Nos Cruzeiros FINEP XI e XII (barras vermelhas) os Filtros Espaciais foram selecionados pelo critério de significância estatística.

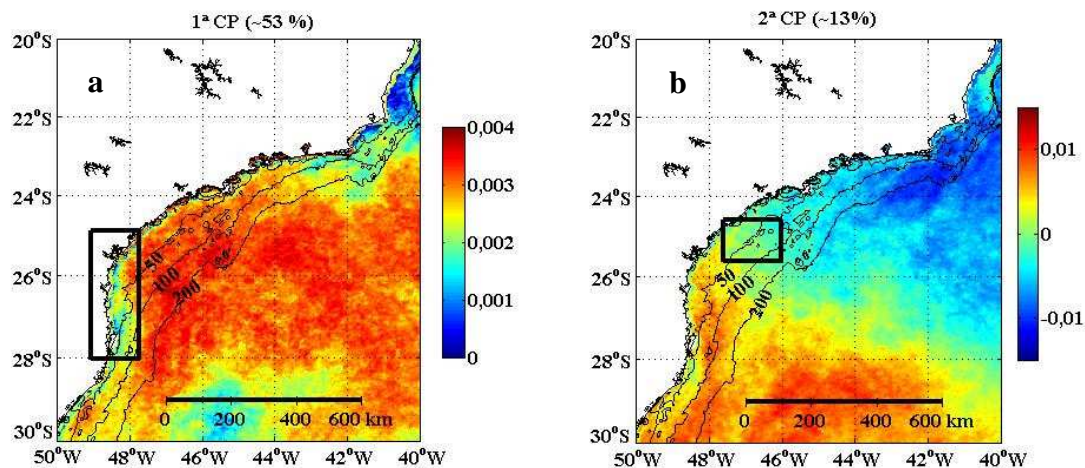


Figura 3 – Mapas da Primeira (53% da variância) e Segunda (13% da variância) Componentes Principais da ACP aplicada às anomalias de TSM dos meses de novembro a janeiro no período entre 1985 e 2007.

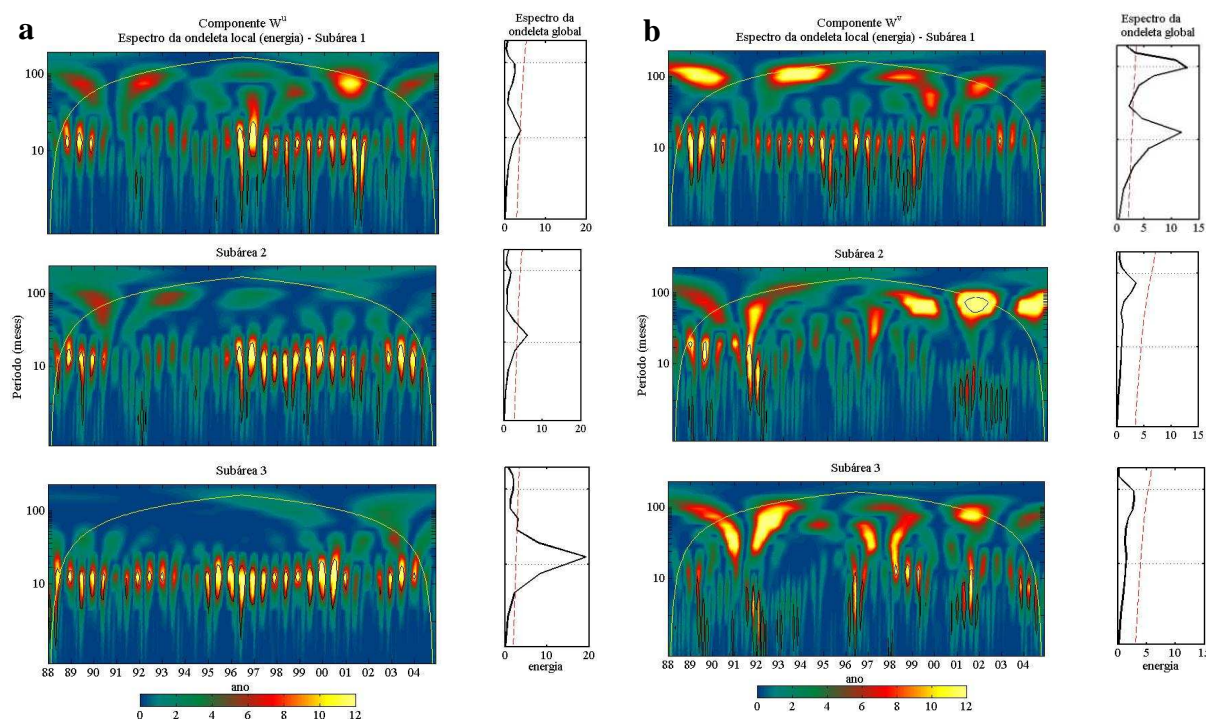


Figura 4. Espectros de ondeleta resultantes da análise dos dados mensais e intensidade do vento para o período de 1988 a 2004, nas subáreas 1, 2 e 3 da PCSB. **a)** Componente zonal W^u ; **b)** Componente meridional W^v .

No domínio do tempo observou-se, para a componentes zonal nas Subáreas 1 e 2, e para a componente meridional na Subárea 3, uma redução na variabilidade interanual durante a década de 90 (baixas energias no período de 12 meses). Esse intervalo de tempo coincide com o período de recuperação do estoque após o primeiro colapso (1990), e pode estar relacionado ao processo de expansão do *habitat* de desova sugerido por Gigliotti e colaboradores (no prelo).

4. Conclusões e perspectivas futuras

Os resultados mostram que a desova da sardinha verdadeira apresenta alguns padrões espaciais associados a escalas mais grosseiras (padrão Norte-Sul), e meso-escala, cuja importância parece refletir a abundância do estoque. Processos de contração e expansão do

habitat de desova são indicados, aparentemente, pela importância de menores escalas espaciais, que refletiriam ocorrências menos esparsas da desova. O padrão em maior escala parece ajustar-se a áreas com menor variabilidade ambiental, ou *habitats* relativamente mais estáveis.

A etapa seguinte do trabalho incluirá uma melhor avaliação dos padrões de covariação espacial através de modelos de regressão parcial, utilizando variáveis oceanográficas (temperatura e salinidade *in situ*, e derivadas de modelos de reanálise) como previsores. Pretende-se avaliar também quais mecanismos melhor explicariam às variações de meso escala observadas.

4 Referencias citadas

ATLAS, R.; HOFFMAN, R. N.; BLOOM, S. C.; JUSEM, J. C.; ARDIZZONE, J.. A multiyear global surface wind velocity data set using SSM/I wind observations. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 77, 869–882, 1996.

CASTELLO, J. P. **Síntese sobre a distribuição, abundância, potencial pesqueiro e biologia da sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*)**. Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva MMA-REVIZEE. Análise/Refinamento de Dados sobre Prospecção Pesqueira. Departamento de Oceanografia. Fundação Universidade do Rio Grande, 2006, 15 p.

CASTRO, B. M.; LORENZZETTI, J. A.; SILVEIRA, I. C. A.; MIRANDA, L. B. Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In: ROSSI-WONGTSCHOWSKY, C. L. D. B. (Ed.). **O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região sudeste-sul do Brasil**. São Paulo: EDUSP, 2006. cap. 1, p. 11-120.

CERGOLE, M. C.; SACCARDO, S. A.; ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C. L. D. B. Fluctuation in the spawning stock biomass and recruitment of the brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*): 1977-1997. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v.50, p.13- 26, 2002.

CSIRKE, J. Fluctuations in the abundance of small and mid-sized Pelagics. **Sci. Mar.**, v.59, n.3, p.481-490, 1995.

CURTIS, K.A. Fine scale spatial pattern of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) and northern anchovy (*Engraulis mordax*) eggs. **Fish. Oceanogr.** v.13, n.4, p.239–254, 2004.

DRAY, S., LEGENDRE, P.; PÉRES-NETO, P. Spatial modelling: a comprehensive framework for principal coordinate analysis of neighbour matrices (PCNM). **Ecological modeling**, 196:483-493, 2006.

GIGLIOTTI, E.S.; GHERARDI, D.F.M.; PAES, E.T.; SOUZA, R.B.; KATSURAGAWA, M. Spatial analysis of egg distribution and geographic changes in the spawning habitat of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*). **Journal of Fish Biology**, no prelo.

JABLONSKI, S.; LEGEY, L.F.L. Quantifying environmental effects on the recruitment of Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*), 1977-1993. **Scientia Marina**, v. 68, n.3, p. 385-398, 2004.

MATSUURA, Y. A probable cause of recruitment failure of brazilian sardine, *Sardinella aurita*, population during the 1974/75 spawning season. **South African Journal Marine Science**, v. 17, p. 29-35, 1996.

RANGEL, T.F.; DINIZ-FILHO, J.A.F.; BINI, L.M.. SAM: A comprehensive application for Spatial Analysis in Macroecology. **Ecography**, v.33,p.1-5, 2010.

SMITH,P.E.; SANTANDER, H.; ALHEIT, J. Comparison of the mortality rates of Pacific sardine, *Sardinops sagax*, and Peruvian anchovy, *Engraulis mordax*, eggs off Peru. **Fish.Bull. U.S.**, v.87, p.497-508, 1989.

SOUZA, R. B.; ROBINSON, I. S. Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. **Continental Shelf Research**, v.24, p.241-262, 2004.