

Variações da abundância de larvas da sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*) na Plataforma Continental Sudeste do Brasil e suas relações com a temperatura superficial do oceano

Eduardo da Silva Gigliotti¹
Eduardo Tavares Paes¹
Ariana Silva Guimarães¹
Luiz Eduardo de Souza Moraes¹
Douglas Francisco Marcolino Gherardi¹
Ronald Buss de Souza¹
Mario Katsuragawa²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{edsilva, etpaes, ariana, lemoraes, douglas, ronald}@dsr.inpe.br

² Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo – IOUSP
Caixa Postal 05.508-120 - São Paulo – SP, Brasil
mkatsura@usp.br

Abstract. *Sardinella brasiliensis* larvae abundance data in the Southern Brazilian Bight between 1991-1993 was submitted to a variation partition procedure, based on a series of linear partial correlation analyses, using a set of spatial and environmental parameters, alternating as variables and co-variables. This method decomposed the variability in four independent components: pure spatial variance, pure environmental variance, the spatially structured environmental variance and undetermined or non-explained variance. The environmental parameters were represented by *in-situ* measurements of surface and sub-surface temperature, as well as AVHRR derived sea surface temperatures (SST), and SST anomalies (ASST), based on monthly means from a 22 year time series. The spatial variation modes were determined through eigenanalyses, or Principal Coordinates, of a geographic distance matrix (PCNM). All variables accounted for only 21,4% of the total variance in larvae abundance. Most of this variability was spatially structured (15,4%), with a smaller percentage (6%) significantly related to temperature data, and 1,5% of spatially structured environmental variation. Despite the low correlation between temperature and abundance, a visual inspection of the larvae plots and *in situ*/ASST fields showed that the larvae abundance peaks were mostly associated with stronger thermal gradients. In our variance partitioning model, the partialling-out of the intrinsic spatial component from the species-environmental relationship did not favor the environmental control hypothesis. However, the association between larvae peaks and thermal fronts suggests that a direct correlation between both parameters may not be the most suitable approach, concerning the relationship between brazilian-sardine larvae and oceanographic variables.

Palavras-chave: *Sardinella brasiliensis*, larvae abundance, variation partitioning, spatial and environmental analysis, temperatura da superfície do mar, ecologia pesqueira, sardinha.

1. Introdução

A sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*), da família Clupeidae, é uma espécie pelágica de pequeno porte, subtropical (Cergole e Valentini, 1994), de hábitos costeiros (Saccardo e Rossi-Wongtschowski, 1991), e encontrada quase que exclusivamente ao longo da plataforma continental entre o Cabo de Santo Tomé (22 °S) e um pouco ao sul do Cabo de Santa Marta (28 ° S). Nessa extensa região, conhecida como Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE), observa-se uma complexa estrutura oceanográfica, onde prevalecem fenômenos de ressurgência costeira, descrita de forma geral por Matsuura (1986). Assim como outros pequenos pelágicos de regiões de ressurgência, a sardinha-verdadeira apresenta grandes flutuações populacionais associadas à mudanças climáticas globais naturais (Tourre et al. 2007).

A sardinha é um dos recursos pesqueiros mais importantes do Brasil. Sua pesca em nível industrial teve início na década de 1950 com a mecanização da frota pesqueira, e em nível comercial de grande escala a partir de meados dos anos 1960 (Valentini e Cardoso, 1991). Os dados de desembarque desta espécie evidenciam uma produção crescente até o ano de 1973 quando atingiu o máximo de captura com 228.000 t. Em 2000 atingiu seu o mínimo histórico com apenas 17.000 t, atualmente os desembarques são da ordem de 50-60 mil t anuais.

Em seu artigo seminal Hjort (1914) propôs que a variação nas populações dos peixes adultos, principalmente clupeídeos, dependeria diretamente da abundância dos ovos e larvas e da sua sobrevivência até o recrutamento de juvenis ao estoque adulto. Recentemente, vários estudos têm abordado a relação existente entre condições oceânicas e a distribuição e abundância de ovos e larvas de espécies de pequenos pelágicos, com a finalidade de entender os mecanismos responsáveis por suas variações espaço-temporais (Huggett et al., 2003; van der Lingen, 2005; Bernal, et al., 2007; Ibaibariaga et al., 2007; Planque et al., 2007).

O entendimento das relações entre a dinâmica populacional e ecologia larval da sardinha-verdadeira e a variabilidade ambiental da PCSE é fundamental para subsidiar as políticas de manejo e gerenciamento de sua pesca a níveis sustentáveis (Sunyé e Servain, 1998; Jablonski e Legey, 2004; Paes e Moraes, 2007). As grandes variações das capturas da sardinha-verdadeira sugerem que a sua população pode estar sofrendo diretamente os efeitos da sobrepesca, associada à variabilidade nas condições oceanográficas e meteorológicas, que por sua vez influenciam o sucesso reprodutivo no momento da desova, o desenvolvimento larval e também o recrutamento dos juvenis (Matsuura, 1996; Cergole et al., 2002).

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo caracterizar a variabilidade espacial da abundância de larvas da sardinha-verdadeira na PCSE e sua relação com a temperatura do mar, a partir de dados medidos em diferentes escalas espaço-temporais, ou seja: obtidos *in situ* no momento da coleta e em médias mensais de uma área de 16 km² obtidos por sensores orbitais.

2. Material e Métodos

As séries de dados de abundância de larvas de sardinha-verdadeira, temperatura superficial e temperatura de sub-superfície (10m) utilizadas neste trabalho são provenientes dos programas de prospecção oceanográfica JOPS 1 (janeiro/1991), Sardinha 1 (dezembro/1991) e Sardinha 2 (janeiro/1993), descritos em maiores detalhes em Katsuragawa et al. (2006).

As médias (TSM) e anomalias (ATSM) de temperatura da superfície do mar foram obtidas do Projeto Pathfinder, versão 5.0, que constitui uma base de dados derivada do reprocessamento de informações históricas dos radiômetros *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), a bordo dos satélites da série *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Esta base de dados é distribuída pelo *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PODAAC) pertencente ao *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) da Agência Espacial Americana (NASA), através do endereço eletrônico: <<http://podaac.jpl.nasa.gov/>>. Os dados selecionados para o estudo têm resolução espacial de 4km x 4 km e compreendem o período de 1985 até 2006.

Os valores médios de abundância das larvas de *S. brasiliensis* foram calculados para uma grade regular de 35km por 35 km, em localizações geográficas comuns a todos os anos de amostragem, perfazendo um total de 83 blocos (Figura 1).

A metodologia de análise empregada consistiu no protocolo de partição de variâncias proposto por Borcard et al. (1992), e complementado por Peres-Neto et al. (2006). Esse protocolo consiste de uma série de análises de regressões lineares parciais, ora utilizando como covariáveis um conjunto de variáveis descritoras do ambiente (no caso 4 medidas de temperatura: temperatura *in situ* de superfície, temperatura *in situ* à 10 m, TSM média mensal

por bloco e anomalia de TSM por bloco); ora variáveis descritoras do espaço. Desse protocolo é possível isolar quatro frações da variância da abundância média das larvas: **a**: proporção da variância das larvas explicada apenas pelo efeito da temperatura (filtrando-se o efeito significativo das variáveis descritoras do espaço); **b**: proporção da variância explicada pela interseção entre temperatura e espaço – colinearidade; **c**: proporção da variância explicada pelo espaço - autocorrelação espacial, e **d**: proporção da não explicada pelos conjuntos de dados utilizados (descritores de temperatura e descritores do espaço).

As variáveis utilizadas para retratar (descrever) as diferentes escalas espaciais foram estimadas através do cálculo das coordenadas principais (autoanálise) de uma matriz particular de distâncias geográficas entre os pontos centrais dos blocos. Essa matriz é deliberadamente alterada para conter apenas as distâncias geográficas entre os blocos adjacentes e zeros. Cada autovetor positivo vai expressar uma escala de variação espacial (semelhante às frações de Fourier de um espaço bidimensional). Esses autovetores são ortogonais entre si, sendo que os de maiores autovalores representam variações de grande escala (aproximadamente de 500 km), e os de autovalores menores representam variações de pequena escala, da ordem de 35 km. Essa técnica foi proposta por Bocard e Legendre (2002) e vem sendo largamente empregada em estudos de ecologia espacial devido sua relativa simplicidade (Jones et al., 2008). Os autovetores serão doravante identificados como PCNM(i), mantendo as iniciais de sua nomenclatura em inglês: “*Principal Coordinates of Neighbor Matrices*”

3. Resultados e Discussão

As médias de abundância de larvas da sardinha-verdadeira, espacializadas em uma grade comum aos três cruzeiros, são representadas na Figura 1. A área de distribuição horizontal observada é bastante ampla, cobrindo a região costeira desde o Cabo de São Tomé até o Cabo de Santa Marta Grande. Analisando a abundância de larvas do período entre 1991 e 1993 observou-se uma grande variação quanto à localização geográfica. Estas flutuações na quantidade de larvas podem estar relacionadas à distribuição de massas de água e formação de frentes, que influenciariam sua sobrevivência (Katsuragawa et al. 2006). Segundo Kurtz (1999), a alimentação das larvas de sardinha-verdadeira é composta, majoritariamente, por consumidores primários (náuplios e copépodes adultos), e ovos de invertebrados. As condições ambientais adequadas ao desenvolvimento larval, no que tange à disponibilidade de alimento, estariam, portanto, fortemente relacionadas aos ciclos de produção primária (Katsuragawa et al. 2006). Não obstante, Dias (1995) encontrou uma grande variação na quantidade de larvas em más condições, reforçando a idéia da existência de elevadas flutuações no recrutamento em decorrência de mecanismos físicos e bio-físicos atuantes nos estágios iniciais do ciclo de vida da espécie.

De maneira geral a abundância de larvas em janeiro/1991 apresentou uma distribuição homogênea ao longo de toda a PCSE, e adjacente à costa, com valores máximos na região do Cabo de Santa Marta. Em dezembro/1991 as maiores abundâncias concentraram-se entre Paranaguá e Florianópolis. Em contrapartida, em janeiro/1993 a concentração das maiores abundâncias de larvas deslocou-se para a região localizada entre a Ilha de São Sebastião e Santos (Figura 1).

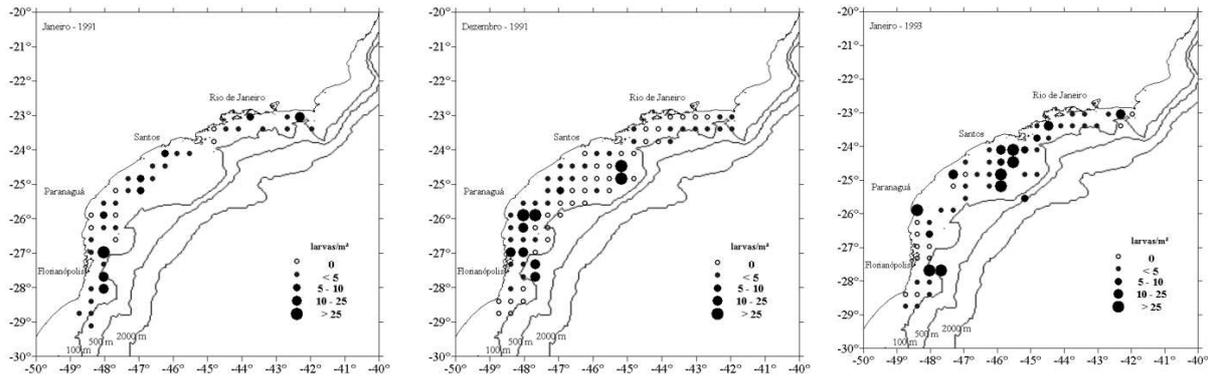


Figura 1. Distribuição e abundância das larvas de sardinha-verdadeira sobre a PCSE. Projeto JOPS-1 (Janeiro/1991), Projeto Sardinha-1 (Dezembro/1991) e Projeto Sardinha-2 (Janeiro/1993).

O resultado da seqüência de análises de regressões lineares parciais é apresentado na Tabela 1 e graficamente na Figura 2. Duas variáveis de temperatura (ATSM e de superfície *in situ*) explicaram 7,5% da variância total da distribuição de larvas na PCSE. A análise utilizando os modos (autovetores) de variação derivados da PCNM resultou em 15,4% da variância total da distribuição de larvas. Os modos de variação 4, 12, 19, 30, 33 e 58 apresentaram contribuição significativa no modelo final ($p < 0,05$).

A variação espacial pura (espaço – temperatura), fração **c**, foi superior a variação associada exclusivamente ao ambiente (temperatura – espaço) fração **a**, indicando a existência de estrutura espacial na distribuição das larvas. A interação entre ambas as fontes de variabilidade foi de apenas 1,5% (Figura 2). Uma grande parte da variação foi indeterminada, não apresentando relação linear com as variáveis de temperatura utilizadas neste trabalho.

Tabela 1 – Análises de regressões lineares (parciais)

Etapa	Variáveis exploratórias	Co-variáveis	Variabilidade (%)
1	ATSM, T°C <i>in situ</i>	-	7,5
2	PCNMs	-	15,4
3	ATSM, T°C <i>in situ</i>	PCNMs	6,0
4	PCNMs	ATSM, T°C <i>in situ</i>	13,9

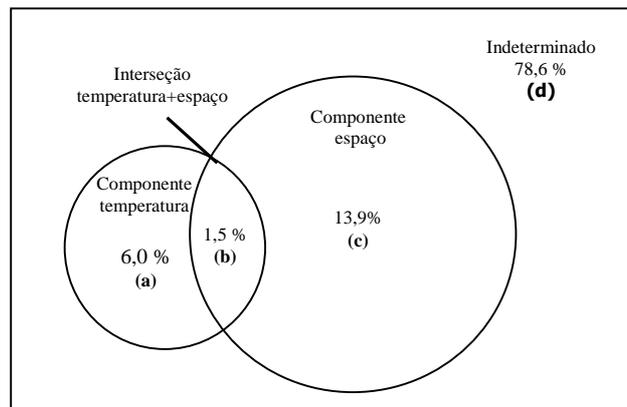


Figura 2 – Resultado da seqüência de análises de regressão. **a** – variação explicada puramente pela componente ambiental (temperatura); **b** – variação explicada pela interseção entre componentes ambiental e espacial; **c** – variação explicada puramente pela componente espacial ; **d** – fração da variação que não pode ser explicada com este conjunto de variáveis.

A Figura 3 mostra, a título de ilustração, a plotagem dos modos (PCNMs) de variação 4; 33 e 58, que contribuíram significativamente para a variabilidade espacial, e ilustra três diferentes níveis de escalas de variabilidade detectadas no padrão de distribuição espacial das larvas. Com base na ordem decrescente de contribuição destes modos espaciais significativos, pôde-se observar que a distribuição de larvas segue predominantemente um padrão de variabilidade em meso-escala (modos 12; 30; 33 e 19, correspondendo, aproximadamente, a 10% dos 15,4% de variação total explicada) que representam, no caso, fenômenos de escalas da ordem de 250 a 350km, apresentando ainda alguma variação local (modo 58= ~3%), e de maior escala (modo 4= ~2%).

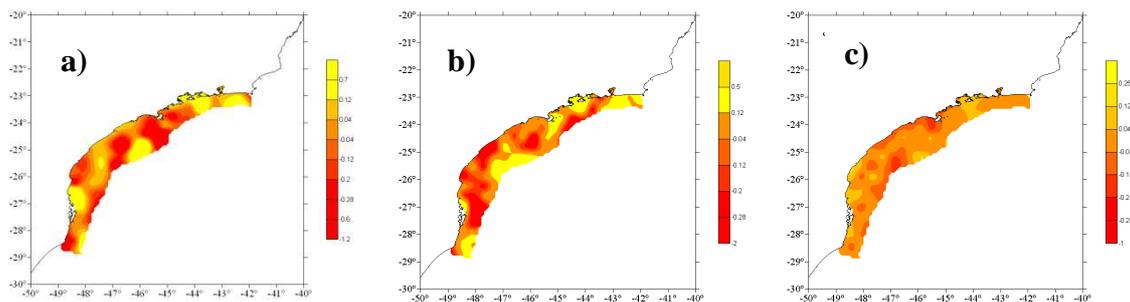
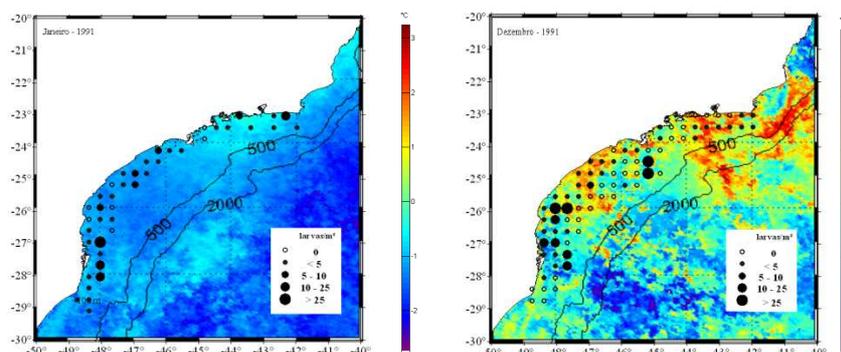


Figura 3. Variação espacial em: **a e b** – meso-escala; **c** – escala local, determinados pela Matriz de Coordenadas Principais de Vizinhança Espacial.

A Figura 4 exibe as abundâncias médias de larvas e os campos de anomalia TSM derivados do sensor AVHRR. A correlação direta entre as variáveis foi baixa ($r = -0,24$). Entretanto, notou-se que, de modo geral, o posicionamento das áreas de maior concentração média de larvas coincidiu com zonas que apresentam gradientes térmicos horizontais mais evidentes. A princípio esta particularidade iria de encontro ao pequeno percentual de participação da temperatura isolada (6,0%) sobre a variabilidade na distribuição das larvas. Por outro lado, a presença de larvas em regiões com gradientes térmicos explicaria a baixa correlação entre a temperatura e os valores de abundância média, pois as concentrações não estariam necessariamente associadas a valores altos ou baixos de temperatura, mas a diferenças espaciais locais, possivelmente decorrentes da presença de frentes oceânicas, onde as condições são propícias para disponibilidade de alimento. Este aspecto foi visível também na figura 5, correspondente a plotagem das temperaturas superficiais *in situ*. Observa-se que as maiores concentrações de larvas localizaram-se próximas a áreas com gradientes térmicos horizontais, de modo similar ao observado anteriormente, com base em estimativas orbitais da TSM. Neste caso, a correlação entre as médias de abundância de larvas e temperatura foi baixa e positiva ($r = 0,19$).



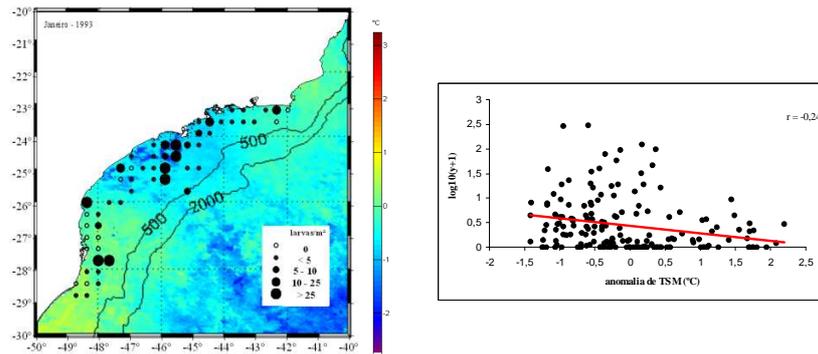


Figura 4. Abundância média das larvas e campos de anomalia TSM mensal derivados do sensor AVHRR para janeiro/1991, dezembro/1991 e janeiro/1993 (profundidade em metros) e o gráfico com a correlação entre estas amostras.

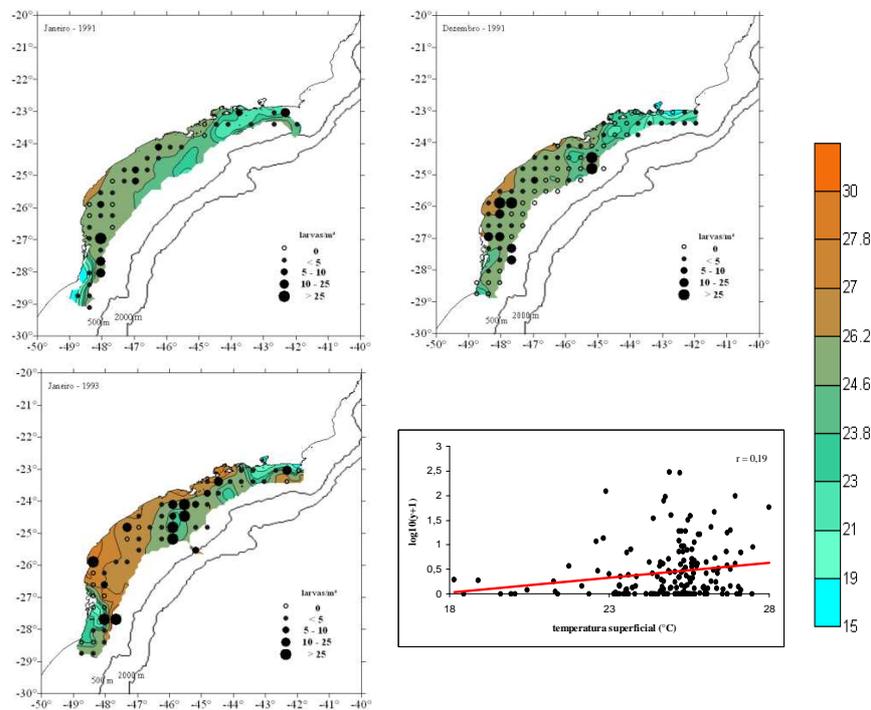


Figura 5. Abundância média das larvas e temperatura de superfície ($^{\circ}\text{C}$) medidas *in-situ* para janeiro/1991, dezembro/1991 e janeiro/1993 e o gráfico com a correlação entre as amostras.

4. Conclusões

Foi possível concluir que a distribuição de larvas na PCSE apresenta uma estrutura espacial evidente, a qual possivelmente está relacionada à presença de frentes termais, que propiciariam condições favoráveis a alimentação das larvas. Esses fenômenos possivelmente se expressam em escalas de 250 a 300 km. A distribuição espacial dos valores máximos de abundância localizou-se próximo a áreas de gradiente termal horizontal mais evidente, o que pode justificar a baixa correlação direta observada entre as medidas de temperatura e as médias de abundância de larvas. Isto poderia explicar a pequena parcela de explicação (6%) atribuída às variações na temperatura superficial do oceano, sobre as variações de abundância das larvas de *S. brasiliensis*. Mesmo assim, duas medidas de temperatura mensuradas em diferentes escalas foram significativamente correlacionadas com a variação espacial das larvas.

O conjunto de variáveis espaciais e ambientais utilizado neste trabalho explicou um pequeno percentual (~20%) da variabilidade total das larvas de sardinha-verdadeira na

Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE). A utilização do protocolo de decomposição de variâncias apresenta potencialidades para a determinação de estimativas mais realistas das contribuições do ambiente oceanográfico físico da região, na variabilidade espacial das larvas. O uso de ferramentas de Sensoriamento Remoto também constitui contribuição relevante para uma melhor estimativa da variabilidade dos processos oceânicos em escala regional. Futuros estudos devem ser realizados no sentido de testar as hipóteses relacionadas aos gradientes térmicos horizontais, tratando de incorporar no mesmo protocolo outras variáveis relacionadas tais como velocidade e direção do vento, além de observações mais detalhadas dos resíduos espaciais, (fração **d**) na exploração e elaboração de outras hipóteses.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro prestado na forma de bolsas (modalidades Mestrado, Doutorado e Desenvolvimento Tecnológico Industrial).

Referências Bibliográficas

Bernal, M.; Stratoudakis, Y.; Coombs, S.; Angelico, M. M.; Lago de Lanzós, A.; Porteiro, C.; Sagaeminaga, Y.; Santos, M.; Uriarte, A.; Cunha, M. E.; Valdés, L.; Borchers, D. Sardine spawning off the european atlantic coast: characterization of and spatio-temporal variability in spawning habitat. **GLOBEC International Newsletter**, n. 13, p. 20-22, 2007.

Borcard, D.; Legendre, P.; Drapeau, P. Partialling out the spatial component of ecological variation. **Ecology**, v. 73, n. 3, p. 1045-1055, 1992.

Borcard, D.; Legendre, P. All-scale spatial analysis of ecological data by means of principal coordinates of neighbor matrices. **Ecological Modelling**, v. 153, p. 51-68, 2002.

Cergole, M. C.; Valentini, H. Growth and mortality of *Sardinella brasiliensis* in the southeast brazilian bight. **Boletim do Instituto Oceanográfico de São Paulo**, v. 42, p.113-127, 1994.

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.

Dias, J. F. **Avaliação da condição nutricional das larvas de sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*, Steindachner, 1879) Clupeidae e da anchoíta (*Engraulis anchoita* Hubbs & Marini, 1935) Engraulididae, da costa Sudeste do Brasil**. 1995. 64p. Tese (Doutorado em Oceanografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 1995.

Hjort, J. Fluxuation in the great fisheries of northern Europe viewed in the light of biological research. **Rapp. P. Réun. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.**, v. 20, p. 1-228, 1914.

Huggett, J.; Fréon, P.; Mullon, C.; Penven, P. Modelling the transport success of anchovy *Engraulis encrasicolus* eggs and larvae in the southern Benguela: the effect of spatio-temporal spawning patterns. **Marine Ecology Progress Series**, v. 250, p. 247-262, 2003.

Ibaibariaga, L.; Irigoien, X.; Santos, M.; Motos, L.; Fives, J.; Franco, C.; Lago de Lanzós, A.; Acevedo, S.; Bernal, M.; Bez, N.; Eltink, G.; Farinha, A.; Hammer, C.; Iversen, S.; Milligan, S.; Reid, D. Egg and larvae distribution of seven fish species in the north-east atlantic waters. **Fisheries Oceanography**, v. 16, n. 3, p. 284-293, 2007.

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.

Jones, M. M.; Tuomisto, H.; Borcard, D.; Legendre, P.; Clark, D. B.; Olivas, P. C. Explaining variation in tropical plant community composition: influence of environmental and spatial data quality. **Oecologia**, v.155, n. 3, p. 593-604, 2008.

Katsuragawa, M.; Muelbert, J. H.; Dias, J. F. O Ictioplâncton na região entre Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In: Rossi-Wongtschowski, C. L. D. B.; Madureira, L.S. **O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região sudeste-sul do Brasil**. São Paulo: Edusp, 2006. cap. 6, p. 359-446.

Kurtz, F. W. **Dinâmica larval de *Sardinella brasiliensis* (Steindachner, 1879) (Teleostei, Clupeidae) na região sudeste do Brasil e implicações no recrutamento**. 1999. 169p. Tese (Doutorado em Oceanografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 1999.

Matsuura, Y. Contribuição ao estudo da estrutura oceanográfica da região sudeste entre Cabo Frio (RJ) e Cabo de Santa Marta Grande (SC). **Ciência e Cultura**, São Paulo, v. 38, n. 8, p.1439-1450, 1986.

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.

Paes, E. T.; Moraes, L. E. A new hypothesis on the influence of the El Niño/La Niña upon the biological productivity, ecology and fisheries of the Southern Brazilian Bight. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 2, p. 94-102, 2007.

Planque, B.; Bellier, E.; Lazure, P. Modelling potential spawning habitat of sardine (*Sardine pilchardus*) and anchovy (*Engraulis encrasicolus*) in the Bay of Biscay. **Fisheries Oceanography**, v. 16, n. 1, p. 16-30, 2007.

Saccardo, S. A.; Rossi-Wongtschowky, C. L. D. B. Biologia e avaliação do estoque da sardinha *Sardinella brasiliensis*: uma compilação. **Atlântica Rio Grande**, v. 13, n.1, p. 29-43, 1991.

Sunyé, P. S.; Servain, J. Effects of seasonal variations in meteorology and oceanography on the brazilian sardine fishery. **Fishery Oceanography**, v. 7, n. 2, p. 89-100, 1998.

Tourre, Y. M.; Lluch-Cota, S. E.; White, W. B. Global multi-decadal ocean climate and small-pelagic fish population. **Environmental Research Letters**, v.2, n. 3, p. 1-9, 2007.

Valentini, H.; Cardoso, R. D. Análise da pesca da sardinha-verdadeira, *Sardinella brasiliensis*, na costa sudeste-sul do Brasil. **Atlântica Rio Grande**, v. 13, n. 1, p. 45-54, 1991.

van der Lingen, C. D.; Castro, L.; Drapeau, L.; Checkley Jr., D. Report of a GLOBEC-SPACC Workshop on Characterizing and Comparing the Spawning Habitats of Small Pelagic Fish. Plymouth: GLOBEC International Project, 2005. 33p. (Report 22: xii).