



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.04.14.00-TDI

**DETERMINAÇÃO DOS PADRÕES DE DESOVA E DA  
SOBREVIVÊNCIA DAS LARVAS DA  
SARDINHA-VERDADEIRA (*Sardinella brasiliensis*) NA  
PLATAFORMA CONTINENTAL SUDESTE DO BRASIL,  
UTILIZANDO MODELAGEM BASEADA EM  
INDIVÍDUO**

Daniela Faggiani Dias

Dissertação de Mestrado em Senso-  
riamento Remoto, orientada pelos  
Drs. Douglas Francisco Marcolino  
Gherardi, e Luciano Ponzi Pezzi,  
aprovada em 27 de maio de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E3HB8L>>

INPE  
São José dos Campos  
2013

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**

### **Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.04.14.00-TDI

**DETERMINAÇÃO DOS PADRÕES DE DESOVA E DA  
SOBREVIVÊNCIA DAS LARVAS DA  
SARDINHA-VERDADEIRA (*Sardinella brasiliensis*) NA  
PLATAFORMA CONTINENTAL SUDESTE DO BRASIL,  
UTILIZANDO MODELAGEM BASEADA EM  
INDIVÍDUO**

Daniela Faggiani Dias

Dissertação de Mestrado em Senso-  
riamento Remoto, orientada pelos  
Drs. Douglas Francisco Marcolino  
Gherardi, e Luciano Ponzi Pezzi,  
aprovada em 27 de maio de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E3HB8L>>

INPE  
São José dos Campos  
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Dias, Daniela Faggiani.

D543d Determinação dos padrões de desova e da sobrevivência das larvas da sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*) na plataforma continental sudeste do Brasil, utilizando modelagem baseada em indivíduo / Daniela Faggiani Dias. – São José dos Campos : INPE, 2013.

xxii + 92 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.04.14.00-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. Douglas Francisco Marcolino Gherardi, e Luciano Ponzi Pezzi.

1. modelo hidrodinâmico. 2. modelo baseado em indivíduo. 3. peixes pequenos pelágicos. 4. *Sardinella brasiliensis*. I. Título.

CDU 528.88 (261.67)

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Sensoriamento Remoto**

Dr. João Antonio Lorenzetti

Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Douglas Francisco Marcolino  
Gherardi

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Luciano Ponzi Pezzi

Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. José Luiz Stech

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Ricardo de Camargo

Convidado(a) / IAG/USP / São Paulo - SP

Dr. Rodrigo Silvestre Martins

Convidado(a) / IO/USP / São Paulo - SP

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(✓) unanimidade

Aluno (a): **Daniela Faggiani Dias**

São José dos Campos, 27 de Maio de 2013



“A preguiça é a mãe do progresso.  
Se o homem não tivesse preguiça de caminhar,  
não teria inventado a roda.”

*Mário Quintana*



*A meus pais, Liane e Zulu.*



## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro concedido na forma de bolsa de mestrado e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudo e de utilização de suas instalações.

Aos meus orientadores Dr. Douglas Francisco Marcolino Gherardi e Dr. Luciano Ponzi Pezzi, pela confiança em mim depositada, por todo o conhecimento passado e pela ajuda nas horas mais difíceis. Muito obrigada!

Ao João Marcelo Absy, pela ajuda com o modelo hidrodinâmico, ao Dr. Rodrigo Martins, pela ajuda com o *Ichthyop* e pelo esclarecimento de diversas dúvidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho e ao Dr. Luiz Eduardo Moraes pelo auxílio nas análises estatísticas.

Ao Dr. Phillipe Verley, do *Institut de Reserch pour Le Developpement* (IRD), por se mostrar sempre disponível a resolver os diversos problemas encontrados com a implementação do *Ichthyop*, além das sugestões que foram de grande valia para o presente trabalho.

Aos meus grandes amigos Rafinha, Kleber, Nathália e Veronika, pela parceria, experiências compartilhadas e pela força em todas as ocasiões.

Aos meus companheiros de laboratório Otávio, Vivian, Natália, Andressa, Carina e em especial à Cláudia, pelos inúmeros auxílios computacionais, à Helena, por compartilhar dos desafios em nossa rotina de trabalho e à Catarina, pelas ideias, ajudas e por sobreviver comigo a todas as disciplinas!

À turma de 2011 e aos demais amigos do INPE, em especial Lino, Thiago, André, Alexandre, Jonas, Annia, Felipe, Clayton e Zé pela companhia ao longo desses dois anos. À Grazi que, além de me aturar sob o mesmo teto, partilhou comigo momentos de descontração, boas conversas e uma boa amizade.

Aos amigos distantes Japuí, Risadinha, Bello, Bicudo, João, Tamires, Laís, Rodolfo, Frango, Tonhão, Keko e Kekinho, parceiros de muitas velejadas e competições; Fabrício, pelas boas conversas nos últimos meses e pela ideia da epígrafe; Tuany, Camilinha, Camilla Bório, Dani Hernandez, Gerson (Zé), Gustavo (Zé) e Fernandão pela amizade de longa data.

Por fim, a minha família, meus irmãos Ivo, Carina e Leo, minha cunhada Flavinha, meus primos Andressa e Diego, meus tios Lilian, Neto e Ju e minha avó Glória, por todo carinho e momentos de descontração. Em especial a meus pais, Liane e Zulu, pelo incansável apoio durante toda a minha vida, em tudo, e por sempre acreditarem em mim. E a meu sobrinho Arthurzinho, simplesmente por existir!



## RESUMO

Um modelo baseado em indivíduo (IBM) foi implementado em conjunto com um modelo numérico hidrodinâmico regional (ROMS), tridimensional, para simular diferentes estratégias espaciais de desova da sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*), considerando a influência das características físicas da PCSE na sobrevivência das larvas. Primeiramente, verificou-se a consistência dos resultados do modelo hidrodinâmico por meio da comparação com dados de satélite e dados coletados em campo. Os resultados mostraram-se consistentes e confiáveis para serem utilizados como forçantes físicas do IBM. Dois experimentos foram realizados para os verões de seis anos, correspondente àqueles em que há disponibilidade de dados de campo (1980, 1981, 1988, 1991, 1992 e 1993): liberando os ovos aleatoriamente ao longo da costa (RZR) e em conhecidas áreas de desova ao longo da PCSE (RZP). A estratégia de desova em RZP mostrou-se mais eficiente, em termos de sobrevivência das larvas. Além disso, as características termodinâmicas da PCSE fazem com que a parte centro-sul seja mais vantajosa para a desova, pois as temperaturas são mais favoráveis à sobrevivência e o padrão de circulação mantém as larvas retidas próximo à costa. O confinamento da sardinha-verdadeira na PCSE é também consequência desse padrão de circulação e isso faz com que a sardinha-verdadeira seja capaz de explorar *habitats* mais favoráveis à desova, de acordo com a variabilidade interanual das características físicas da PCSE.



# **MODELING SPAWNING STRATEGIES AND LARVAE SURVIVAL OF BRAZILIAN SARDINE (*Sardinella brasiliensis*) IN SOUTH BRAZIL BIGHT**

## **ABSTRACT**

An Individual Based Model (IBM), coupled with a 3D hydrodynamic model (ROMS), was used to simulate different spawning strategies for Brazilian Sardine considering the influence of SBB physical characteristics in larvae survival. First, it was evaluated the consistence of hydrodynamic model solutions by comparing them with satellite data and data collected on the field. The results were consistent and reliable to be used as physical forcing of Ichthyop. In IBM, two experiments were performed for the summer of six years, corresponding to those in which there are field data: releasing the eggs randomly along the coast (RZR) and in known spawning zones along SBB (RZP). The spawning strategy proposed in RZP showed more efficient, regarding the larvae survival. Besides, the thermodynamics characteristics of SBB cause the better suitability of central-southern part for spawning, because the water temperature is more suitable for larvae survival and the circulation pattern keep the larvae retained near coast region. The confinement of Brazilian sardine in SBB is also consequence of this circulation pattern, which makes sardine capable of exploring more suitable places for spawning, according to the interannual variability of the physical characteristics over the SBB.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – PCSE e as isóbatas associadas.....	5
Figura 2.2 – Representação esquemática do giro subtropical do AS.....	9
Figura 2.3 – <i>Sardinella brasiliensis</i> .....	15
Figura 2.4 – definição do habitat de desova da sardinha-verdadeira com base em modelos espaciais de krigagem indicativa. ....	18
Figura 3.1 – Corte vertical na latitude 28°S, que representa as coordenadas verticais sigma utilizadas para os experimentos. ....	32
Figura 3.2 – áreas de desova testadas no experimento RZR(A) e RZP (B).....	36
Figura 4.1 – Média anual da TSM extraída do ROMS (A), do AVHRR (B) e suas diferenças (ROMS – AVHRR) (C).....	41
Figura 4.2 – Perfis da média sazonal de TSM resultante do ROMS e do AVHRR, ao longo das latitudes 22°S (A) e 29°S (B). ....	42
Figura 4.3 – Média sazonal (verão) da TSM extraída do ROMS (A), do AVHRR (B) e suas diferenças (ROMS – AVHRR) (C). ....	43
Figura 4.4 – Média sazonal (inverno) da TSM do ROMS (A), do AVHRR (B) e suas diferenças (ROMS – AVHRR) (C).....	43
Figura 4.5 – Média anual da ASM extraída do AVISO (A) e do ROMS (B).....	44
Figura 4.6 – Diagramas TS resultantes do ROMS (pontos azuis) e de dados coletados em campo (pontos pretos) por Castro (1986), para o mês de Dezembro dos anos indicados. ....	46
Figura 4.7 – Perfis verticais na latitude 24°S da média anual entre 1980 e 2007, para temperatura (A), em °C, salinidade (B) e correntes meridionais (C), em m.s <sup>-1</sup> ; média sazonal (verão) para temperatura (D), salinidade (E) e correntes meridionais (F); e média sazonal (inverno) temperatura (G), salinidade (H) e correntes meridionais (I).....	48
Figura 4.8 – Anomalias de TSM (esquerda), a 10 m (meio) e 20 m de profundidade (direita), para os meses de janeiro dos anos analisados geradas pelo ROMS.....	49
Figura 4.9 – Diagramas TS (médias mensais) ao longo da latitude 24°S, entre as longitudes de 47°W e 43°W, em profundidades de até 100 m, para janeiro dos anos analisados.....	52
Figura 4.10 – Campos de correntes superficiais (vetores) sobrepostos às ASM para todo o domínio (esquerda) e detalhe dos vetores de corrente superficial para a região entre São Sebastião e Paranaguá (direita), para os anos analisados .....	53
Figura 4.11 – Densidade de kernel para as larvas sobreviventes após 45 dias do experimento RZR. ....	55
Figura 4.12 – Densidade de kernel para as larvas sobreviventes após 45 dias do experimento RZP. ....	55
Figura 4.13 – densidade de larvas (ind.m <sup>-2</sup> ) coletadas nos anos estudados....	58

Figura 4.14 – boxplot das variáveis três variáveis analisadas (sobrevivência, mortalidade por temperatura e perdas por advecção), para os dois experimento (RZR e RZP), considerando as cinco áreas de desova em RZP (A) e excluindo-se RZP1 (B).....	60
Figura 4.15 – boxplot dos resultados para sobrevivência (A), mortalidade por temperatura (B) e perdas por advecção (C).....	61
Figura 4.16 – teste de Tukey entre as cinco áreas de desova para sobrevivência (A), mortalidade por temperatura (B) e perdas por advecção (C) e excluindo-se a RZP1 para advecção (D). Em azul, a área de desova que está sendo testada e em vermelho aquelas que se diferenciam da área testada....	62
Figura 4.17 – perdas por advecção, por RZP excluindo-se RZP1. ....	63
Figura 4.18 – Análise de escalonamento multidimensional para (A) RZR e (B) RZP. Os eixos das abscissas e das ordenadas indicam os valores de dissimilaridade entre as amostras. Quanto mais próximo um ponto do outro, maior a similaridade entre eles.....	64
Figura 4.19 – proporção total de indivíduos mortos por temperatura, advectados para fora do habitat de desova e sobreviventes, ao longo dos seis anos de estudo, para o experimento RZR. ....	65
Figura 4.20 – proporção total de indivíduos mortos por temperatura, advectados e sobreviventes, ao longo dos seis anos de estudo, para o experimento RZP. ....	65
Figura 4.21 – Sobrevivência em função do tempo do experimento ao longo de 45 dias, para os seis anos estudados e para o experimento RZR.....	66
Figura 4.22 – Sobrevivência em função do tempo do experimento ao longo de 45 dias, para os seis anos estudados e para o experimento RZP.....	67
Figura 4.23 – sobrevivência (A), mortalidade por temperatura (B) e perdas por advecção (C) por RZP e por ano.....	68
Figura 5.1 – variabilidade interanual na abundância de ovos coletados da <i>Sardinella brasiliensis</i> .....	76

## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Tabela 3.1 – Canais espectrais do sensor AVHRR.....	25
Tabela 3.2 – Altimetros utilizados e seus períodos de operação .....	27
Tabela 3.3 – Características dos cruzeiros oceanográficos .....	29
Tabela 3.4 – Área de desova do experimento RZP.....	35
Tabela 4.1 – Amostras utilizadas na aplicação da ANOVA.....	59



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

PCSE	Plataforma Continental Sudeste do Brasil
PCI	Plataforma Continental Interna
PCM	Plataforma Continental Média
PCE	Plataforma Continental Externa
IBM	Individual Based Model
EPP	Espécie de Peixe Pelágico
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ATSM	Anomalia de Temperatura da Superfície do Mar
FTS	Frente Térmica Superficial
FTP	Frente Térmica Profunda
FHS	Frente Halina Superficial
ASM	Altura da Superfície do Mar
BSST	Best Sea Surface Temperature
SODA	Simple Ocean Data Assimilation
NCEP	National Center for Environmental Prediction
CFRS	Climate Forecast System Reanalysis
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSST	Non Linear Sea Surface Temperature
AVISO	Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data
AS	Atlântico Sul
CB	Corrente do Brasil
CSE	Corrente Sul Equatorial
AT	Água Tropical
AC	Água Costeira
ACAS	Água Central do Atlântico Sul
AIA	Água Intermediária Antártica
APAN	Água Profunda do Atlântico Norte
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
SF	Sistemas Frontais
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul



## SUMÁRIO

	<b><u>Pág.</u></b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. Hipótese .....	3
1.2. Objetivos .....	4
1.2.1. Objetivo geral .....	4
1.2.2. Objetivos específicos .....	4
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	5
2.1. Plataforma Continental Sudeste do Brasil .....	5
2.1.1. Massas de água .....	6
2.1.2. Dinâmica atmosférica e oceânica sobre a PCSE .....	7
2.1.3. Frentes e regiões da PCSE .....	12
2.1.4. Circulação e ressurgência .....	13
2.2. Sardinha-verdadeira .....	14
2.3. Modelagem biofísica .....	19
2.4. Estimativas de TSM por sensoriamento remoto .....	21
2.5. Estimativa de ASM por sensores altimétricos .....	23
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	25
3.1. Dados .....	25
3.1.1. Dados de satélite .....	25
3.1.2. Dados de reanálise .....	27
3.1.3. Dados de batimetria e linha de costa .....	28
3.1.4. Dados in situ .....	29
3.2. Modelo numérico oceânico .....	30
3.2.1. Configuração da grade .....	32
3.2.2. Experimentos no ROMS .....	33
3.2.3. Comparação dos resultados com dados observacionais .....	33
3.3. Modelo biofísico .....	34
3.3.1. Submodelos do IBM .....	36
3.4. Análise dos resultados .....	38
<b>4 RESULTADOS</b> .....	41

4.1.	Soluções do modelo hidrodinâmico .....	41
4.1.1.	Temperatura da Superfície do Mar (TSM) .....	41
4.1.2.	Altura da Superfície do Mar (ASM) .....	43
4.1.3.	Diagramas Temperatura Salinidade (TS).....	44
4.1.4.	Perfis verticais de temperatura, salinidade e correntes meridionais	46
4.2.	Caracterização oceanográfica dos anos de estudo .....	48
4.3.	Análise biofísica .....	54
4.3.1.	Distribuição espacial das larvas: dados reais e simulados .....	54
4.3.2.	Influência da variabilidade espacial da desova sobre a mortalidade das larvas .....	58
4.3.3.	Variabilidade interanual da desova .....	63
4.3.4.	Variabilidade interanual e espacial da desova .....	67
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>69</b>
5.1.	Desempenho dos modelos.....	69
5.2.	Estratégias espaciais de desova .....	72
5.3.	Influência da variabilidade interanual na sobrevivência das larvas .....	74
5.4.	Características físicas da PCSE e sua relação na sobrevivência das larvas .....	76
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A sardinha-verdadeira é uma espécie de peixe pelágico (EPP) de pequeno porte e de hábitos costeiros, que possui uma grande importância econômica para a indústria pesqueira no Brasil. Esta é a espécie mais abundante nas águas costeiras brasileiras e ainda é o recurso pesqueiro mais importante para o país (KATSURAGAWA et al., 2006). Além disso, é uma importante fonte de alimento para toda a população, devido ao seu custo final relativamente baixo. Sua distribuição está restrita à Plataforma Continental Sudeste (PCSE), uma região de produtividade relativamente alta, limitada pelo Cabo Frio, no Estado do Rio de Janeiro, ao Norte, e pelo Cabo de Santa Marta, em Santa Catarina, ao Sul.

As EPPs apresentam um ciclo de vida curto, crescimento rápido, e taxas de mortalidade natural muito altas e variáveis. Por isto, o tamanho do estoque é muito dependente do recrutamento e a sua pesca alterna períodos de capturas elevadas seguidos de colapsos na produção (BARANGE et al., 2009). As capturas comerciais da sardinha-verdadeira têm sofrido flutuações acentuadas ano a ano e na década de 1990 apresentou uma queda significativa, desequilibrando todo o setor pesqueiro envolvido na captura comercial dessa espécie. Essa queda sugere que foram realizados esforços excessivos de pesca sobre a população de sardinha-verdadeira, levando sua pescaria a uma situação de colapso (CERGOLE et al., 2002). Porém, estudos recentes mostram que, apesar da tendência de sobrepesca, a variação interanual nas capturas de sardinha-verdadeira pode estar fortemente relacionada a padrões climáticos estabelecidos através da interação entre o oceano e a atmosfera (BAKUN e PARISH, 1990; JABLONSKY e LAGEY, 2004; GIGLIOTTI et al., 2010; SOARES et al., 2011).

A influência das condições ambientais na dinâmica das populações de peixes marinhos vem sendo amplamente discutida, principalmente no que tange aos mecanismos de dispersão do ictioplâncton (FOGARTY, 1993; MYERS et al.,

1999; BROCHIER et al., 2008a, b; GIGLIOTTI et al., 2010; BROCHIER et al., 2011). A teoria clássica afirma que a abundância dos ovos e larvas e sua sobrevivência até atingirem a fase de recrutamento influenciam diretamente no número de indivíduos adultos. As principais causas de falhas no recrutamento são a falta ou ausência de alimento nos períodos críticos do desenvolvimento larval ou o transporte de ovos e larvas para locais inapropriados à sobrevivência (CURY et al., 2008).

Portanto, as condições de desenvolvimento do ictioplâncton são fundamentais para a manutenção do estoque parental e a sua distribuição e abundância são influenciadas por processos oceanográficos e atmosféricos em diferentes escalas espaciais e temporais. Com isso, vários estudos procuram investigar essa relação através de modelos físicos ou físico-biológicos, para diversas regiões e espécies marinhas, como na costa Pacífica do Japão, para *Sardinops melanosticus* (SUDA et al., 2005); na costa da África, para as espécies *Sardina pilchardus*, *Sardinops sagax* e *Engraulius encrasicolus* (BROCHIER et al., 2011; HUGGET et al., 2003; VAN DER LINGEN, 2004); na plataforma continental sul do Chile, para as espécies *Pleuroncodes monodon* e *Eungraulius ringens* (PARADA et al., 2012; SOTO-MENDOZA et al., 2012; YANNICELI et al., 2012); no nordeste do Brasil, para as lagostas da família *Palinuridae* (RURDORFF et al., 2009) e na Plataforma Continental Sudoeste do Atlântico, para a *Engraulis anchoita* (VAZ et al., 2007).

Os modelos baseados em indivíduos (Individual Based Models – IBMs) são importantes modelos físico-biológicos que permitem testar hipóteses ecológicas que incorporem as variáveis biológicas e o ambiente físico de maneira mais realista. Esses modelos levam em consideração as características de cada indivíduo para prever sua trajetória e as condições físico-químicas do meio em que este se desloca. Para se ter uma segurança nos resultados gerados pelos IBMs, estes têm que ser baseados em modelos hidrodinâmicos confiáveis e em escalas que permitam que os processos biológicos relevantes sejam representados (MILLER, 2007). Para tal, uma boa alternativa é a utilização de

modelos numéricos regionais, que permitem simular fenômenos de mesoescala, ou seja, aqueles que possuem escalas de tempo maiores que um dia e escalas espaciais de algumas centenas de quilômetros.

No contexto da sardinha-verdadeira, alguns trabalhos procuraram estabelecer relações entre os eventos oceânicos e atmosféricos da região e a variabilidade interanual nas capturas de sardinha (CERGOLE et al., 2002; JABLONSKI e LEGEY, 2004; PAES e MORAES, 2007; SOARES et al., 2011). Recentemente, a estrutura espacial da desova da sardinha-verdadeira e sua relação com o meio físico foi descrita por Moraes et al. (2012), e um mapa estabelecendo áreas com maior probabilidade de ocorrência de desova foi proposto por GIGLIOTTI et al. (2010). Os resultados mostram que, ao longo dos anos, as áreas de desova podem expandir ou contrair e essa expansão ou contração está relacionada à variabilidade interanual das anomalias de TSM na PCSE.

Nesse trabalho, foram realizados experimentos em um IBM em conjunto com um modelo hidrodinâmico regional para simular o processo de desova e o impacto da circulação oceânica na dispersão dos ovos e das larvas da sardinha-verdadeira. Estes experimentos permitem a identificação de *habitats* mais efetivos de desova para a sardinha-verdadeira e a relação entre os processos físicos atuantes sobre a PCSE e a sobrevivência das larvas até alcançarem a fase juvenil. Este trabalho deve contribuir para um maior entendimento dos processos de desova da sardinha-verdadeira, o que pode auxiliar no planejamento de futuros cruzeiros de pesquisa e possibilitar a identificação de processos que levam a um aumento ou diminuição do estoque. Com isso, pode haver uma melhoria no planejamento pesqueiro dessa espécie, visando à exploração sustentável.

### **1.1. Hipótese**

A hipótese central desse trabalho é a de que o confinamento da sardinha-verdadeira na PCSE é resultado, principalmente, do padrão de circulação

superficial no período de desova, que manteria as larvas retidas próximo à costa.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo geral**

O objetivo principal deste trabalho é determinar como as características físicas das águas sobre a PCSE influenciam o padrão espacial de desova da sardinha-verdadeira e na sobrevivência das larvas até alcançarem a fase juvenil.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Verificar os padrões oceanográficos atuantes sobre a PCSE para o período de 1980 – 1993;
- Analisar a distribuição espacial das larvas obtida pelo IBM para o período de 1980 – 1993 e comparar aquela obtida dos dados coletados em cruzeiros de pesquisa;
- Testar a relevância das áreas conhecidas como de maior probabilidade de desova para a sobrevivência final das larvas contra um cenário de desova da sardinha-verdadeira cujos ovos foram lançados aleatoriamente ao longo da PCSE;
- Determinar o efeito da variabilidade interanual atmosférica e oceânica na sobrevivência das larvas e relacionar esta aos processos físicos e às características termodinâmicas atuantes sobre a PCSE.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Plataforma Continental Sudeste do Brasil

A Plataforma Continental Sudeste (PCSE) é a região da plataforma continental atlântica que se estende, ao longo da costa brasileira, desde Cabo Frio (23°S), no Rio de Janeiro, até o Cabo de Santa Marta (29°S), em Santa Catarina (Figura 2.1). Possui um comprimento aproximado de 1100 km e uma topografia suave, com as isóbatas dispostas paralelamente à linha de costa. Sua profundidade média é de 70 m e a profundidade de quebra de plataforma varia de 120 a 180 m. A largura da PCSE é bastante variável, sendo que a parte mais larga, com 230 km, localiza-se na porção central (Santos) e em seus extremos estão as partes mais estreitas, com 50 km nas proximidades de Cabo Frio, e 70 km próximo ao Cabo de Santa Marta (CASTRO et al., 2006).

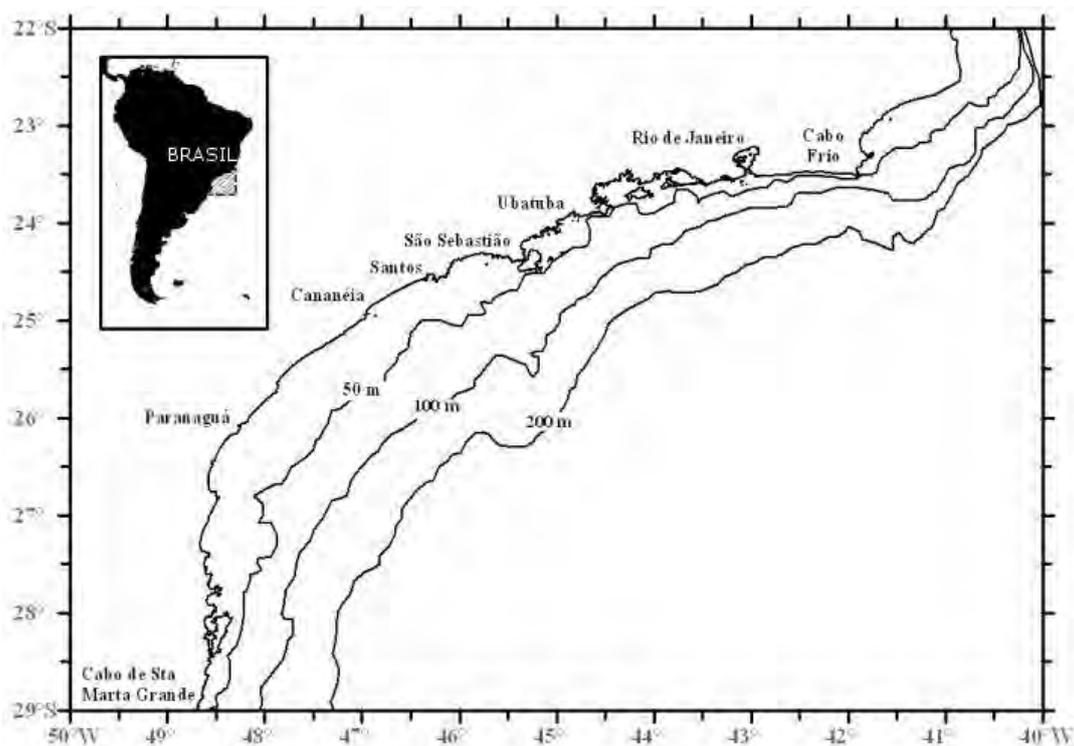


Figura 2.1 – Plataforma Continental Sudeste do Brasil e as isóbatas associadas.  
Fonte: Gigliotti (2009)

### **2.1.1. Massas de água**

As águas presentes sobre a PCSE em geral são uma mistura da Água Tropical (AT), Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e a Água Costeira (AC) (CAMPOS et al., 2000). Pode-se citar ainda a Água Intermediária Antártica (AIA) e a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), que são mais profundas e não encontram-se sobre a PCSE.

A AC é resultante da mistura da descarga continental da água fluvial com águas de plataforma continental. Possui a menor salinidade ( $S < 34$ ) entre as massas de água presentes sobre a PCSE, devido ao efeito combinado da descarga dos rios existentes na região (SILVEIRA et al., 2000).

A AT ocupa a superfície do Atlântico Sul tropical e é formada devido à intensa radiação solar e pelo excesso de evaporação em relação à precipitação, fazendo com que a massa de água seja quente e salina ( $T > 20^{\circ}\text{C}$ ;  $S > 36,40$ ; MIRANDA, 1982). É transportada para o sul pela CB na camada superficial (0 – 200 m), sobre o talude continental, próximo à quebra de plataforma (EMÍLSON, 1961 apud CASTRO et al., 2006).

A ACAS é uma massa de água relativamente fria e menos salina que a AT ( $T < 20^{\circ}\text{C}$ ;  $S < 36,40$ ; MIRANDA, 1982). Sua formação acontece pelo afundamento das águas na região da Convergência Subtropical ( $33 - 38^{\circ}\text{S}$ ), sendo este o fator responsável por sua alta salinidade (STRAMMA; ENGLAND, 1999). A ACAS é uma massa d'água pertencente ao giro subtropical, pois ela circula com as correntes do Atlântico Sul e de Benguela até atingir a costa da América do Sul pela Corrente Sul Equatorial, sendo então transportada para o sul junto à CB (SILVEIRA et al., 2000).

Apesar do quadro geral descrito, as condições termohalinas podem variar rapidamente devido a processos hidrodinâmicos e de interação oceano-atmosfera. Podem ocorrer perturbações sobre o ciclo hidrológico, como, por exemplo, verões com maiores ou menores índices de pluviosidade. Esse

padrão reflete sobre a salinidade das águas superficiais, principalmente aquelas mais próximas à costa (CASTRO et al., 2006).

Sazonalmente, a variação da radiação solar incidente sobre a superfície do oceano, a diferença entre a evaporação e a precipitação e a variação do vento médio ou do vento mais frequente podem causar mudanças significativas nas características físicas e de mistura das águas sobre a PCSE. Durante o verão, ocorre a penetração da ACAS em direção à costa, enquanto no inverno ela desloca-se para áreas mais externas da plataforma (MIRANDA, 1982; CAMPOS et al., 2000).

Já em escalas de tempo menores (entre dois e quinze dias), podem ocorrer fenômenos como ressurgências e subsidências costeiras. Um exemplo é a ressurgência de Cabo Frio, que ocorre devido à penetração em subsuperfície da ACAS sobre a plataforma. O padrão de vento da região (NE) faz com que ocorra um transporte *offshore* das águas superficiais e, conseqüentemente, as águas mais frias da ACAS podem atingir a superfície.

### **2.1.2. Dinâmica atmosférica e oceânica sobre a PCSE**

A dinâmica sobre a PCSE é consequência da resposta das águas a diferentes mecanismos forçantes, atmosféricos e oceânicos, e que ocorrem em diversas escalas temporais e espaciais. Porém os ventos e a Corrente do Brasil (CB) são determinantes para os mecanismos de transporte de água, organismos e substâncias em grande parte de PCSE (CASTRO et al., 2006).

#### **2.1.2.1. Ventos e forçantes meteorológicas**

As características das correntes superficiais geradas pelo vento dependem de uma combinação da largura e da topografia da plataforma e da magnitude, direção e persistência da tensão de cisalhamento do vento (CASTRO; MIRANDA, 1998).

Há três principais sistemas meteorológicos que condicionam o padrão de ventos sobre a PCSE: a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que é parte do giro subtropical anticiclônico presente no Atlântico Sul (AS) em latitudes médias; os Sistemas Frontais (SF), que são sistemas ciclônicos, de baixa pressão e caracterizam-se como a perturbação meteorológica em escala sinótica mais importante atuante sobre a região; e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), uma banda de nebulosidade com orientação NW-SE, que se estende da região Amazônica até a região sudeste do Brasil;

A ASAS apresenta oscilações sazonais em sua posição e profundidade, o que afeta diretamente a intensidade e a direção da tensão de cisalhamento do vento sobre a PCSE. Nos meses de verão, há uma predominância de ventos de E-NE para a região costeira entre as latitudes 15°S e 35°S. Já nos meses de inverno, o vento de padrão NE fica confinado entre as latitudes 20°S e 25°S, sendo a plataforma localizada ao Sul forçada por ventos predominantes oriundos de W-SW (CASTRO; MIRANDA, 1998).

Esse padrão de vento pode ser modificado pela passagem dos SF (frentes frias). A aproximação da frente faz com que inicialmente o vento gire de NE para NW no sentido anti-horário. Logo após a passagem da frente fria, o vento passa a vir de SW, com velocidade média de 8 m/s; nas 24 horas seguintes, o vento roda gradativamente de SW para NE novamente, no sentido anti-horário. O tempo médio de propagação de uma frente fria sobre a PCSE é de dois dias, o que confere à frente uma velocidade de 500 km/dia. Esse quadro repete-se em média de 3 a 6 vezes por mês, com um intervalo de cinco a dez dias (STECH; LORENZZETTI, 1992).

A ZCAS é responsável por causar intensa precipitação na região em que atua (incluindo a PCSE), sendo mais intensa durante o verão (KODAMA, 1992). Além disso, há uma retroalimentação negativa entre essa banda de nebulosidade e os campos de temperatura da superfície do mar (TSM) sobre o Atlântico Sul, sendo que os campos de anomalias de TSM negativas

frequentemente observados abaixo da ZCAS representam uma resposta oceânica às forçantes atmosféricas (CHAVES; NOBRE, 2004; DE ALMEIDA et al. 2007).

### 2.1.2.2. Corrente do Brasil

A Corrente do Brasil (CB) é uma corrente de contorno oeste associada ao giro subtropical do Atlântico Sul. Origina-se na bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE), em torno de 10°S, fluindo para o sul, bordejando o continente sul-americano até a região da Convergência Subtropical, onde conflui com a Corrente das Malvinas (CM) (Figura 2.2) (SILVEIRA et al., 2000). Ela constitui-se na feição oceânica mais importante da borda oeste do oceano Atlântico Sul (CASTRO et al. 2006).

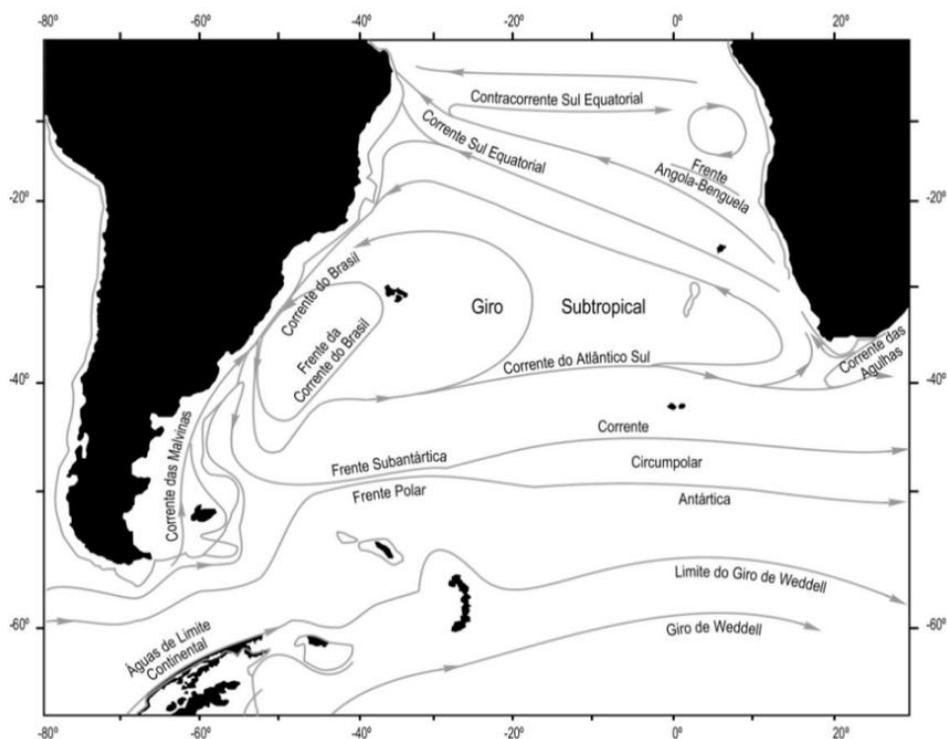


Figura 2.2 – Representação esquemática do giro subtropical do Atlântico Sul. Fonte: Adaptado de Peterson e Stramma (1991).

As velocidades de transporte da CB foram quase que em sua totalidade estimada por meio de cálculos geostroficos. Observa-se que há um

crescimento na intensidade da CB em direção ao sul (SILVEIRA et al., 2000). Na região de Cabo Frio, Signorini (1978) estimou um transporte relativo de 9,4 Sv, com um pico de velocidade geostrófica de superfície na ordem de  $0,55 \text{ m s}^{-1}$ , sendo que aproximadamente 50% do transporte está concentrado em profundidades inferiores a 200 m. Observações com o perfilador PEGASUS para a região de Cabo Frio revelaram valores de velocidade de transporte da ordem de 6 Sv para o fluxo acima da AIA. Aos 400 m de profundidade ocorre uma inversão do fluxo para nordeste, devido à presença da AIA (EVANS & SIGNORINI, 1985). Campos et al. (1995) utilizaram dados hidrográficos com alta resolução horizontal e estimaram o transporte da CB em 7,5 Sv e indicaram ainda que a CB, na Bacia de Santos, estende-se em média até 750 m, limite entre a ACAS e a AIA.

A profundidade da CB e seu transporte aumentam conforme esta vai fluindo em direção ao sul. Esse fato foi confirmado por dados de correntômetros de alguns fundeios, analisados por Müller et al. (1998). Ao largo de Cabo Frio, a profundidade da CB é aproximadamente 200m e sua velocidade média é da ordem de  $0,15 \text{ m s}^{-1}$ . Já nas proximidades do Cabo de Santa Marta, sua profundidade ultrapassa os 670 m, a velocidade média é da ordem de  $0,5 \text{ m s}^{-1}$  e o transporte é de cerca de 16 Sv. Assireu et al. (2003) confirmou o crescimento da intensidade da CB em direção ao sul, por meio da análise de derivadores lagrangeanos acompanhados por satélites. O autor encontrou um aumento para a corrente do Brasil de  $0,06 \text{ m s}^{-1}$  ao longo do Cabo de São Tomé (RJ), até  $0,22 \text{ m s}^{-1}$  ao largo da costa sul do RS.

Associados à CB há a presença de diversos meandros e vórtices ao longo de toda a extensão da PCSE (ASSIREU et al., 2003; SOUZA; ROBINSON, 2004). De acordo com Silveira et al. (2004) e Silveira et al. (2008), o cisalhamento vertical da CB é favorável ao desenvolvimento de uma instabilidade baroclínica, que forneceria a energia necessária para o aumento do meandramento da CB e a formação de vórtices na região. O cisalhamento horizontal entre a CB e as correntes da plataforma, associado a processos de instabilidade barotrópica,

também podem contribuir para esse aumento do meandramento (CALADO, 2006). Outro fator importante nesse processo foi indicado por Campos et al. (1995), que diz respeito à mudança na orientação da linha de costa (de NE-SW para E-W, imediatamente ao Sul de Cabo Frio) e ao gradiente de topografia de fundo (plataforma estreita e abrupta em Cabo Frio e mais larga e suave na Bacia de Santos). Isso faz com que a CB sofra uma deflexão para oeste, como consequência da conservação da vorticidade potencial e passe a compor um sistema baroclinicamente instável, apresentando uma intensa atividade de fenômenos de mesoescala, como meandros instáveis e vórtices. Já os vórtices formados mais ao Sul, na Bacia de Santos, ocorrem em pares, tanto ciclônicos quanto anticiclônicos, em lados opostos ao eixo da corrente, sendo menores em tamanho do que aqueles de Cabo Frio (CAMPOS et al., 1995).

Os vórtices e meandros ciclônicos associados à CB apresentam caráter divergente nas camadas superficiais, permitindo o bombeamento da ACAS do talude continental em direção à plataforma (CASTRO et al., 1987; CAMPOS et al., 1995). Através da análise de dados hidrográficos e de resultados de modelagem numérica, Campos et al. (2000) que a ocorrência da ressurgência costeira em Cabo Frio pode estar associada a esses meandramentos ciclônicos da CB. Calado et al. (2010), utilizando resultados de modelos numéricos sem a forçante do vento, confirmaram que esse meandros podem aumentar a intensidade dessa ressurgência.

Ao sul da PCSE, há uma corrente costeira que flui na direção oposta à CB, chamada de Corrente Costeira do Brasil (CCB). Ela é responsável pelo transporte de águas frias em regiões próximas à costa até as proximidades da latitude de 25°S, sendo este um fenômeno regular da PCSE, ocorrendo no período de inverno na maior parte dos anos (SOUZA; ROBINSON, 2004).

### **2.1.3. Frentes e regiões da PCSE**

As frentes são regiões onde a salinidade, a magnitude e cisalhamento da corrente, a convergência e divergência, a produtividade primária e acúmulo de alimento apresentam grandes variações (PODESTÁ, 1993). Na PCSE, duas frentes bem características podem ser encontradas e estas são responsáveis por dividir a PCSE em três regiões, de acordo com Castro e Miranda (1998): a frente térmica profunda (FTP), que separa a plataforma continental interna (PCI) da média (PCM); e a frente halina superficial (FHS), que separa a PCM da plataforma continental externa (PCE).

A FTP está associada ao avanço da CB em direção à costa e pode ser entendida como a interseção da termoclina com o fundo oceânico, sendo responsável por separar na camada de fundo as águas mais frias de origem oceânica (ACAS) das águas de origem costeira, quentes e características da região interna da plataforma (AC). A posição e intensidade da FTP varia sazonalmente: durante o verão a FTP apresenta-se mais pronunciada, havendo um decréscimo de até 10°C ao longo dela. Além disso, posiciona-se mais próxima à costa (10 – 30 km, com seu limite atingindo as isóbatas de 20 m e 40 m) enquanto no inverno seu posicionamento dá-se mais para fora da costa (40 – 80 km, entre as isóbatas de 50 m e 70 m). Conseqüentemente, a PCI acompanha essa variação sazonal em sua largura, uma vez que se localiza entre a costa e a FTP. Ainda, ela é ocupada principalmente pela AC e apresenta como sua principal característica a homogeneidade tridimensional em suas propriedades físicas, devido aos processos de mistura causados pela tensão de cisalhamento do vento e marés.

Entre a FTP e a FHS localiza-se a PCM, que é mais definida no verão, estendendo-se desde 10 – 80 km da costa, entre as isóbatas de 20 m e 90 m. Durante essa estação, há uma estratificação vertical bem definida, devido à presença de termoclina sazonal. No inverno a individualização dessa região torna-se bem difícil, pois a PCM passa a ocupar uma faixa bem pequena, às

vezes até mesmo inexistente. Já a PCE separa-se da PCM pela FHS, localizada a distâncias entre 80 e 120 km da costa, apresentando estratificação vertical acentuada e pouca variabilidade sazonal. Essa frente separa em superfície as águas mais salinas da AT das águas menos salinas da plataforma interna, influenciadas pelas AC.

Mais recentemente estudos têm identificado uma Frente Térmica Superficial (FTS) nas proximidades do Cabo de São Tomé e de Cabo Frio (SILVEIRA et al., 2008; LORENZETTI, 2009). Essa é uma zona frontal característica de correntes de contorno oeste, como a CB, que separa a Água Tropical (maior temperatura e salinidade) da Água Costeira, mais fria e menos salina. Sua localização dá-se mais comumente perto da quebra de plataforma, entre as isóbatas de 200 e 1000 m. Porém, entre as latitudes 20°S e 23°S ela tende a se posicionar sobre a plataforma. Próximo à latitude de 24°S, ela se aproxima novamente da quebra de plataforma, devido ao mecanismo de conservação de vorticidade potencial. Com relação à variação sazonal, a frente encontra-se mais próxima à costa no verão, enquanto no inverno ela afasta-se mais para a região oceânica (LORENZZETTI et al., 2009).

#### **2.1.4. Circulação e ressurgência**

A circulação da PCSE é resultado da interação entre marés de baixa amplitude, ventos de nordeste e o fluxo da CB ao logo da quebra de plataforma em direção ao sul e apresenta variações sazonais marcantes (MATANO et al., 2010). A PCI é mais influenciada pelas forçantes locais, em especial o vento, enquanto que a circulação da PCM e da PCE é conduzida por forçantes remotas, principalmente a CB (PALMA; MATANO, 2009).

A estrutura de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre a PCSE e sua variação sazonal estão associadas às mudanças no padrão de circulação. Os gradientes de TSM ao longo da quebra de plataforma são consequência da influência da CB na circulação superficial mais externa da plataforma, que é dominada por um intenso fluxo para o sul ao longo do talude e um fluxo de

baixa intensidade entre a costa e a isóbata dos 100 m (CAMPOS et al., 2000; CASTELÃO et al., 2004; PALMA; MATANO, 2009). Porém, a maior influência da CB sobre a circulação de plataforma está relacionada à circulação em profundidade, com a intrusão da ACAS sobre as águas de plataforma durante o período de verão. Essa intrusão é modulada pela variabilidade sazonal no padrão de ventos, que podem estabelecer uma situação de ressurgência na região costeira de Cabo Frio (23°S). Essa ressurgência é induzida por divergência unilateral do campo de velocidade gerado pela tensão de cisalhamento do vento. Ventos de nordeste geram transporte de volume na camada de Ekman superficial em direção ao oceano. A continuidade do movimento divergente na camada superficial é estabelecida por transporte de ajuste em direção à costa. Abaixo da camada de Ekman, esse transporte propicia a penetração da ACAS em direção à costa. Dependendo da intensidade e da persistência dos ventos, as águas subsuperficiais podem aflorar, fechando o ciclo do processo de ressurgência (CASTRO et al., 2006).

Além do padrão de ventos, experimentos numéricos demonstram que outros fatores são responsáveis pela modulação e intensificação da ressurgência na região, como a topografia de fundo e a geometria da costa (RODRIGUES; LORENZETTI, 2001) e os meandros ciclônicos associados à CB (CALADO et al., 2010). A topografia do fundo possui uma fraca influência na modulação da ressurgência, enquanto a geometria da costa desempenha um papel fundamental na determinação da magnitude desta (RODRIGUES; LORENZETTI, 2001). A formação de meandros ciclônicos nas proximidades do Cabo de São Tomé, associados à CB, é também responsável pela intensificação da ressurgência costeira (CALADO et al., 2010).

## **2.2. Sardinha-verdadeira**

A sardinha-verdadeira, *Sardinella brasiliensis* (Figura 2.3), é uma espécie de peixe pertencente à família Clupeidae, que inclui os representantes mais importantes para a pesca, como espécies do gênero *Sardina*, na Europa,

*Sardinops*, nos oceanos Pacífico e Índico e *Sardinella*, nos mares tropicais e subtropicais (CERGOLE; NETO, 2011). Pela similaridade desses gêneros, as espécies são consideradas genericamente como sardinhas. Essa família inclui peixes pelágicos de pequeno porte, de corpo lateralmente comprimido, que formam cardumes e habitam águas costeiras (KATSURAGAWA et al., 2006).



Figura 2.3 – *Sardinella brasiliensis*.  
Fonte: Fishbase (2012).

A sardinha-verdadeira está geograficamente isolada dos demais grupos do gênero *Sardinella* no Oceano Atlântico. Sua ocorrência restringe-se à PCSE, limitada pelo Cabo Frio, no Rio de Janeiro (23°S) e pelo Cabo de Santa Marta (29°S), em Santa Catarina (FIGUEIREDO; MENEZES, 1978). A espécie é encontrada em profundidades inferiores a 100 m, embora existam relatos de cardumes próximos à quebra da plataforma, entre 100 m e 200 m de profundidade (CERGOLE; VALENTINI, 1994; SACCARDO; ROSSI-WONGTCHOWSKI, 1991). Entretanto, as capturas ficam restritas a profundidades entre 30 e 50 m (CERGOLE et al., 2005).

Devido à grande importância que a sardinha-verdadeira representa para a pesca da região Sudeste, diversos estudos têm sido realizados para tentar entender o comportamento dessa espécie durante seu ciclo de vida e a influência de fatores oceânicos e atmosféricos. Matsuura (1977a) foi o primeiro a descrever o ciclo de vida dessa espécie, além de reunir informações sobre as condições hidrográficas de sua ocorrência, a dinâmica da população e da biologia da espécie. Posteriormente diversos trabalhos foram realizados com o

intuito de reunir informações sobre a dinâmica da população dessa espécie, resultando em estudos sobre a estrutura, o comportamento e o ciclo de vida (CERGOLE, 1993; JABLONSKI; LEGEY, 2004; KURTZ, 1999; MATSUURA, 1983).

A desova pode acontecer ao longo de todo o ano, porém observa-se maior intensidade reprodutiva no fim da primavera e no verão, principalmente nos meses de dezembro e janeiro (SACCARDO; ROSSI-WONGTSCHOWSKI, 1991). A desova é do tipo parcelada, onde a fêmea libera em média entre 20 e 50 mil ovócitos a cada 11 dias (MATSUURA, 1983; SACCARDO; ROSSI-WONGTSCHOWSKI, 1991). O pico da desova é noturno, por volta de 01h00, e ocorre na camada de mistura superficial, sendo este um comportamento comum na família Clupeidae, como uma estratégia de sobrevivência para proteger os ovócitos de predadores diurnos (MATSUURA, 1998).

A fase planctônica do ciclo de vida da sardinha abrange os ovos e as larvas. A eclosão dos ovos acontece aproximadamente 19 horas após a fecundação, se considerada uma temperatura de 24°C (MATSUURA, 1998).

O crescimento larval é rápido, com esse estágio durando aproximadamente 45 dias (YONEDA, 1987). Nesse período ocorre a metamorfose da larva, havendo o desenvolvimento do aparato mandibular e dos sistemas sensorial e locomotor. Além disso, ocorrem mudanças ontogenéticas na dieta, devido ao aumento na capacidade de deslocamento e na seletividade das presas (TURIGAN et al., 2005). O processo de desenvolvimento da fase larval pode ser dividido em três estágios principais, associados à flexão da notocorda: (1) pré-flexão, onde os indivíduos apresentam comprimentos entre 3 e 6,9 mm; (2) flexão, com comprimentos entre 7 e 10,9 mm; e (3) pós-flexão, onde os comprimentos vão de 11 até 16 mm (KURTZ; MATSUURA, 2001).

O ciclo de vida da sardinha-verdadeira é curto, com uma longevidade que não ultrapassa quatro anos (CERGOLE; VALENTINI, 1994). Porém, estimativas revelam que o conjunto dos indivíduos de um e dois anos pode chegar a 96%

na composição etária da população (CERGOLLE, 1993). Os indivíduos são considerados juvenis quando atingem um tamanho de 40 mm, quando já começa a formar cardumes e deslocar-se para áreas mais propícias para a alimentação e proteção contra predadores (YONEDA, 1987). A passagem para a vida adulta, chamada recrutamento biológico, ocorre entre os meses de junho e agosto, com maior intensidade em julho (CERGOLLE, 1994). A fase adulta é caracterizada quando os indivíduos atingem a primeira maturação gonadal. Para a sardinha-verdadeira, esta é alcançada com a idade de um ano, quando os indivíduos apresentam comprimentos entre 160 e 170 mm (MATSUURA, 1983; SACCARDO; ROSSI-WONGTSCHOWSKI, 1991).

Em relação às áreas de desova, Matsuura (1998) analisou dados de distribuição horizontal de ovos coletados a partir de nove cruzeiros oceanográficos sobre a PCSE, realizados entre os anos de 1976 e 1993, sempre entre dezembro e janeiro. O autor observou que as áreas de desova apresentaram variação interanual em sua localização, porém a maior abundância de ovos estava situada entre a Baía de Paranaguá (25°S) e a Ilha de Florianópolis (28°S).

Castello (2006) compilou dados de diversos trabalhos realizados por Matsuura (1971; 1975 a, b; 1977 a, b; 1979; 1983; 1998), verificando a distribuição da sardinha-verdadeira e seus principais locais de desova. Com base nestas informações, Gigliotti et al. (2010) definiram o habitat de desova da espécie através do mapeamento das probabilidades de ocorrência de ovos a partir de modelos espaciais, conforme ilustrado na Figura 2.4. Há duas localidades onde ocorre maior probabilidade de desova, uma localizada a nordeste do Cabo de Santa Marta, entre as isóbatas de 100 e 200 m e outra próxima à costa, nos arredores da Baía de Paranaguá. Ainda, as maiores probabilidades localizaram-se na parte interna da PCSE, em profundidades de 16 a 60 m.

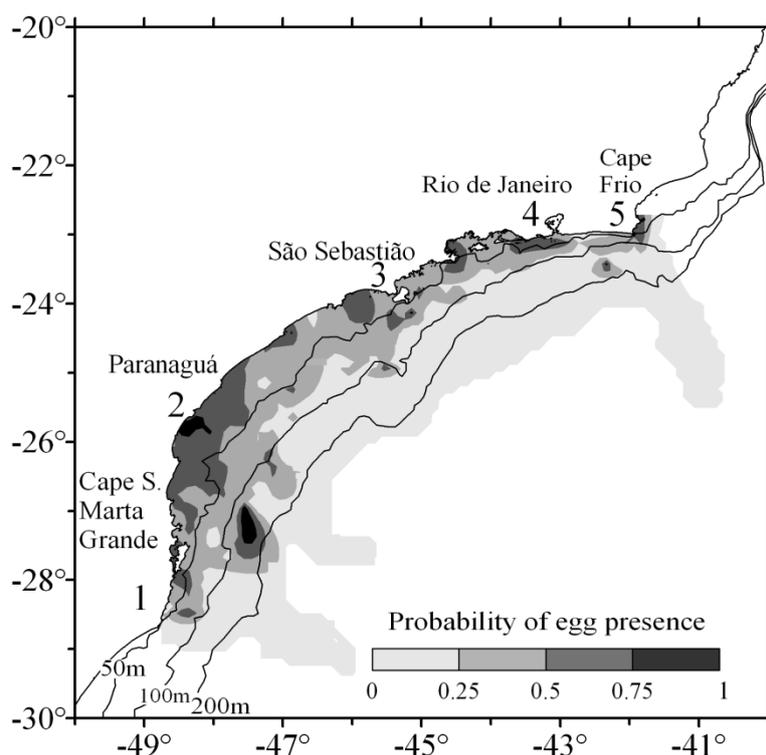


Figura 2.4 – definição do habitat de desova da sardinha-verdadeira com base em modelos espaciais de krigagem indicativa.

Fonte: Gigliotti et al. (2010).

O habitat reprodutivo dos peixes pelágicos é estruturado a partir de processos que favorecem a concentração de nutrientes, e a retenção dos ovos e larvas (BAKUN, 1998). Processos físicos como frentes e convergências, além da estabilidade da coluna d'água, influenciam na concentração dos nutrientes, dos ovos e das larvas. A retenção dos ovos e larvas é dependente da circulação local, podendo contribuir para que não haja dispersão para locais menos propícios ao seu desenvolvimento. No caso da sardinha-verdadeira, seu habitat de desova pode se expandir ou se contrair interanualmente, de acordo com as anomalias de TSM (ATSM). Valores positivos de ATSM estão relacionados a períodos de contração do habitat, enquanto que em períodos de expansão as ATSM são nulas ou um pouco negativas (GIGLIOTTI et al., 2010). Além disso, fatores como a intensidade dos ventos, a TSM, a turbulência da camada de mistura e o tamanho do estoque desovante podem ser cruciais para o desenvolvimento larval e, conseqüentemente para o recrutamento dessa

espécie. Um intervalo de intensidade do vento entre 3 e 4,5 m s<sup>-1</sup>, que propicia condições favoráveis à intensificação dos processos de enriquecimento de nutrientes e mistura da coluna d'água, valores de TSM entre 24 e 26°C e um gradiente vertical de temperatura da água que indique uma estabilidade da coluna d'água são indicados como uma janela ótima para o desenvolvimento larval (JABLONSKY LAGEY, 2004). As capturas da sardinha-verdadeira e sua relação com as características oceânicas e atmosféricas foi feita por Soares et al. (2011). Nos anos que antecedem períodos de máxima captura, as ATSM encontradas foram negativas e podem estar associadas a um aumento na cobertura de nuvens e diminuição da radiação de onda curta incidente. Portanto, a estrutura espacial das áreas de desova e a variabilidade interanual da pesca da sardinha-verdadeira são influenciadas por interações específicas entre o oceano e a atmosfera, além da escolha de um ambiente estável.

### **2.3. Modelagem biofísica**

A sobrevivência do ictioplâncton é diretamente afetada por processos advectivos, responsáveis pelo transporte dos ovos e larvas, bem como pelas condições ambientais (LETT et al., 2008). Diversos modelos biofísicos têm sido desenvolvidos para entender melhor o funcionamento da dinâmica do ictioplâncton. Esses modelos estão cada vez mais se tornando uma ferramenta completa no entendimento dos processos que afetam a variabilidade interanual das populações marinhas (WERNER et al., 1997).

Inicialmente, os esforços realizados para entender as interações físico-biológicas foram apenas descritivos, pois havia poucos dados disponíveis para realizar testes diretos das hipóteses que envolviam essas interações (MYERS, 1995). O desenvolvimento do conhecimento nas áreas de oceanografia física e ecologia permitiu a formulação de hipóteses testáveis sobre a relação entre processos físicos do oceano e o recrutamento. O mais notável avanço foi o entendimento de que a incorporação da variabilidade individual nos modelos de recrutamento é essencial, uma vez que as larvas sobreviventes não são

apenas um subconjunto aleatório da prole (GRIMM; RAILSBACK, 2005). Por isso, em modelos que procuram investigar o recrutamento, é importante a inserção de outros parâmetros além da mortalidade, como as influências parentais (BROWMAN et al., 2006), as características da desova (RICE et al., 1993; THORROLD et al., 2001), o crescimento (MEEKAN; FORTIER, 1996) e fontes de mortalidade seletiva (GALLEGO et al., 2012).

Esses avanços permitiram o desenvolvimento de modelos baseados em indivíduos (individual based models – IBMs). O primeiro IBM data da década de 1980, seguido por diversos outros que foram rapidamente desenvolvidos. Inicialmente, os modelos eram numericamente estáveis e altamente parametrizados e podiam reproduzir apenas padrões de distribuição e algumas características das fases iniciais do ciclo de vida dos peixes. Com o avanço tecnológico, a resolução espacial desses modelos tem aumentado e mais detalhes biológicos têm sido incluídos (MILLER, 2007).

Os IBMs têm sido utilizados no desenvolvimento de diversos estudos de ecologia de peixes, como por exemplo, na identificação de potenciais locais de desova (SOTO-MENDOZA et al., 2012), na quantificação de padrões de retenção nos locais de desova (BRICKMAN et al., 2001; STENEVIK et al., 2003), na investigação da importância do comprimento e do crescimento na mortalidade (THANASSEKOS et al., 2012), nas mudanças da flutuabilidade dos ovos (ALVAREZ et al., 2011) e no transporte dos ovos e larvas (ALLAIN et al., 2001; BROCHIER et al., 2008b, 2011; BROWN et al., 2004). Há um esforço corrente para estruturar a comunidade que utiliza esses modelos. Um exemplo de uma ferramenta desenvolvida para auxiliar a comunidade é o *Ichthyop*, um IBM com uma interface simples que foi desenvolvido para estudar os efeitos dos fatores físicos e biológicos sobre a dinâmica dos ovos e larvas de peixes (LETT et al., 2008).

Um ponto importante a ser destacado com relação aos IBM é a confiança nos modelos hidrodinâmicos. É de extrema importância que esses modelos

resolvam os processos físicos em escalas que permitam que os processos físico-biológicos sejam expressos, uma vez que os processos biológicos normalmente ocorrem em escalas menores que os físicos (MILLER, 2007). Assim, os modelos numéricos regionais são importantes para a melhoria da acurácia dos IBM, pois aqueles podem simular processos físicos de mesoescala relevantes aos primeiros estágios de vida de espécies marinhas, particularmente pequenos pelágicos.

Um exemplo de modelo regional é o *Regional Ocean Modelling System* (ROMS), que tem sido utilizado para estudar fenômenos oceânicos de mesoescala (e. g. HAIDVOGEL et al., 2000; LUTJEHARMS et al., 2003; PENVEN et al., 2001; SHE; KLINCK, 2000; SILVA et al., 2009) e suas relações com processos biológicos, por meio de IBMs (e. g. BROCHIER et al., 2008a, b, 2011; PARADA et al., 2012; SOTO-MENDONZA et al., 2012; YANNICELLI et al., 2012). O ROMS foi previamente adaptado a diferentes regiões oceânicas e comparações realizadas com dados observacionais constataram que o modelo é capaz de resolver os processos de mesoescala de forma bem acurada, incluindo frentes, meandramentos e ressurgências (AZCÁRATE et al., 2007; IVANOV et al., 2009; SILVA et al., 2009).

#### **2.4. Estimativas de TSM por sensoriamento remoto**

As estimativas de TSM por meio de sensoriamento remoto podem ser feitas com a utilização de radiômetros infravermelhos. Estes são instrumentos que medem a radiação infravermelha emitida ou refletida pela superfície da Terra na direção do sensor. A radiação que é emitida pela Terra concentra-se principalmente no comprimento de onda de 10  $\mu\text{m}$  (infravermelho termal), devido à sua temperatura média, que é da ordem de 300 K. As estimativas de TSM são feitas tendo como base a Lei de Planck, que traz a equação da emissão termal (equação 2.1), sendo a relação entre a emitância espectral radiante ( $M_\lambda$ ) e a temperatura (T) de um corpo negro (emissor perfeito, ou seja, emite igual intensidade independente da direção).

$$M_{\lambda} = L_{\lambda}\pi = \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{C_2/\lambda T} - 1]} \quad (2.1)$$

Sendo:

$M_{\lambda}$ : emitância espectral ( $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$ );

$L_{\lambda}$ : radiância espectral ( $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$ );

$\lambda$ : comprimento de onda ( $\mu m$ );

T: temperatura absoluta (K);

$C_1$ :  $3,74151 \times 10^8 W.m^{-2}.\mu m^{-4}$ ;

$C_2$ :  $1,43879 \times 10^4 \mu m.K$ ;

A superfície do mar pode ser considerada um corpo negro, pois sua emissividade é de aproximadamente 0,98 e varia muito pouco com o comprimento de onda, com a temperatura e com a rugosidade do mar. Por isso, para se estimar a TSM, uma vez que a radiância espectral foi medida por um radiômetro infravermelho, inverte-se a equação 2.1, deixando a temperatura em função da radiância espectral (equação 2.2). Esta é a chamada temperatura de brilho e é a base dos algoritmos para determinação da TSM via satélites (SOUZA et al., 2005).

$$T = \frac{C_2}{\lambda \ln \left( \frac{C_1}{\pi \lambda^5 L_{\lambda}} + 1 \right)} \quad (2.2)$$

A radiação que é detectada pelo sensor é modificada em seu caminho entre a superfície do mar e o satélite, pela presença dos constituintes atmosféricos que absorvem e espalham parte da radiação que chegaria na direção do sensor, reemitindo-a em comprimentos de onda mais longos (ROBINSON, 2004). Por isso é necessário utilizar algoritmos de correção atmosférica, para diminuir ou remover o efeito atmosférico sobre seus dados de temperatura de brilho. O algoritmo empregado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) na correção dos efeitos dos constituintes atmosféricos da temperatura obtida pelos sensores *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) é o *Non Linear Sea Surface Temperature* (NLSST). Esse algoritmo adota uma estimativa inicial de TSM em que os coeficientes de absorção atmosférica são

calculados para diferentes regimes de vapor d'água, definido pelas diferenças entre as temperaturas de brilho de dois canais do sensor AVHRR, seguindo a equação 2.3 (KILPATRICK et al., 2001):

$$TSM = \alpha_1 + \alpha_2 T_4 + \alpha_3 (T_4 - T_5) T_{sup} + \alpha_4 (\sec\theta - 1) (T_4 - T_5) \quad (2.3)$$

Sendo:

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ : constantes determinadas por um ajuste de mínimos quadrados dos dados de satélite em relação aos dados *in situ* (boias ou navios de oportunidade);

$T_4, T_5$ : temperatura de brilho dos canais 4 e 5 do sensor AVHRR;

$\theta$ : ângulo zenital do satélite;

$T_{sup}$ : temperatura suposta para um campo real de TSM que pode ser obtida através de algum algoritmo ou por combinação com dados

Por fim, a NOAA utiliza um conjunto de dados de boias oceanográficas e de navios de oportunidade para reduzir um viés estatístico presente nos dados de TSM estimados por satélite em relação aos coletados *in situ*. Isso faz com que as estimativas da NOAA de TSM não sejam da chamada “camada de pele” do oceano, de onde efetivamente a radiação emerge na direção do sensor, e sim sejam consistentes com as chamadas “temperaturas de balde”, que são tomadas nos primeiros metros abaixo da superfície pelicular do mar (KILPATRICK et al., 2001).

## 2.5. Estimativa de ASM por sensores altimétricos

O cálculo da ASM por meio de sensores orbitais é feito através da altimetria por satélite. Esta é uma técnica na qual radares altímetros emitem curtos pulsos de radiação eletromagnética na faixa de micro-ondas em direção à superfície do oceano e recebem o sinal refletido. A distância entre o satélite e a superfície do mar é então calculada pela diferença de tempo entre o sinal transmitido e o recebido ( $R_{alt}$ ). Esta medida é então subtraída da altitude do satélite ( $H_{sat}$ ) (que é calculada com base em um elipsoide de referência) e são realizadas algumas correções, obtendo-se então a chamada Altura Dinâmica da Superfície do Mar ( $h_{din}$ ).

As correções realizadas relacionam-se à altura do geoide padrão ( $h_{geoide}$ ), das marés ( $h_{marés}$ ) e da carga atmosférica ( $h_{atm}$ ). O geoide padrão é definido como o formato da superfície do mar na ausência de todas as forçantes externas e movimentos internos do oceano. O conhecimento a respeito deste ainda é bastante escasso e, com exceção de poucas regiões, dá-se apenas em escalas maiores que 500 km (MARTIN, 2004). A altura do geoide é então somada à altura das marés e da carga atmosférica para serem realizadas as correções e, portanto, a obtenção precisa da ASM, de acordo com a equação 2.4:

$$h_{din} = H_{sat} - R_{alt} - (h_{geoide} + h_{marés} + h_{atm}) \quad (2.4)$$

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1. Dados

Os dados utilizados para o desenvolvimento desse trabalho estão divididos em: (1) dados extraídos de satélite, correspondentes à Temperatura da Superfície do Mar (TSM), Altura da Superfície do Mar (ASM) e velocidade de correntes geostróficas; (2) dados de batimetria e linha de costa, utilizados para elaboração da grade do modelo hidrodinâmico; (3) dados de reanálise, correspondentes aos contornos oceânicos e forçantes atmosféricas utilizadas no modelo hidrodinâmico; e (4) dados da distribuição espacial de larvas da sardinha-verdadeira coletados em cruzeiros oceanográficos.

##### 3.1.1. Dados de satélite

Os dados de TSM foram obtidos através dos sensores AVHRR a bordo dos satélites da série NOAA. O AVHRR é um radiômetro imageador de varredura composto por seis canais espectrais, dos quais três estão centrados em comprimentos de onda que abrangem a faixa do infravermelho termal, responsáveis pela estimativa da TSM (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: canais espectrais do sensor AVHRR

Canais espectrais	Comprimentos de onda ( $\mu\text{m}$ )	Faixa espectral
1	0,58 – 0,68	Visível
2	0,72 – 1,00	Infravermelho próximo
3A	1,58 – 1,64	Infravermelho próximo
3B	3,55 – 3,97	Infravermelho termal
4	10,3 – 11,3	Infravermelho termal
5	11,5 – 12,5	Infravermelho termal

Os canais 1 e 2 foram inseridos para a detecção de nuvens e a discriminação entre terra e água e o canal 3A foi introduzido a partir do satélite NOAA-15 com o objetivo de uma melhor detecção da neve e do gelo. Os satélites NOAA

possuem órbita heliosíncrona e quase-polar, numa altitude de cerca de 850 km do solo. Dois satélites operam ao mesmo tempo, com órbitas separadas por aproximadamente 90° em longitude, o que confere ao sistema uma grande resolução temporal. A faixa imageada apresenta uma largura de aproximadamente 3000 km e a resolução espacial dos dados no nadir é de 1,1 km.

Foram adquiridos 312 arquivos no formato HDF correspondentes a médias mensais de TSM que compreendem o período de janeiro de 1982 a dezembro de 2007, em uma grade regular com resolução espacial de 4 km. Esta base de dados é distribuída pelo *Physical Oceanography Distributed Archive Center* (PODAAC), pertencente ao *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) da *National Aeronautics Space Administration* (NASA), através do endereço eletrônico <<http://podaac.jpl.nasa.gov/>>. São disponibilizados dois produtos de medidas de TSM: o denominado *all-pixel-SST*, gerado a partir do algoritmo padrão, utilizando todos os pixels disponíveis, independente da contaminação por nuvens; e o *Best Sea Surface Temperature* (BSST), que é submetido a um processo de interpolação, sendo utilizados apenas pixels com menor contaminação por nuvens. Para esse processo de interpolação espacial, é utilizado o algoritmo *Optimum Interpolation Sea Surface Temperature Version 2* (KILPATRICK et al., 2001). Foi escolhido este último para ser utilizado na comparação com os resultados do modelo.

Os dados de Altura da Superfície do Mar (ASM) e de correntes geostróficas zonais (u) e meridionais (v) foram obtidos através de diferentes missões de altimetria, compilados na base de dados do *Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data* (AVISO), que podem ser acessados pelo site <<http://www-aviso.oceanobs.com/en/data/products/sea-surface-height-products/global>>. Os produtos dessa base de dados são gerados por diferentes missões o que permite conceber uma grade regular de amostragem em escala global, cuja resolução espacial é de 1/3 de grau. Os radares altimétricos utilizados foram o *Topex/Poseidon*, o *European Remote*

*Sensing 2* (ERS-2), o *Jason 1* e o *Envisat*, cujos períodos de operação encontram-se na Tabela 3.2

Tabela 3.2 – altímetros utilizados e seus períodos de operação

<b>Radar altimétrico</b>	<b>Período de operação</b>
Topex/Poseidon	08/1992 até 01/2006
ERS-2	04/1995 até 08/2011
Jason-1	07/2001 até o presente
Envisat	03/2002 até o presente

### 3.1.2. Dados de reanálise

Foram utilizados dados oceânicos e atmosféricos provenientes de reanálises. Os primeiros são produtos do *Simple Ocean Data Assimilation* (SODA) (CARTON; GIESE, 2008) e foram utilizados como condições iniciais do experimento e contornos laterais para as bordas abertas da grade. Já os atmosféricos representam as forçantes atmosféricas do modelo hidrodinâmico e são provenientes do *National Center for Environmental Prediction*, em sua nova versão *Climate Forecast System Reanalysis* (NCEP/CFSR) (SAHA et al., 2010). Esses são produtos de assimilação de dados, que utilizam dados observacionais coletados de diferentes maneiras (dados de satélite, medidas de navios, perfis hidrográficos provenientes de *Conductivity, Temperature and Depth* (CTD), estações, boias oceanográficas e outras) e resultados de modelos.

A base de dados do SODA utilizada neste trabalho é proveniente da versão 2.2.4, disponível em <[http://apdrc.soest.hawaii.edu/dods/public\\_data/SODA](http://apdrc.soest.hawaii.edu/dods/public_data/SODA)>. Esta é uma reanálise global da variabilidade climática oceânica, que inclui um modelo oceânico baseado no *Parallel Ocean Program* (POP) e uma assimilação de dados observacionais provenientes de diversas fontes. As saídas são em médias mensais, disponíveis desde janeiro de 1871 até dezembro de 2008, em uma grade com resolução horizontal uniforme de 0,5°

de latitude e longitude e vertical em 40 níveis de profundidade. Maiores detalhes podem ser encontrados em Carton et al. (2005) and Carton e Giese (2008). As variáveis tridimensionais que são utilizadas nos arquivos oceânicos de condições iniciais e de contorno são: temperatura, salinidade e componentes zonal e meridional da velocidade da velocidade e variáveis bidimensionais: altura do nível do mar e componentes zonal e meridional da velocidade de corrente integrada na vertical.

A reanálise do NCEP utilizada neste trabalho é proveniente da sua versão mais recente (CFSR), com dados de dezembro de 1979 a dezembro de 2009 e disponibilizados em <<http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/>>. Esta versão foi desenvolvida como um modelo acoplado de atmosfera, oceano, superfície e gelo e apresenta melhorias significativas em relação às versões mais antigas: o modelo atmosférico apresenta resoluções espaciais horizontal e vertical superiores (~38 km e 64 níveis) e os produtos estão disponibilizados com maior resolução espacial e temporal (0,5° grau de latitude e longitude e médias horárias). Além disto, a execução do modelo de forma acoplada com uma assimilação de dados mais moderna torna os resultados bastante realísticos. As variáveis utilizadas como forçantes atmosféricas do modelo hidrodinâmico deste trabalho são: fluxo incidente de radiação de onda longa e de onda curta em superfície, taxa de precipitação, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, temperatura do ar na superfície, velocidade do vento a 10 m (zonal e meridional).

### **3.1.3. Dados de batimetria e linha de costa**

Antes da geração da grade do modelo, é essencial ter informações sobre linha de costa e batimetria para o domínio do modelo. A linha de costa utilizada para definição e edição das máscaras terra/água do domínio do trabalho é proveniente do banco de dados *World Coast Line*, da NOAA, cuja resolução espacial é de 1:5.000.000. Esse dado está disponível no endereço eletrônico <<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/coast/>>.

A informação de batimetria foi extraída do banco de dados SRTM30\_plus, que está disponível no endereço eletrônico <[http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get\\_srtm30.cgi](http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_srtm30.cgi)>. Essa base de dados é composta por dados de topografia, com resolução de 1 km, mais dados de batimetria oceânica, com resolução de 30 arco-segundos (BECKER et al., 2009).

#### 3.1.4. Dados in situ

Os dados de abundância de ovos e larvas de *S. brasiliensis* foram obtidos a partir de coletas de ictioplâncton pelos Navios de Pesquisa “Prof. Besnard”, “Atlântico Sul” e “Victor Hensen” em nove cruzeiros oceanográficos realizados durante o verão, entre os anos de 1976 e 1993. Os nomes dos cruzeiros, as datas de realização e o número de estações encontram-se na Tabela 3.3. Estes cruzeiros de amostragem eram parte dos Projetos de Pesquisa FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos S/A); EPM (*Egg Production Method*); JOPS (*Joint Oceanographic Projects*) e Sardinha (1 e 2), sob a coordenação do Dr. Yasunobu Matsuura, do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. As coletas foram realizadas por meio de redes cônico-cilíndricas (redes bongô) arrastadas obliquamente no sentido fundo-superfície, a uma velocidade de dois a três nós. As contagens das larvas foram realizadas através de amostragem do ictioplâncton e posterior identificação e triagem em laboratório. Estes dados foram utilizados no presente trabalho para a comparação entre os padrões espaciais de desova produzidos pelos experimentos realizados utilizando o IBM.

Tabela 3.3 – Características dos cruzeiros oceanográficos

<b>Cruzeiro</b>	<b>Data</b>	<b>Estações</b>
FINEP-XI	17 – 23/01/1980	42
FINEP-XII	16 – 23/01/1981	42
EPM	22 – 31/01/1988	78
JOPS-1	28/12/1990 – 15/01/1991	88
Sardinha-I	7 – 19/12/1991	110
Sardinha-II	8 – 20/01/1993	110

Foram utilizados também resultados científicos derivados da base de dados acima, como o mapa de probabilidade de presença de ovos publicado por Gigliotti et al. (2010) e a densidade de larvas da sardinha-verdadeira detalhada em Moraes et al. (2012).

### **3.2. Modelo numérico oceânico**

O modelo numérico hidrodinâmico utilizado foi o *Regional Oceanic Modelling System* (ROMS), desenvolvido pela universidade Rutgers, em Nova Jersey, EUA. Esse modelo foi inicialmente baseado no *S-Coordinate Rutgers University Model* (SCRUM), descrito por Song e Haidvogel (1994) e posteriormente foi reescrito visando atualização do código para aumento da eficiência computacional e numérica. Também foi expandido para incluir uma variedade de novas características como novos esquemas de advecção, algoritmos de gradiente de pressão mais acurados, diversas parametrizações de escala de subgrade, camadas limite atmosférica, oceânica e bêntica, módulos biológicos, condições de radiação nos contornos e assimilação de dados.

O ROMS é um modelo numérico hidrodinâmico tridimensional, hidrostático, de superfície livre, que resolve as equações de Navier-Stokes (equações 3.1, 3.2 e 3.3) utilizando a média de Reynolds e assumindo a aproximação de águas rasas e de Boussinesq, que considera o oceano como um fluido incompressível, restringindo o efeito da perturbação de densidade à componente vertical da equação do momentum. Utiliza grade C de *Arakawa*, coordenadas horizontais ortogonais curvilíneas e coordenada vertical sigma (*terrain-following*), que acompanha o terreno e permite definir melhor uma determinada camada do oceano que se pretende obter uma melhor resolução. As equações dinâmicas que regem o modelo, na forma de coordenadas horizontais cartesianas e coordenada vertical sigma, são as seguintes (SHCHEPETKIN; McWILLIAMS, 2005; HAIDVOGEL et al., 2008):

Componente zonal:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(H_z u)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z u)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z u)}{\partial y} + \frac{\partial(\Omega H_z u)}{\partial s} - f H_z v = \\ - \frac{H_z}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} - H_z g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial s} \left( \overline{u'w'} - \frac{\nu}{H_z} \frac{\partial u}{\partial s} \right) \end{aligned} \quad (3.1)$$

Componente meridional:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(H_z v)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z v)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z v)}{\partial y} + \frac{\partial(\Omega H_z v)}{\partial s} - f H_z u = \\ - \frac{H_z}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - H_z g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial s} \left( \overline{v'w'} - \frac{\nu}{H_z} \frac{\partial v}{\partial s} \right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Componente vertical:

$$0 = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial s} - \frac{g}{\rho_0} H_z \rho \quad (3.3)$$

Com a equação da continuidade:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(H_z u)}{\partial x} + \frac{\partial(H_z v)}{\partial y} + \frac{\partial(H_z \Omega)}{\partial s} = 0 \quad (3.4)$$

E a equação da evolução temporal dos traçadores do modelo:

$$\frac{\partial(H_z C)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z C)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z C)}{\partial y} + \frac{\partial(\Omega H_z C)}{\partial s} = - \frac{\partial}{\partial s} \left( \overline{c'w'} - \frac{\nu}{H_z} \frac{\partial C}{\partial s} \right) + C_s \quad (3.5)$$

Sendo:

$u, v$  e  $\Omega$ : os componentes da velocidade horizontal (zonal e meridional) e vertical (em coordenadas sigma), respectivamente;

$\zeta$ : elevação da superfície livre do mar;

$h$ : profundidade abaixo do nível médio do mar;

$H_z$ : fator de refinamento da resolução vertical;

$f$ : parâmetro de Coriolis;

$p$ : pressão;

$\rho$  e  $\rho_0$ : densidades total e de referência;

$g$ : aceleração da gravidade;

$\nu$  e  $\nu_0$ : viscosidade e difusão moleculares;

$C$ : traçador (temperatura e salinidade, por exemplo);

$C_s$ : fontes e os sumidouros dos traçadores;

Uma base superior indica uma média e as variáveis marcadas com linha (') representam flutuações turbulentas.

A forma de resolução de equações do ROMS segue um esquema explícito, utilizando um passo de tempo menor para resolver a elevação da superfície do mar e o modo barotrópico e um passo de tempo maior para resolver temperatura, salinidade e o modo baroclínico. Assim, dentro de um número finito de passos de tempo barotrópicos é efetuado um passo de tempo baroclínico.

### 3.2.1. Configuração da grade

A grade utilizada compreende a região da PCSE, cujos limites de latitude são 20°S ao Norte e 30°S, ao Sul e de longitude 40°W, a Leste e 50°W, a Oeste. A resolução horizontal é de 1/12 de grau de latitude e longitude (aproximadamente 9,2 km no equador), escolhida para se obter uma boa representação dos fenômenos de mesoescala (*eddy-resolving*) que podem influenciar na retenção ou dispersão das larvas da sardinha-verdadeira. A grade apresenta as laterais Leste e Sul como condições de contorno abertas. A resolução vertical é de 30 níveis sigma, com maior resolução próximo à superfície, como pode ser observado na Figura 3.1.

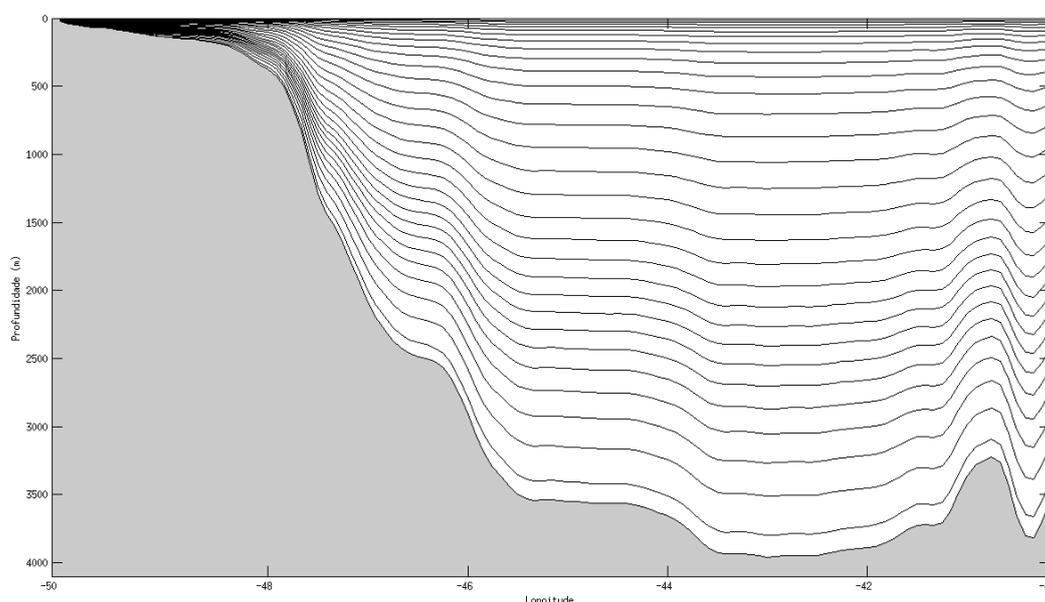


Figura 3.1 – Corte vertical na latitude 28°S, que representa as coordenadas verticais sigma utilizadas para os experimentos.

### **3.2.2. Experimentos no ROMS**

Primeiramente foi realizado um experimento para que as forçantes do modelo e as soluções das equações numéricas atingissem um equilíbrio (*spin up*). Este foi realizado por 16 anos, de janeiro de 1980 a janeiro de 1995, quando as soluções se apresentavam estáveis, sem nenhum padrão de aumento ou diminuição ao longo dos anos e representavam a variabilidade sazonal das principais características físicas da PCSE. O resultado do último mês do *spin up* foi utilizado como condição inicial para a realização do experimento longo, realizado por 28 anos, entre janeiro de 1980 e dezembro de 2007, período correspondente à disponibilidade das forçantes atmosféricas. Desse experimento foram geradas saídas com médias mensais de temperatura, salinidade, correntes e altura do nível do mar que foram comparadas com os dados observacionais (seção 3.2.3).

Por fim, foi realizado um último experimento cujas saídas foram utilizadas como forçantes físicas do IBM. Foram geradas saídas com médias horárias para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro de 1980, 1981, 1988, 1991, 1992 e 1993, que correspondem aos dados de ictioplâncton disponíveis. As variáveis de interesse, para esse experimento são temperatura, salinidade, altura do nível do mar e velocidades meridionais e zonais das correntes. Para todos os experimentos foi utilizado um passo de tempo barotrópico de 30s e o baroclínico 600 s.

### **3.2.3. Comparação dos resultados com dados observacionais**

Foi realizada uma comparação dos resultados de superfície do modelo hidrodinâmico com dados de satélite e das características verticais das propriedades físicas da água do mar utilizando dados coletados *in situ*. O intuito dessa comparação é formular e documentar a aplicabilidade e acuraria dos resultados obtidos, comprovando a capacidade do modelo em reproduzir fenômenos reais.

Para a comparação dos campos superficiais, foram calculadas as médias anuais e sazonais da TSM e ASM observadas pelos sensores orbitais e resultantes do modelo e então foram calculadas suas diferenças. Para que os resultados de ASM do ROMS ficassem consistentes com o padrão de amostragem dos dados altimétricos, foi realizada uma reamostragem espacial para transformar os dados de resolução espacial do ROMS de 1/12 de grau para a resolução espacial dos dados do radar altímetro, que é de 1/3. Esse processo já foi realizado em outros estudos em regiões próximas a plataformas continentais e sujeitas a fenômenos de ressurgência (CAPET et al., 2008; SILVA et al., 2009; PARADA et al., 2012).

As soluções do modelo foram comparadas com perfis verticais utilizando médias anuais e sazonais de temperatura e correntes meridionais, para identificar feições físicas conhecidas na PCSE, como a presença da CB e da CCB, a ressurgência costeira de Cabo Frio e a intrusão da ACAS na plataforma. Por fim, perfis de temperatura e salinidade foram gerados para a região de Ubatuba, em pontos localizados dentro da PCI e da PCM, para serem comparados com perfis TS calculados com base em dados hidrográficos (CASTRO, 1996).

### **3.3. MODELO BIOFÍSICO**

O IBM utilizado para o estudo da dispersão dos ovos da sardinha-verdadeira é o *Ichthyop* (LETT et al., 2008). Essa ferramenta foi desenvolvida para estudar como os fatores físicos (e. g., correntes oceânicas, temperatura da água, salinidade) e os biológicos (e. g., flutuabilidade, crescimento, mortalidade) afetam a dinâmica do icteoplâncton. O *Ichthyop* é uma ferramenta livre, escrita em linguagem JAVA e está disponível no endereço eletrônico <<http://www.ur097.ird.fr/projects/ichthyop/>>. As variáveis utilizadas que dizem respeito aos indivíduos e o seu ambiente físico são: idade [dias], comprimento [mm], estágio de vida (ovo ou larva), localização (longitude, latitude e profundidade [m]) e situação (vivo ou morto). Já o ambiente físico é

caracterizado pelas variáveis de estado do oceano, sendo velocidade de correntes [ $\text{ms}^{-1}$ ], temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] e salinidade. Estas são fornecidas pelos resultados da simulação do ROMS.

Dois experimentos foram conduzidos com o IBM, diferenciando-se pelas zonas de lançamento dos ovos: RZR, cuja área de desova foi aleatória ao longo de toda a PCSE, limitada apenas pela isóbata dos 100 m (Figura 3.2a); e RZP, que foi realizado selecionando cinco áreas de desova (Figura 3.2b), que apresentaram probabilidade de presença de ovos maior que 0,5, de acordo com o mapa elaborado por Gigliotti et al. (2010). Dentro de cada uma dessas áreas, os ovos foram lançados aleatoriamente. Os códigos de cada área, a localização e seus limites de latitude e longitude encontram-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – área de desova do experimento RZP

<b>Código da área</b>	<b>Região</b>	<b>Limites de latitude</b>	<b>Limites de longitude</b>
RZP1	Ao largo do Cabo de Santa Marta (SC)	27°S a 27,7°S	47,2 ° W a 47,7°W
RZP2	Entre Florianópolis (SC) e Paranaguá (PR)	25°S a 27°S	47,5°W a 48,8°W
RZP3	São Sebastião (SP)	23,8°S a 24,8°S	45,7°W a 46,1°W
RZP4	Rio de Janeiro (RJ)	23°S a 24°S	43°W a 44°W
RZP5	Cabo Frio (RJ)	22,8°S a 23,8°S	41,7°W a 42,2°W

Cada um desses experimentos foi conduzido para seis diferentes anos, correspondentes aos verões de realização dos cruzeiros (1980, 1981, 1988, 1991, 1992 e 1993 – ver seção 3.1.4). Em cada um desses anos foram lançados 10000 ovos nos primeiros 30 m de coluna d'água, entre os meses de dezembro e janeiro. Os indivíduos foram rastreados por 45 dias, idade na qual as larvas já podem ser consideradas como pré-juvenis (IKEDA, 1987). Durante esse processo, as larvas podem sobreviver, serem advectadas para fora da plataforma ou mortas por serem expostas a uma temperatura considerada letal.

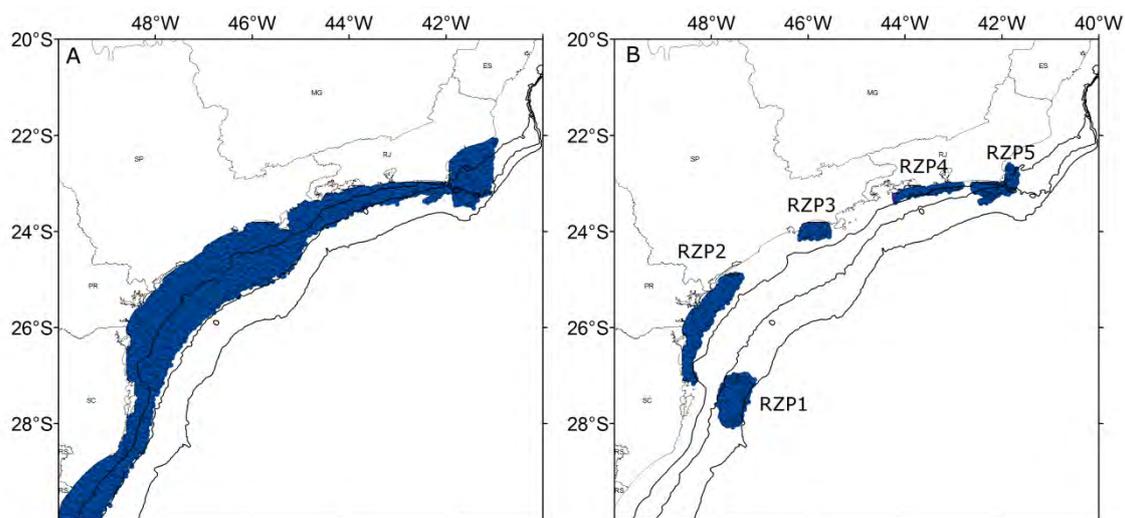


Figura 3.2 – áreas de desova testadas no experimento RZR(A) e RZP (B).

### 3.3.1. Submodelos do IBM

Foram incluídos alguns submodelos no IBM referentes a parâmetros biológicos e de transporte das larvas da sardinha-verdadeira: (1) Movimento horizontal de advecção e de difusão, (2) Movimento vertical para ovos e larvas e (3) Mortalidade por temperatura e perdas por advecção.

O submodelo do movimento horizontal advectivo foi conduzido pelo esquema *Forward Euler*, através do tempo e espaço baseando-se nos componentes horizontais zonais e meridionais de velocidade ( $u$  e  $v$ ), através das equações 3.6 e 3.7.

$$xp_{t+1} = xp_t + udt \quad (3.6)$$

$$yp_{t+1} = yp_t + vdt \quad (3.7)$$

Sendo:

$xp, yp$ : Posição horizontal da partícula (m);

$u, v$ : componentes zonais e meridionais da velocidade das correntes ( $ms^{-1}$ ).

O movimento horizontal difusivo (equações 3.8 e 3.9) é efetuado com base no coeficiente lagrangeano de difusão horizontal, que é função da taxa de

dissipação turbulenta e do tamanho da célula da grade do modelo (equação 3.10), e de um fator aleatório, obtido através do gerador de números aleatórios *Marsenne Twister*, responsável por introduzir certa aleatoriedade às trajetórias (PELIZ et al., 2007).

$$dx = Rx\sqrt{2dtK_h} \quad (3.8)$$

$$dy = Ry\sqrt{2dtK_h} \quad (3.9)$$

$$K_h = \varepsilon^{1/3}l^{4/3} \quad (3.10)$$

Sendo:

$dx, dy$ : deslocamento horizontal da partícula, zonal e meridional;

$Rx, Ry$ : número aleatório gerado através do método *Marsenne Twister*, entre [-1 1];

$K_h$ : coeficiente lagrangeano de difusão horizontal ( $m^3.s^{-3}$ );

$l$ : tamanho da célula de grade (m);

$\varepsilon$ : taxa de dissipação turbulenta ( $m^2.s^{-3}$ ). O valor utilizado neste trabalho foi de  $10^{-9} m^2.s^{-3}$ , valor sugerido por Peliz et al. (2007).

O submodelo do movimento vertical simula a flutuabilidade dos ovos para esferóides alongados, através da qual é calculada uma velocidade vertical, seguindo a equação 3.11, que é função da aceleração da gravidade, da densidade da água do mar e do ovo, da viscosidade molecular da água, do menor e do maior eixo do esferóide (PARADA et al., 2003). Já o movimento vertical das larvas foi inserido com base na migração nictemeral, que se inicia aproximadamente dois dias após a eclosão do ovo, quando as larvas adquirem capacidade de movimentação vertical (IKEDA, 1987). Este módulo se baseia na profundidade da larva durante o dia e durante a noite, sendo estas definidas como 30 e 5 m, respectivamente (KURTZ; MATSUURA, 2001).

$$dw = \frac{1}{24}gd^2 \left( \frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \right) \left( \frac{1}{\nu} \right) \ln \left( \frac{2l}{d + \frac{1}{2}} \right) \quad (3.11)$$

Sendo:

$dw$ : velocidade vertical devido à flutuabilidade ( $cm s^{-1}$ );

$g$ : aceleração da gravidade ( $cm s^{-2}$ );

$d, l$ : menor e maior eixo do esferóide (cm);

$\rho_p$ : densidade do ovo ( $\text{g cm}^{-3}$ );  
 $\rho_w$ : densidade da água ( $\text{g cm}^{-3}$ );  
 $\nu$ : viscosidade molecular da água ( $\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$ ).

O IBM considera duas fontes de mortalidade: a primeira é função da temperatura, sendo que o ovo é considerado morto quando submetido a uma temperatura da água menor que  $17^\circ\text{C}$  e, no caso da larva, a uma temperatura menor que  $16,5^\circ\text{C}$  (KURTZ, 1999). A outra fonte de mortalidade é a perda por advecção, que acontece quando a partícula é transportada para áreas cuja profundidade exceda 200 m (CERGOLE; VALENTINI, 1994; SACCARDO; ROSSI-WONGTCHOWSKI, 1991).

### **3.4. Análise dos resultados**

Para a análise dos resultados, três variáveis foram calculadas em cada experimento, de acordo com as fontes de mortalidade: (1) sobrevivência, que é a razão entre os indivíduos sobreviventes após 45 dias de experimentos e o número total de indivíduos lançados; (2) mortalidade por temperatura e (3) perdas por advecção, que são o número total de indivíduo que tiveram contato com águas cujas temperaturas são menores que o limite letal e aqueles transportados para fora da isóbata de 200m, respectivamente, dividido pelo número total de indivíduos lançados.

Foi aplicada uma análise de variância (ANOVA), com um intervalo de confiança de 0,05, para comparar os resultados dessas variáveis entre as duas estratégias de desova testadas (RZR e RZP), objetivando verificar se haviam diferenças nas taxas de sobrevivências com a mudança nos *habitats* de desova. As diferenças entre a sobrevivência final das larvas cujos ovos foram lançados nas áreas de desova estabelecidas no experimento RZP também foi testada, com o mesmo intervalo de confiança, porém utilizando o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, pois os dados não apresentavam distribuição normal. Para evidenciar os resultados desses testes, as amostras foram

plotadas em *boxplots* com entalhe (*notched boxplot*), que permitem uma comparação de diversas amostras, para verificar se estas apresentam ou não diferenças significativas, a um intervalo de confiança de 0,05 (McGILL et al., 1978). O cálculo do intervalo dos entalhes é feito com base nas Equações 3.13 e 3.14:

$$e_1 = \frac{md + 1.57 * (q_{3/4} - q_{1/4})}{\sqrt{n}} \quad (3.13)$$

$$e_2 = \frac{m - 1.57 * (q_{3/4} - q_{1/4})}{\sqrt{n}} \quad (3.14)$$

Sendo:

$e_1$ : entalhe superior

$e_2$ : entalhe inferior

$md$ : mediana

$q_{3/4}$ : terceiro quartil

$q_{1/4}$ : primeiro quartil

$n$ : número de amostras

Por fim, a distribuição espacial das larvas foi verificada por meio da densidade de Kernel e os resultados foram comparados com dados coletados em campo e processados por Moraes et al. (2012) (Figura 4.13) para os anos simulados. A técnica do estimador Kernel de densidade calcula a função densidade de probabilidade de uma variável empiricamente, com base em amostras observadas. Ela interpola um valor de intensidade para cada célula de uma grade, considerando uma função simétrica, centrada na célula, utilizando-se para o cálculo os pontos situados até uma distância do centro da célula, que corresponde ao raio de influência (SILVERMAN, 1986). O cálculo é feito por meio da Equação 3.15, que se baseia na localização dos  $n$  eventos observados em uma determinada região ( $u_1, u_2, \dots, u_n$ ) e na localização  $u$  do evento que quer se estimar. O estimador é calculado considerando os eventos contidos em um

raio de tamanho  $\tau$  em torno de  $u$  e da distância  $d$  entre a posição e a  $i$ -ésima amostra, a partir de uma determinada função  $K$ :

$$\lambda_{\tau}(u) = \frac{1}{\tau^2} \sum_{i=1}^k K\left(\frac{d(u_i; u)}{\tau}\right) \quad (3.15)$$

## 4 RESULTADOS

### 4.1. Soluções do modelo hidrodinâmico

#### 4.1.1. Temperatura da Superfície do Mar (TSM)

A comparação entre a média anual da TSM resultante do modelo hidrodinâmico e aquela extraída dos dados de satélite indica que o modelo representa corretamente a posição e o formato das principais feições de superfície que ocorrem sobre a PCSE: a ressurgência costeira de Cabo Frio, o avanço próximo à costa em direção ao norte de águas frias próximo ao Cabo de Santa Marta, e a posição da CB ao longo da plataforma continental e talude (Figura 4.1a e Figura 4.1b).

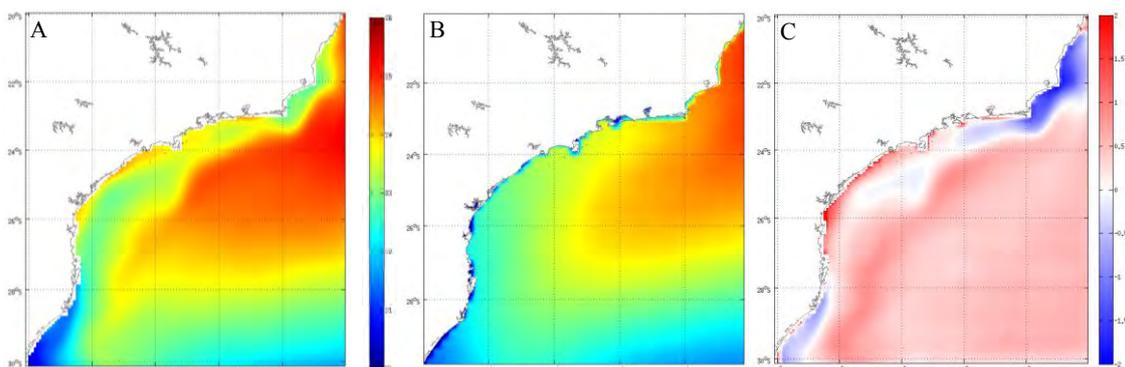


Figura 4.1 – Média anual da TSM, em °C, extraída do modelo hidrodinâmico (ROMS) (A), observações de satélite (AVHRR) (B) e suas diferenças (ROMS – AVHRR) (C).

As maiores diferenças encontradas estão na região costeira, em especial no quadrante nordeste do domínio (latitudes 21°S a 23°S), entre Cabo Frio (RJ) e Vitória (ES) (Figura 4.1c). As TSMs mais baixas, relacionadas à ressurgência costeira, são mais intensas nos resultados do modelo do que nos dados de satélite. Essa diferença fica mais evidente nos perfis de TSM ao longo da latitude 22°S (Figura 4.2a), onde as maiores diferenças (~1,5°C) encontram-se na região próxima à costa (longitudes 42°W a 41°W), correspondente à ressurgência costeira de Cabo Frio. Já para o perfil de TSM correspondente à

porção sul do domínio (Figura 4.2b), os resultados do modelo apresentam melhor concordância com os dados de satélite.

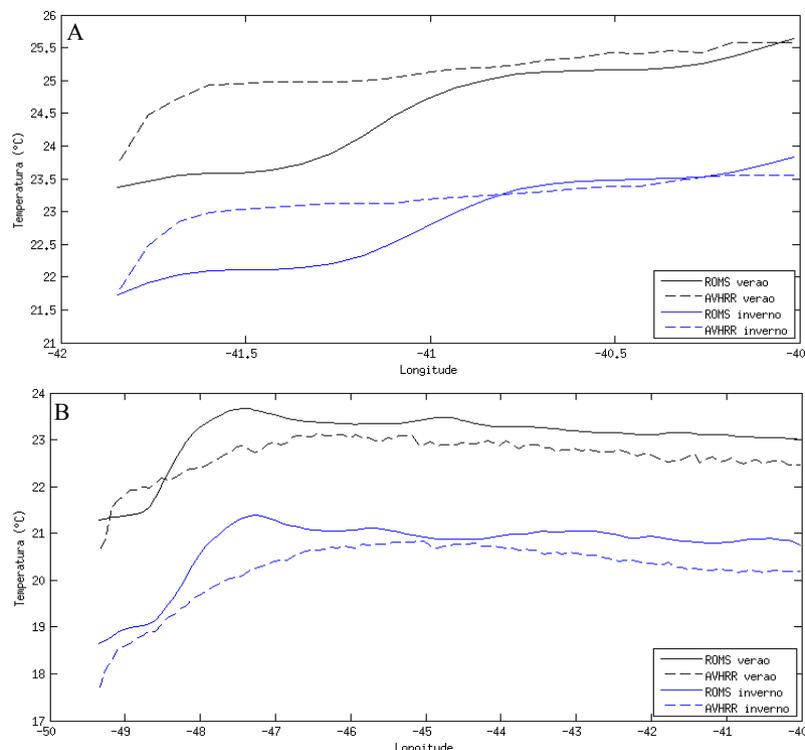


Figura 4.2 – Perfis da média sazonal de TSM resultante do ROMS e das observações de satélite (AVHRR), ao longo das latitudes 22°S (A) e 29°S (B).

Através das médias sazonais da TSM para o verão (dezembro, janeiro e fevereiro) e para o inverno (junho, julho e agosto) pode-se observar que o modelo representou bem a expressão espacial da variabilidade sazonal da região (Figura 4.3a e Figura 4.4a). Além disso, também representou a variabilidade sazonal dos principais processos oceanográficos atuantes sobre a região: a intensificação da ressurgência costeira de Cabo Frio e da CB no verão (SILVEIRA et al., 2000) e a CCB, no inverno (intrusão de águas costeiras frias, próximo ao Cabo de Santa Marta) (SOUZA; ROBINSON, 2003).

Comparando as médias sazonais resultantes do modelo hidrodinâmico com as estimadas de observações de satélite (Figura 4.3b e Figura 4.4b), pode-se notar que as diferenças são bem similares àquelas encontradas para a média anual. Porém, a variabilidade sazonal dos processos fica novamente evidente,

em especial na região correspondente à ressurgência costeira de Cabo Frio e à Norte. No verão, época de máxima ressurgência, as diferenças entre modelo e satélite são maiores (ROMS  $\sim 2^{\circ}\text{C}$  mais frio), enquanto que no inverno essa diferença diminui ( $< 1^{\circ}\text{C}$ ).

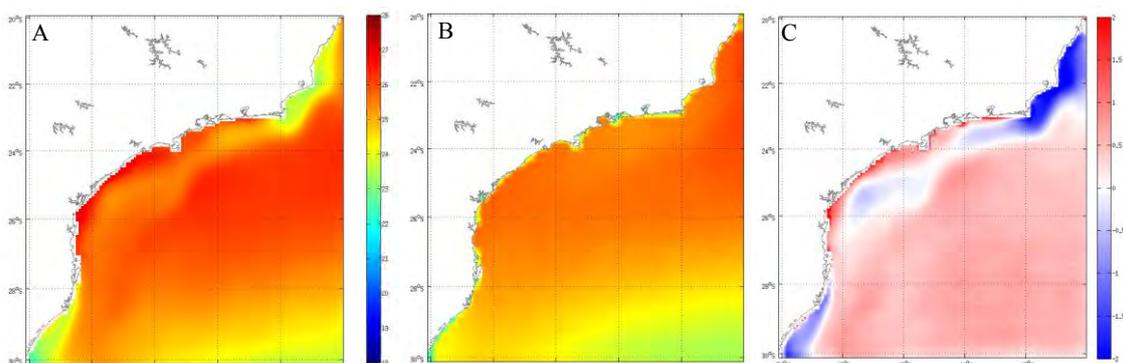


Figura 4.3 – Média sazonal (verão) da TSM, em  $^{\circ}\text{C}$ , extraída do modelo hidrodinâmico (ROMS) (A), observações de satélite (AVHRR) (B) e suas diferenças (ROMS – AVHRR) (C).

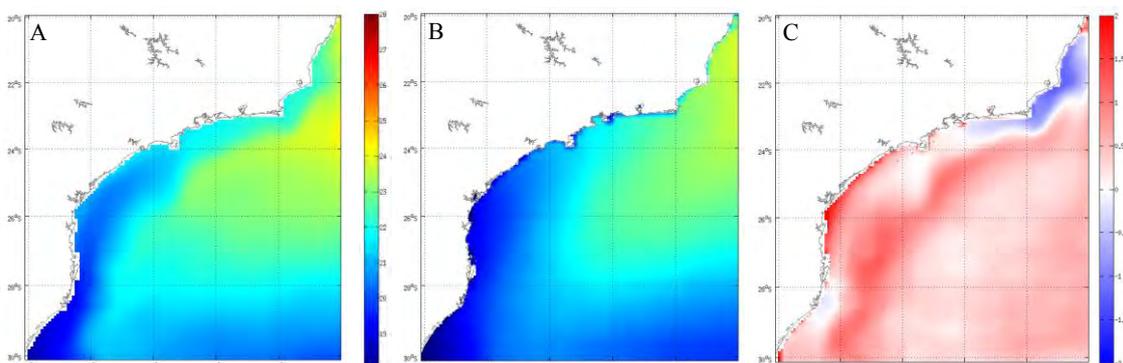


Figura 4.4 – Média sazonal (inverno) da TSM, em  $^{\circ}\text{C}$ , extraída do modelo hidrodinâmico (ROMS) (A), observações de satélite (AVHRR) (B) e suas diferenças (ROMS – AVHRR) (C).

#### 4.1.2. Altura da Superfície do Mar (ASM)

As comparações das médias anuais da ASM resultantes do modelo com aquelas extraídas de observações de altímetros mostram que a simulação captura a variabilidade espacial de fenômenos de mesoescala da região. No geral, ambos os campos apresentam a região *offshore* com maiores ASM, enquanto a região próxima à costa apresenta menores ASM (Figura 4.5a e Figura 4.5b). Nota-se a presença de uma intensa atividade de vórtices ao longo

da PCSE, estruturas já bastante conhecidas na circulação da CB (LEGECKIS; GORDON, 1982; LIMA et al., 1996; ASSIREU, 2003; SOUZA e ROBINSON, 2004) e que foram representadas pelos resultados do modelo. Ao sul do domínio (entre as latitudes de 27°S e 30°S) observa-se uma estrutura bimodal em ambos os campos de ASM: uma área com baixa ASM um pouco mais suavizada, representando um vórtice ciclônico e outra área com alta ASM mais acentuada, que indica a presença de um vórtice anticiclônico nessa área. O vórtice ciclônico foi reportado na literatura como quase-estacionário e chamado de vórtice de Santa Marta (ASSIREU et al., 2003). A maior discrepância entre ROMS e os altímetros está relacionada à magnitude dos valores. O modelo subestima as ASMs, apresentando diferenças de aproximadamente 0,4 m em relação àquelas extraídas dos altímetros. Nas figuras foram utilizadas diferentes escalas de cores para permitir a visualização dos processos, devido às diferenças entre os valores de SSH resultantes do modelo e extraídos do AVISO.

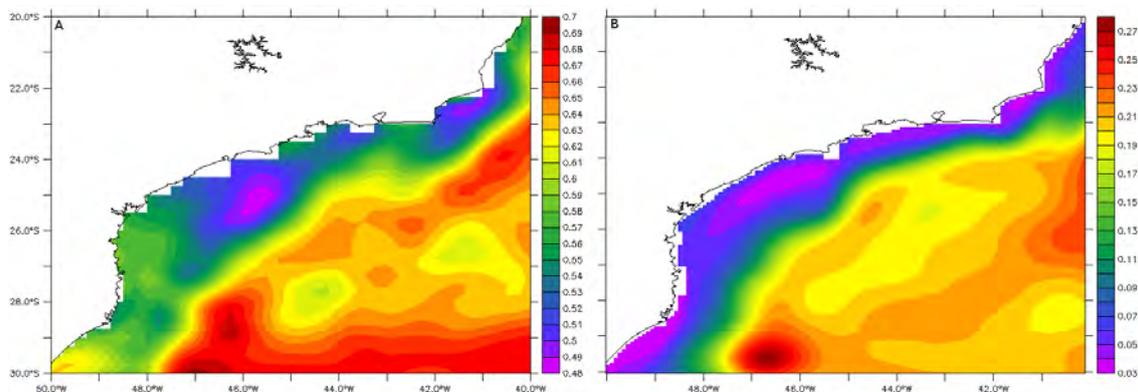


Figura 4.5 – Média anual da Altura da Superfície do Mar, em cm, extraída do observações de satélite (AVISO) (A), modelo hidrodinâmico (ROMS) (B). Note a diferença na escala de cores.

#### 4.1.3. Diagramas Temperatura Salinidade (TS)

Os diagramas TS para o embaiamento de Ubatuba (latitudes de 23°20'S a 24°30'S e longitudes de 44°W a 45°30'W) resultantes do modelo, para os verões de 1985 a 1988 possuem o formato e os valores próximos àqueles

medidos por Castro (1996) (Figura 4.6). Os resultados do modelo permitem identificar a mistura de três massas de água para a região, o que é evidenciado pela forma triangular dos diagramas: o vértice inferior, com baixas temperaturas e salinidades, corresponde à ACAS; o máximo de salinidade corresponde à AT; e o mínimo de salinidade, associada a altas temperaturas, corresponde à AC (CASTRO et al., 1987). Com exceção do verão de 1986, todos os outros diagramas TS seguem esse padrão, com formato triangular, indicando que há uma mistura evidente entre essas três massas de água. Para 1986 nota-se claramente uma menor influência da AT sobre as outras massas de águas, além de uma menor mistura entre a ACAS e a AC. Essa anomalia pode estar associada a uma menor penetração da ACAS em direção à costa (CASTRO, 1996). Essa variabilidade interanual foi representada pelos resultados do modelo, como pode-se notar na Figura 4.6, onde o formato triangular dos diagramas TS está bem característico para os anos de 1985, 1987 e 1988, enquanto que o ano de 1986 está fora desse padrão.

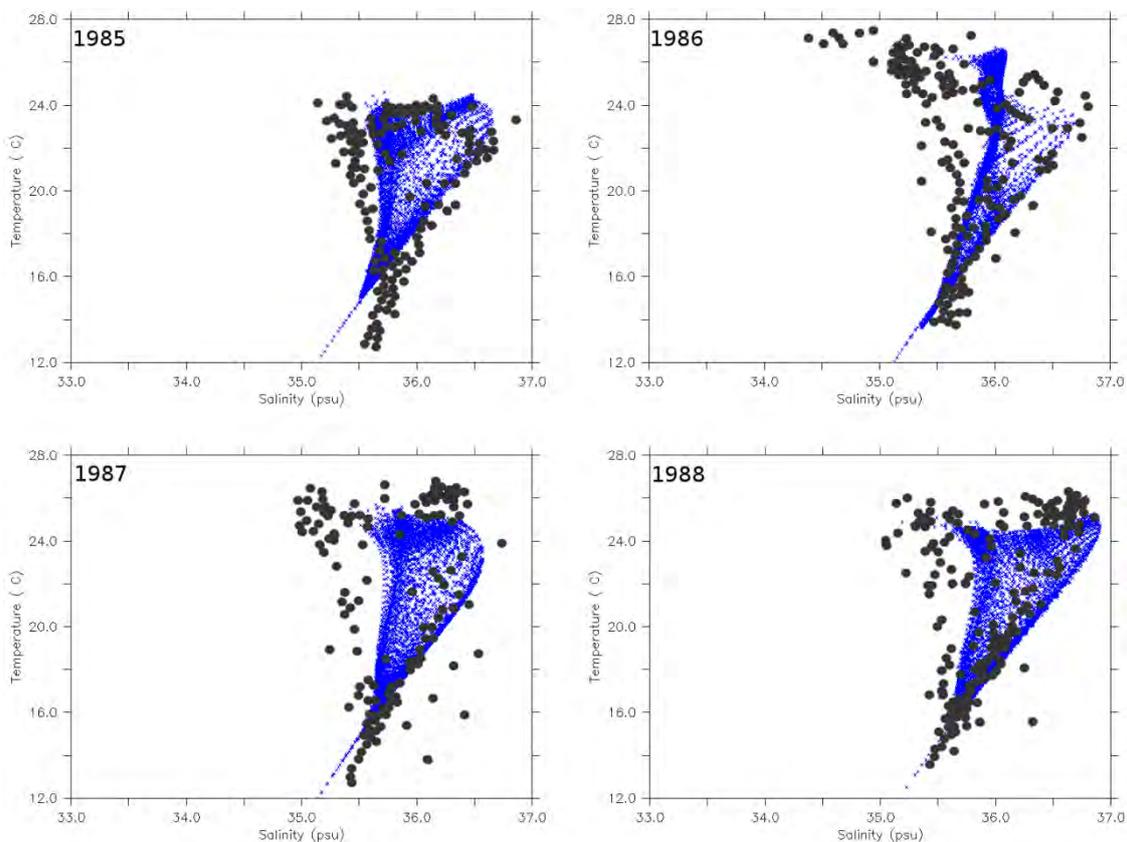


Figura 4.6 – Diagramas TS resultantes do ROMS (pontos azuis) e de dados coletados em campo (pontos pretos) por Castro (1986), para o mês de Dezembro dos anos indicados.

Esses resultados evidenciam que as soluções do modelo estão capturando bem as principais estruturas atuantes sobre a PCSE, não apenas em superfície, mas também em profundidade, bem como em regiões próximas à costa, pois os pontos utilizados nos diagramas apresentados estão em profundidade inferiores a 200 m.

#### 4.1.4. Perfis verticais de temperatura, salinidade e correntes meridionais

A média anual de temperatura, salinidade e velocidade meridional de correntes provenientes dos resultados do modelo, ao longo da latitude 24°S é mostrada na Figura 4.7a, 4.7b e 4.7c, respectivamente, para os primeiros 2000 m de coluna d'água. Através dos perfis de temperatura e salinidade, pode-se notar que o modelo reproduziu a interação entre as massas d'água que atuam na

região. Nos primeiros 200 m de coluna d'água há uma clara estratificação vertical da temperatura e da salinidade na região próxima à costa (que corresponde à plataforma continental) quando comparada à região oceânica, que apresenta essas propriedades nos primeiros 200 m quase sem variação. Esse afloramento das isotermas e das isohalinas representa a intrusão da ACAS sobre a região de plataforma, já reportada por diversos estudos anteriores (CAMPOS et al., 1995; CASTRO et al., 1987; CASTRO, 1996), o que pode ser confirmado pelos valores típicos dessa massa d'água, que é fria ( $T < 20^{\circ}\text{C}$ ) e menos salina ( $S < 36,4$ ) (MIRANDA, 1982). A isoterma de  $18^{\circ}\text{C}$ , bem como a isohalina de 36,4 alcança regiões com profundidades inferiores a 100 m. As águas que estão sobre a plataforma e mais próximas à superfície apresentam baixa salinidade e alta temperatura, característica da AC. Esse padrão foi reproduzido pelo modelo, bem como a presença da AT, que é mais quente ( $T > 20^{\circ}\text{C}$ ) e salina ( $S > 36,4$ ) e ocupa a superfície do Atlântico Sul. Nota-se, através dos perfis, que a região oceânica superficial apresenta características de temperatura e salinidade quase sem variação e com valores típicos da AT ( $T > 24^{\circ}\text{C}$  e  $S > 36,6$ ) (MIRANDA, 1982). Abaixo da ACAS, pode-se notar nos perfis a presença da AIA, que é uma massa de água fria ( $3^{\circ}\text{C} - 6^{\circ}\text{C}$  de  $T$ ), cuja formação dá-se na Antártica, e pouco salina (34,2 a 34,6 de salinidade). Através do perfil de velocidade meridionais, observa-se um fluxo negativo de velocidade em superfície e um positivo nas camadas mais profundas. Portanto o modelo conseguiu reproduzir o padrão de circulação superficial e profunda na região da PCSE e talude continental: as águas em superfície fluem para o quadrante Sul, por causa da presença da CB, enquanto as águas em níveis mais profundos vão em direção ao Equador, por causa do fluxo da AIA que, ao Norte da latitude  $25^{\circ}\text{S}$ , apresenta esse padrão de circulação (BOEBEL et al., 1999; MULLER et al., 1998; STRAMMA; ENGLAND, 1999).

Os resultados do modelo ROMS também reproduziram a variabilidade sazonal dessas propriedades, conforme mostram os perfis das médias de verão e

inverno para temperatura, salinidade e velocidade meridional nas Figura 4.7d a Figura 4.7i. No inverno, há uma menor estratificação das isotermas e das isohalinas sobre a plataforma, consequência da menor intrusão da ACAS nessa época do ano. Além disso, nota-se um aumento na intensidade do fluxo em direção ao Sul da velocidade meridional para o verão, consequência do aumento da intensidade da CB para essa época do ano (SILVEIRA et al., 2000).

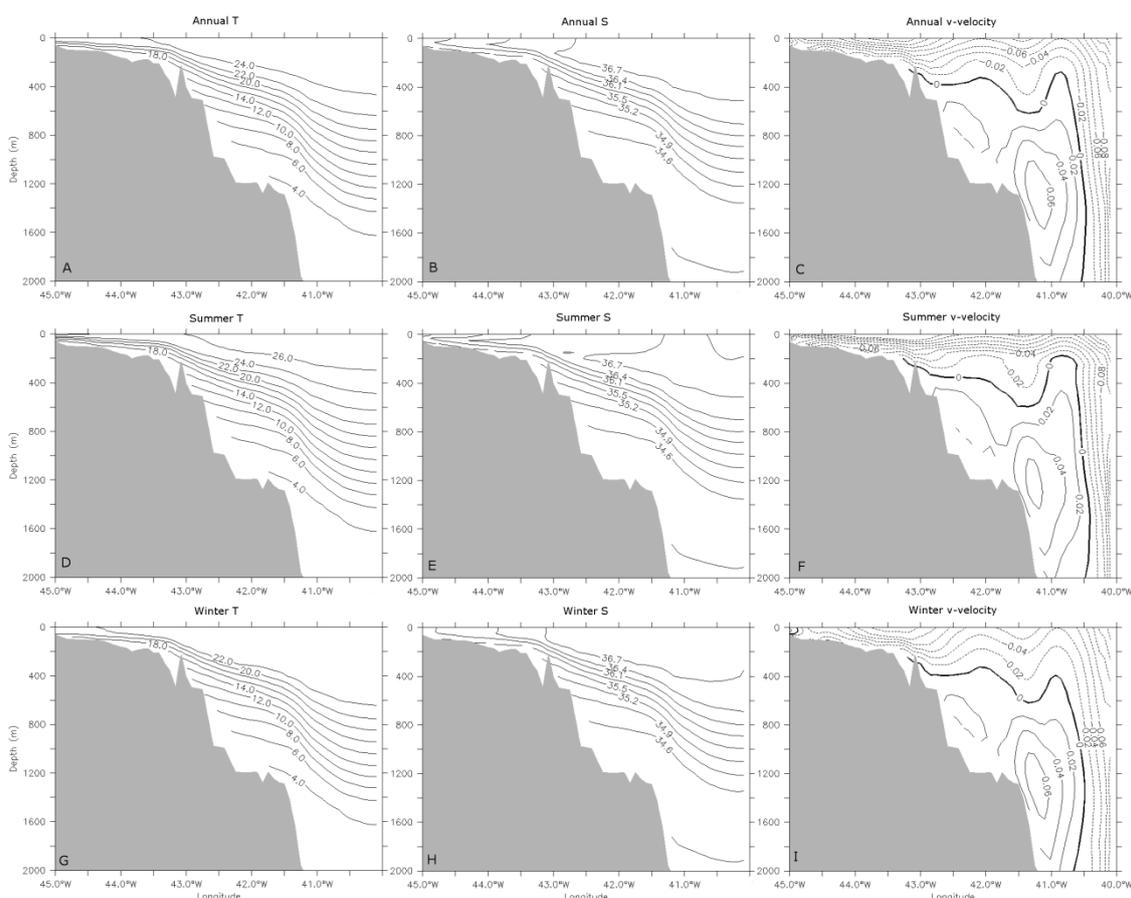


Figura 4.7 – Perfis verticais na latitude 24°S da média anual entre 1980 e 2007, para temperatura (A), em °C, salinidade (B) e correntes meridionais (C), em m.s<sup>-1</sup>; média sazonal (verão) para temperatura (D), salinidade (E) e correntes meridionais (F); e média sazonal (inverno) temperatura (G), salinidade (H) e correntes meridionais (I).

#### 4.2. Caracterização oceanográfica dos anos de estudo

Os mapas das anomalias de temperaturas em superfície, a 10 m e a 20 m de profundidade, para janeiro dos anos de estudo, extraídas a partir dos resultados do ROMS encontram-se na Figura 4.8. É possível observar que janeiro de 1993 não diferiu da média climatológica, com fracas anomalias, tanto negativas quanto positivas ( $+ - 0,5^{\circ}\text{C}$ ) para os três níveis de profundidade. Em 1981 há também fracas anomalias em grande parte do domínio, principalmente na região oceânica. Porém, há a presença de uma forte anomalia negativa na parte sul, próximo à região do Cabo de Santa Marta. Além disso, há anomalias negativas na região próxima à costa, ocorrendo um aumento desta com a profundidade, em especial na região de Cabo Frio. Isso é um indício de que, para este período, a ressurgência na superfície não estava muito intensa, porém há a penetração de uma massa de água mais fria na subsuperfície. Em termos de superfície, a ressurgência costeira de Cabo Frio esteve bastante intensa em janeiro de 1992, onde nota-se uma forte anomalia negativa para essa região ( $-1,5^{\circ}\text{C}$ ). Além disso, há anomalias negativas, porém menores, para toda a costa (entre  $-0,5^{\circ}\text{C}$  e  $-1^{\circ}\text{C}$ ), não havendo diferenças entre as três profundidades analisadas. Por outro lado, em janeiro de 1980 e de 1991, a ressurgência de Cabo Frio esteve enfraquecida, podendo-se notar uma anomalia positiva de aproximadamente  $1,5^{\circ}\text{C}$  e  $0,5^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, para essa região. O período cujas temperaturas foram mais elevadas corresponde a janeiro de 1988, que apresenta anomalias positivas em todo o domínio, para as três profundidades analisadas (entre  $1^{\circ}\text{C}$  e  $1,5^{\circ}\text{C}$ ).

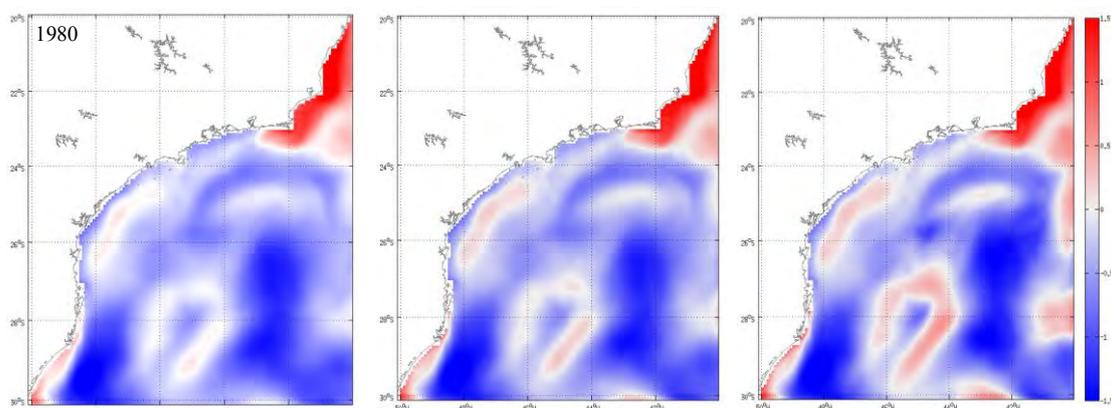


Figura 4.8 – Anomalias de TSM (esquerda), a 10 m (meio) e 20 m de profundidade

(direita), para os meses de janeiro dos anos analisados geradas pelo ROMS.

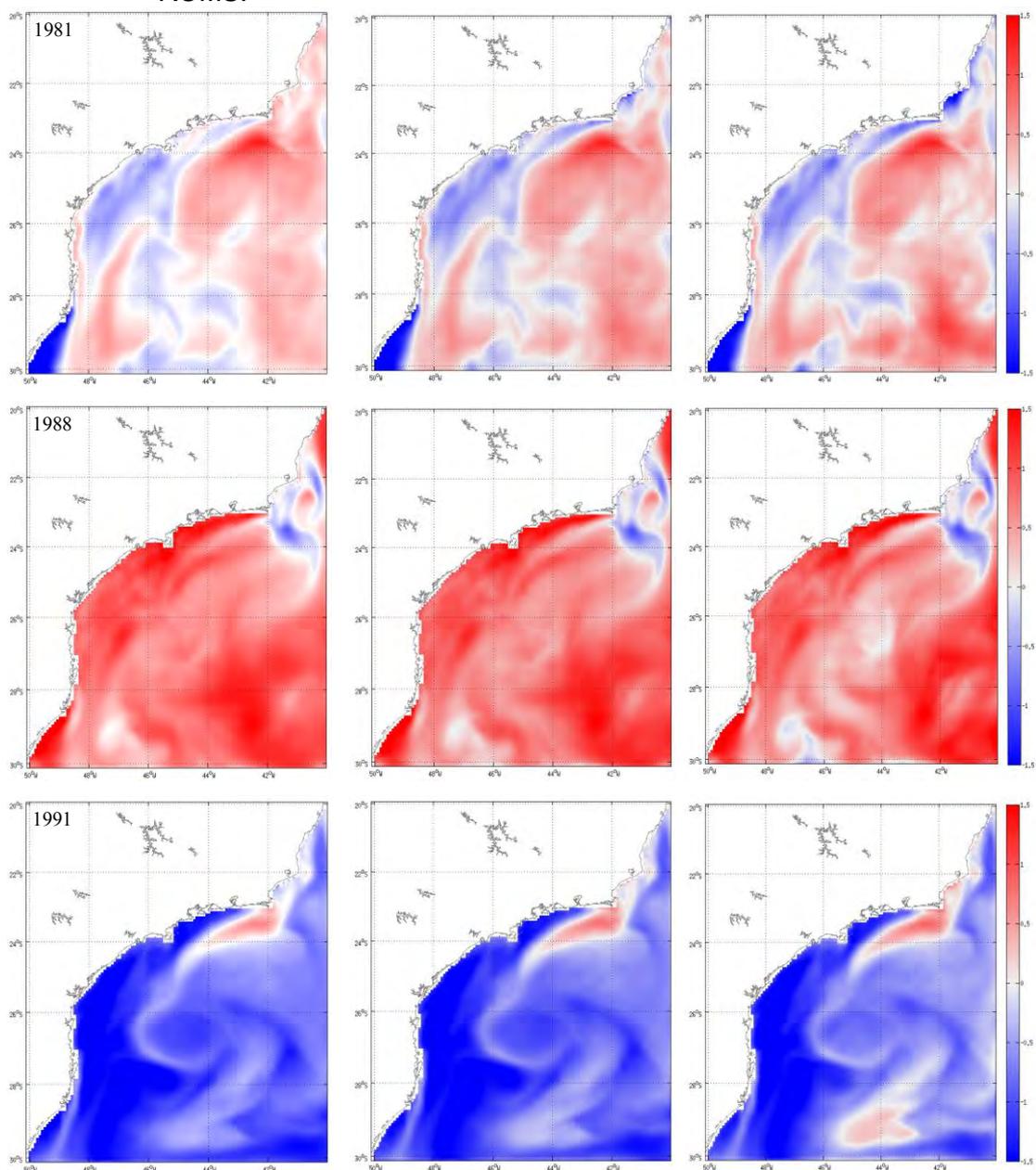


Figura 4.8 – continuação.

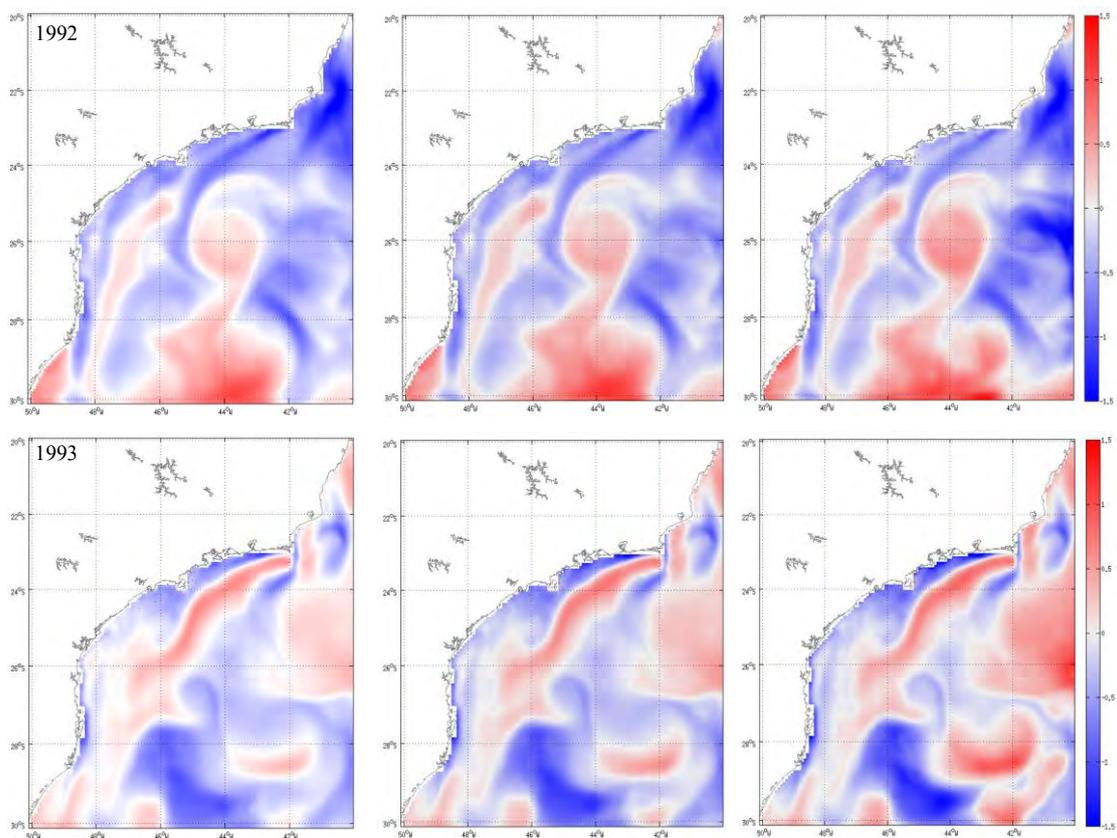


Figura 4.8 – continuação.

Através dos perfis TS para os verões dos seis anos estudados (Figura 4.9), pode-se verificar como as massas d'água influenciaram as características das águas sobre a plataforma. A AC esteve menos atuante nos verões de 1988 e de 1992, pois o vértice do diagrama TS que corresponde a essa água (temperaturas altas e salinidades baixas) não está presente, como acontece nas outras datas. O verão de 1988 foi um período de baixa pluviosidade, o que pode estar relacionado à menor presença da AC (CASTRO, 1996). A AT é transportada para sul-sudoeste na camada superficial da CB, sobre o talude, na quebra de plataforma. O volume dessa massa de água presente na plataforma continental está relacionado às intrusões da CB em direção à costa. Os verões de 1980 e 1993 foram aqueles em que a AT esteve mais atuante, o que pode ser notado pelo vértice correspondente a essa água estar mais alongado nesses anos. A ACAS esteve presente nas águas de plataforma nos

seis verões e apresentou pouca variação. Apenas nos anos de 1981 e 1991 nota-se que há uma menor interação entre a ACAS e a AC, devido ao formato dos seus diagramas TS não ser triangular, como ocorre nos outros anos. Isso pode ser um indicativo da menos penetração da ACAS nas águas da plataforma (CASTRO et al., 2006).

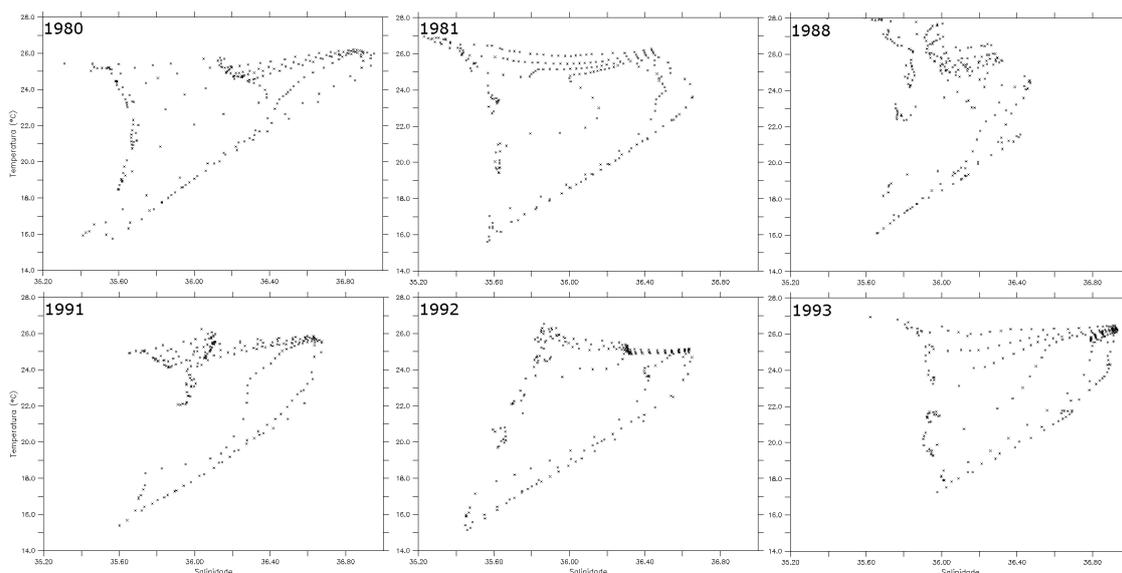


Figura 4.9 – Diagramas TS (médias mensais) ao longo da latitude  $24^{\circ}\text{S}$ , entre as longitude de  $47^{\circ}\text{W}$  e  $43^{\circ}\text{W}$ , em profundidades de até 100 m, para janeiro dos anos analisados.

O padrão de circulação superficial para os verões dos anos estudados encontra-se na Figura 4.10, que também apresenta maiores detalhes da circulação para a região costeira entre São Sebastião e Paranaguá. Essa região foi escolhida para detalhe porque as mais prováveis áreas de desova da sardinha-verdadeira estão aí inseridas (GIGLIOTTI et al., 2010). Nota-se a presença de diversos vórtices e meandros ao longo da CB, sendo essa atividade de vórtices menor para os anos de 1981 e 1988. Ainda, o ano de 1988 apresenta um enfraquecimento na intensidade da CB. Pelos mapas da circulação entre São Sebastião e Paranaguá nota-se, no geral, a presença de uma grande célula de circulação ciclônica, que aparece com menor intensidade nos anos de 1988 e 1993.

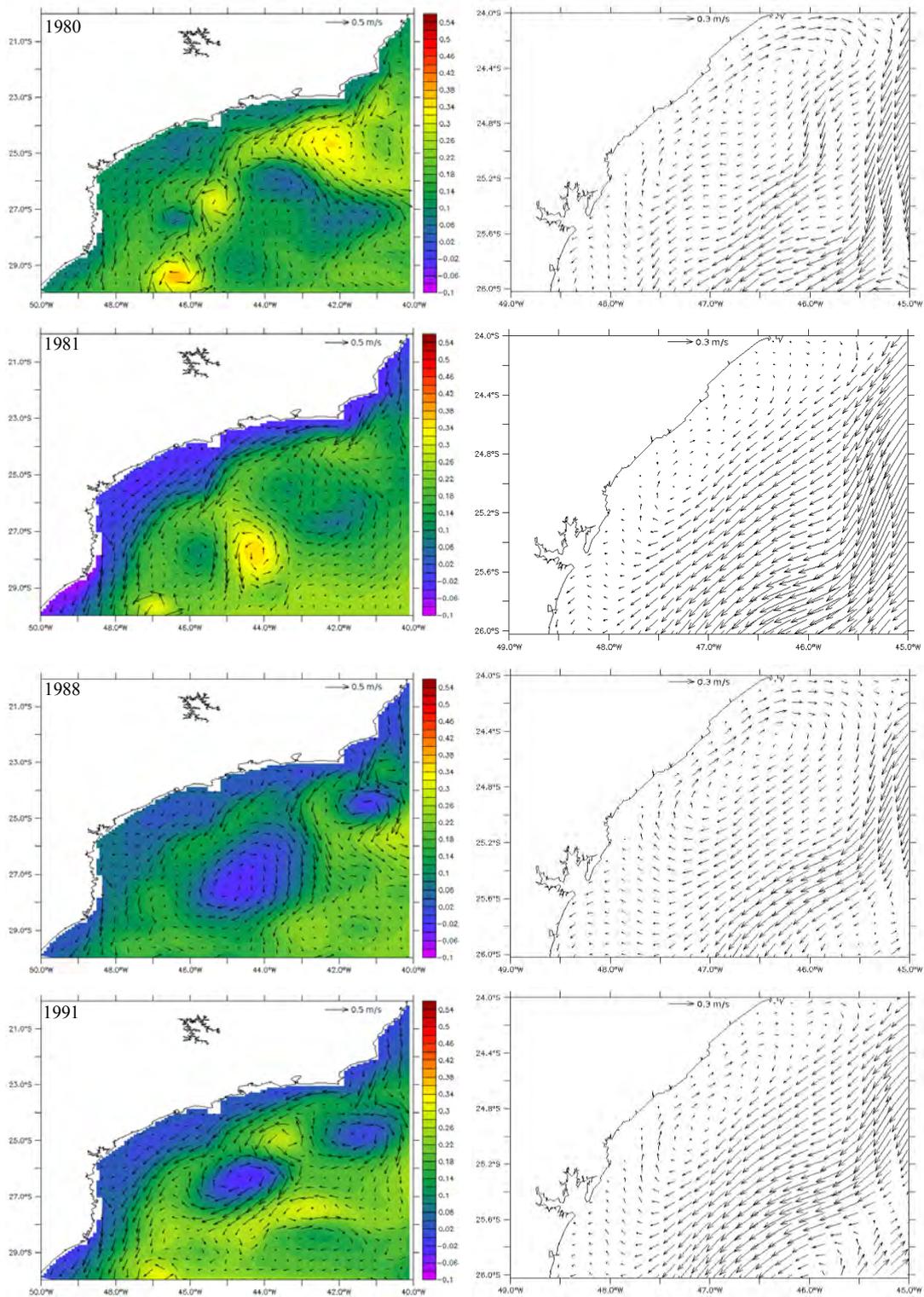


Figura 4.10 – Campos de correntes superficiais (vetores) sobrepostos às ASM para todo o domínio (esquerda) e detalhe dos vetores de corrente superficial para a região entre São Sebastião e Paranaguá (direita), para os anos analisados

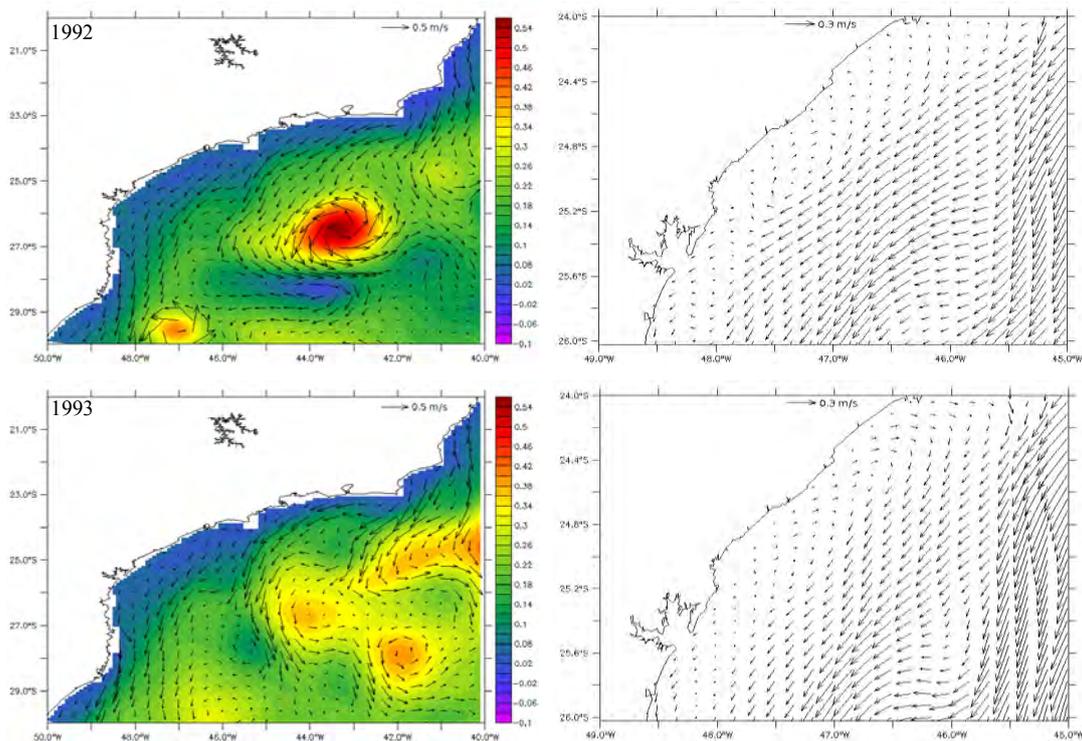


Figura 4.10 – continuação.

### 4.3. Análise biofísica

#### 4.3.1. Distribuição espacial das larvas: dados reais e simulados

Os mapas da distribuição espacial das larvas sobreviventes após o período de 45 dias em que realizou os experimentos RZR e RZP (Figura 4.11 e Figura 4.12, respectivamente) mostram poucas diferenças com relação à concentração e à localização final delas entre os experimentos. No experimento RZP observa-se uma tendência para um agrupamento das larvas em direção ao sul do domínio, com maiores densidades na região entre Paranaguá ( $25^{\circ}30'S$ ) e o Norte da Ilha de Florianópolis ( $27^{\circ}S$ ). No experimento RZR, as maiores densidades encontram-se na costa do Estado de São Paulo, principalmente ao Sul da Ilha de São Sebastião ( $24^{\circ}S$ ).

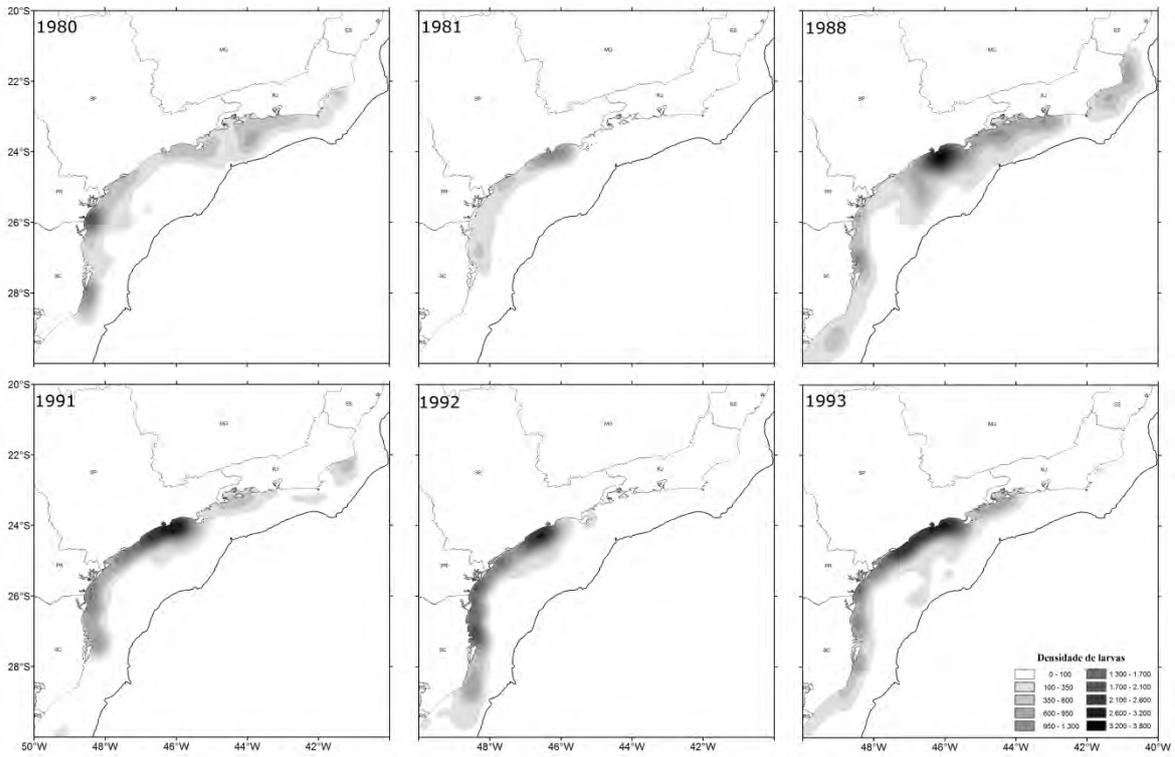


Figura 4.11 – Densidade de kernel para as larvas sobreviventes após 45 dias do experimento RZR.

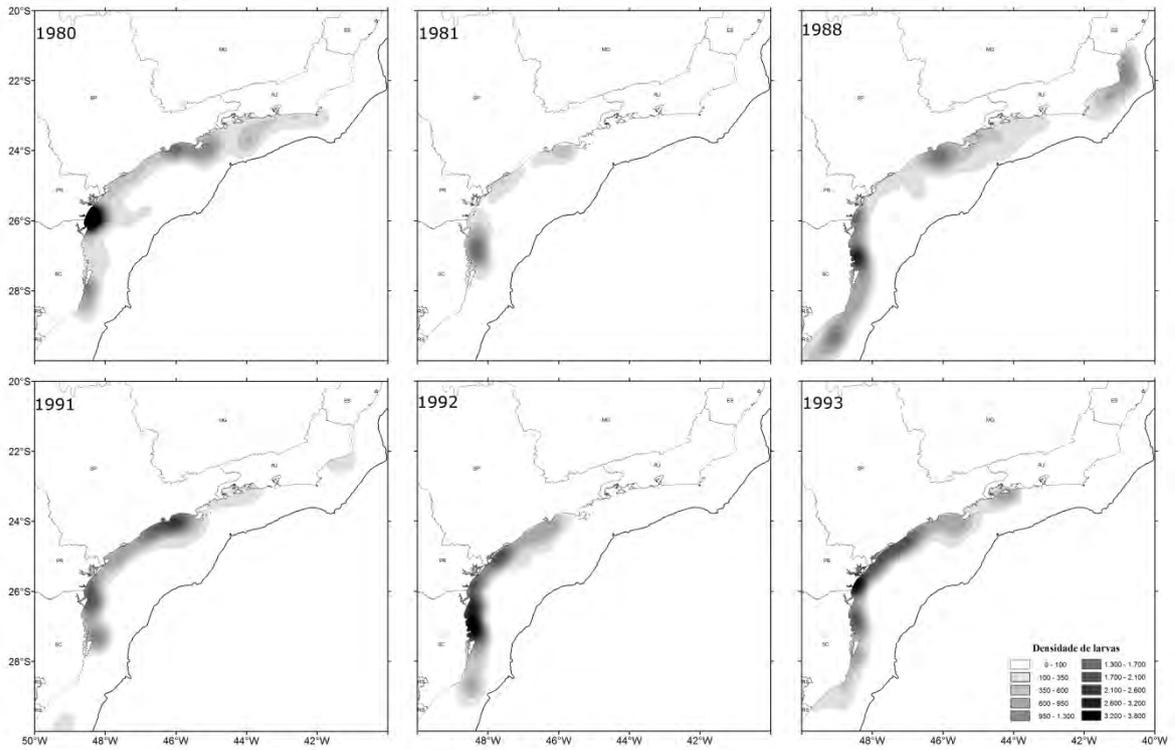


Figura 4.12 – Densidade de kernel para as larvas sobreviventes após 45 dias do experimento RZP.

O padrão de distribuição espacial das larvas nos dois experimentos foi semelhante somente para janeiro de 1980, porém com um número menor de larvas sobreviventes no experimento aleatório RZR. Apesar dessas diferenças, em ambos os experimentos houve um padrão de retenção costeira das larvas sobreviventes, com as maiores densidades localizadas abaixo da isóbata de 50 m.

Comparando-se os resultados dos experimentos com os dados coletados nos cruzeiros, há grande semelhança na distribuição espacial em termos de presença e ausência de larvas. De uma maneira geral, os dados coletados nos cruzeiros oceanográficos apresentam as maiores concentrações de larvas na parte sul do domínio, principalmente entre Paranaguá e Florianópolis, e na parte central, ao sul da Ilha de São Sebastião (Figura 4.13), padrão este também verificado nos dados simulados. Porém, apesar de as localizações dos agrupamentos serem parecidas, os dados simulados apresentaram um padrão mais costeiro do que os dados coletados.

O padrão de distribuição espacial das larvas coletadas em 1980 apresenta dois agrupamentos principais: um localizado ao Sul, ao largo da região entre Paranaguá e o Norte da Ilha de Florianópolis, com maiores densidades; e outro na parte central, nos arredores da Ilha de São Sebastião, com um padrão mais costeiro e com menores densidades. Esses dois agrupamentos foram reproduzidos nos dados simulados, porém as maiores densidades estão mais próximas à costa, em especial na parte Sul. Foram ainda encontrados dois agrupamentos nos dados simulados que não estão presentes nos dados reais: um ao Sul da Ilha de Florianópolis, costeiro (entre 27°50'S e 28°30'S) e outro nos arredores da Ilha Grande (23°S), com um pico densidades localizado ao largo.

Em 1981, há também um agrupamento na parte central e outro ao Sul tanto nos dados reais quanto nos simulados, como o padrão geral acima citado. Porém, os dados reais apresentam as maiores densidades na região mais ao

largo, entre as isóbatas de 50 m e 100 m, enquanto que os simulados apresentam o pico dos valores de densidade abaixo da isóbata dos 50 m. Há ainda um agrupamento, nos dados reais, localizado bem próximo à costa, ao sul do Rio de Janeiro (23°S), não reproduzido nos dados simulados.

A distribuição espacial das larvas coletadas em 1988 apresentou um padrão bem mais costeiro e distribuído ao longo de todo o domínio, desde Cabo Frio (22°50'S) até o Cabo de Santa Marta Grande (28°30'S), com um agrupamento localizado nos arredores da Ilha de Florianópolis e outro bem costeiro entre Santos e Paranaguá, com um pico localizado mais ao Sul. Os dados simulados apresentaram máximos de densidades nos arredores da Ilha de Florianópolis, como apresentado nos dados reais, em frente à Paranaguá e outro próximo à Santos. Porém, entre esses dois últimos, há valores baixos de densidade, diferente dos dados reais. Ainda apresentaram outros dois picos nos extremos do domínio que não representados nos dados reais: um em Cabo Frio e outro ao Sul do Cabo de Santa Marta Grande (29°S).

Em 1991, os dados reais apresentaram três principais agrupamentos: um ao Norte, bem costeiro, entre Cabo Frio e Rio de Janeiro, um no centro, ao largo da Baixada Santista (entre 24°S e 24°30'S) e outro mais ao Sul, nos arredores da Ilha de Florianópolis (entre 26°S e 28°S), também mais ao largo. Esses dois últimos agrupamentos foram reproduzidos nos dados simulados, porém com um padrão mais costeiro e mais ao Norte.

Em 1992, há uma grande concentração de larvas na parte Sul do domínio (entre 25°20'S e 28°S), desde a costa até as proximidades da isóbata de 200 m e outro ao largo da Ilha de São Sebastião (aproximadamente em 25°S e 44°30'O). Nos dados simulados, novamente, o padrão foi bem mais costeiro, havendo também um pico de densidades ao Sul e outro na parte central, porém ambos não ultrapassam a isóbata de 50 m.

Por fim, o padrão espacial das larvas coletadas em 1993 apresenta um grande agrupamento das larvas na parte central do domínio, entre o Norte da Ilha de

São Sebastião até as proximidades de Santos, que também se estende até aproximadamente a isóbata dos 200 m, mas com maiores concentrações até os 100 m. Além desse, há outros agrupamentos menores em frente à Paranaguá e ao largo da Ilha de Florianópolis. Os dados simulados capturam esse padrão, porém com as maiores densidades sempre abaixo da isóbata dos 50 m.

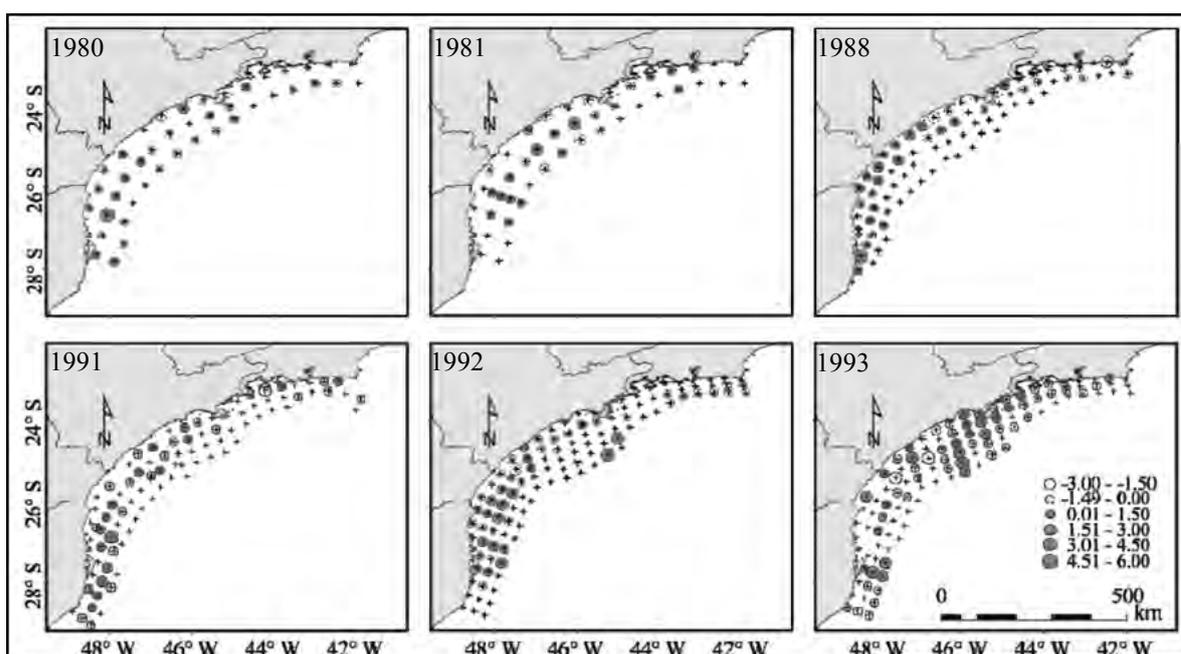


Figura 4.13 – densidade de larvas ( $\text{ind.m}^{-2}$ ) coletadas nos anos estudados. Fonte: Moraes et al. (2012) (modificado).

#### 4.3.2. Influência da variabilidade espacial da desova sobre a mortalidade das larvas

Neste item analisou-se como a variabilidade espacial da desova influencia na sobrevivência e nas taxas de mortalidade finais das larvas.

O primeiro teste realizado comparou os resultados de sobrevivência e mortalidade finais para a desova ocorrendo aleatoriamente ao longo da costa (experimento RZR – Figura 3.2a) e nas principais áreas de desova conhecidas da PCSE, de acordo com Gigliotti et al (2010) (experimento RZP – Figura 3.2b). As amostras utilizadas para a aplicação do teste, para as três variáveis

analisadas (sobrevivência, mortalidade por temperatura e perdas por advecção) encontram-se na Tabela 4.1. Observa-se nessa tabela que os resultados apresentam um padrão de a sobrevivência ser superior às outras variáveis analisadas na maior parte das amostras. A única exceção apresenta-se na amostra de 1981, quando o resultado da sobrevivência apresenta-se menor que ambas fontes de mortalidade, em especial a por temperatura.

Tabela 4.1 – Amostras utilizadas na aplicação da ANOVA para as três variáveis. Os valores estão em porcentagem.

Amostras	Sobrevivência		Mortalidade por temperatura		Perdas por advecção	
	RZR	RZP	RZR	RZP	RZR	RZP
1980	40,3	59,4	41,0	12,0	18,8	28,6
1981	14,6	14,0	62,2	56,9	23,3	29,2
1988	71,2	61,6	1,3	1,9	27,5	36,6
1991	55,3	45,4	18,4	22,3	26,3	32,2
1992	53,9	51,3	37,3	21,3	8,8	27,4
1993	67,7	57,8	2,3	9,3	30,0	32,9

Os resultados da análise de variância demonstram que, a um nível de significância de 5%, tanto para a sobrevivência final das larvas ( $p = 0,84$ ), quanto para a mortalidade por temperatura ( $p = 0,62$ ), não há diferença significativa caso a desova ocorra aleatoriamente ao longo da costa (RZR) ou ocorra nas áreas de maior probabilidade de presença de ovos (RZP). Já a perda por advecção apresenta-se significativamente diferente ( $p = 0,03$ ) entre essas duas estratégias de desova, sendo maior em RZP. Esse padrão fica mais evidente com a análise do *boxplot* das amostras. Há uma sobreposição dos entalhes dos *boxplots* correspondentes a RZR e RZP para a sobrevivência e para a mortalidade por temperatura, evidenciando que não há diferença significativa entre as de desova analisadas para as variáveis supramencionadas, enquanto que os entalhes das perdas por advecção não se

sobrepoem, indicando haver diferença entre RZR e RZP para essa variável (Figura 4.14a).

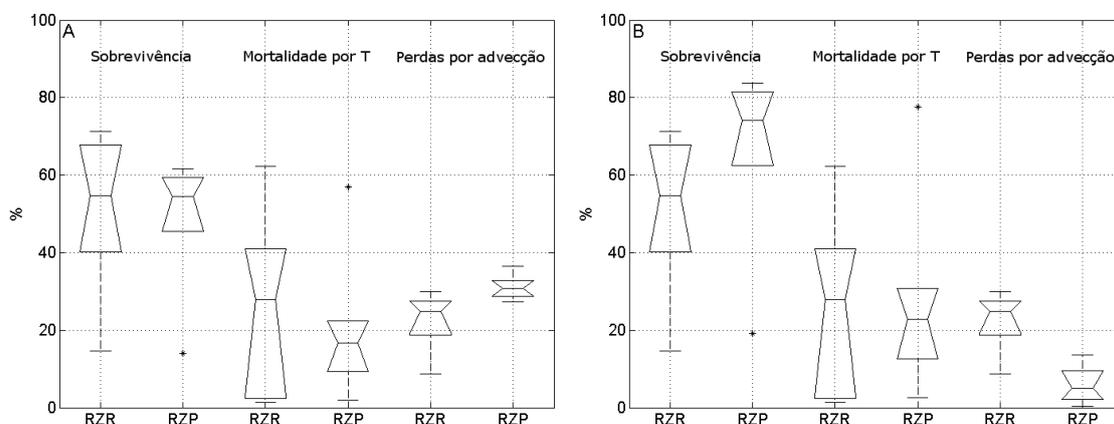


Figura 4.14 – boxplot das variáveis três variáveis analisadas (sobrevivência, mortalidade por temperatura e perdas por advecção), para os dois experimento (RZR e RZP), considerando as cinco áreas de desova em RZP (A) e excluindo-se RZP1 (B).

A análise do *boxplot* permite observar algumas características importantes na relação entre as duas estratégias de desova analisadas e o resultado para sobrevivência, mortalidade por temperatura e perdas por advecção. A sobrevivência para RZR apresentou um valor máximo maior (71,2% contra 61,6% em RZP), bem como a mortalidade por temperatura (62,2% contra 56,9% em RZP). Já as perdas por advecção são maiores em RZP (36,6% contra 30% em RZR). Em relação à dispersão dos valores, esta é maior em RZR do que em RZP, para as três variáveis analisadas. Para verificar as diferenças para as três variáveis analisadas entre as cinco áreas de desova consideradas em RZP (Figura 3.2b e Tabela 3.4) foi realizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Os resultados demonstram que ao menos uma das áreas de desova apresenta-se significativamente diferente das outras em termos de proporção de sobrevivência e mortalidade finais das larvas cujos ovos foram lançados nessas regiões (sobrevivência –  $p = 0,004$ ; mortalidade por temperatura –  $p = 0,007$  e perdas por advecção –  $p = 9,3e-05$ ). Analisado os *boxplots* para as três variáveis, essa diferença fica bastante evidente (Figura 4.18), onde nota-se que tanto para a sobrevivência quanto para a mortalidade

por temperatura, os valores em RZP1 são muito baixos (menores que 1%), enquanto que nas perdas por advecção esses valores são bem superiores às outras regiões (maiores que 99%).

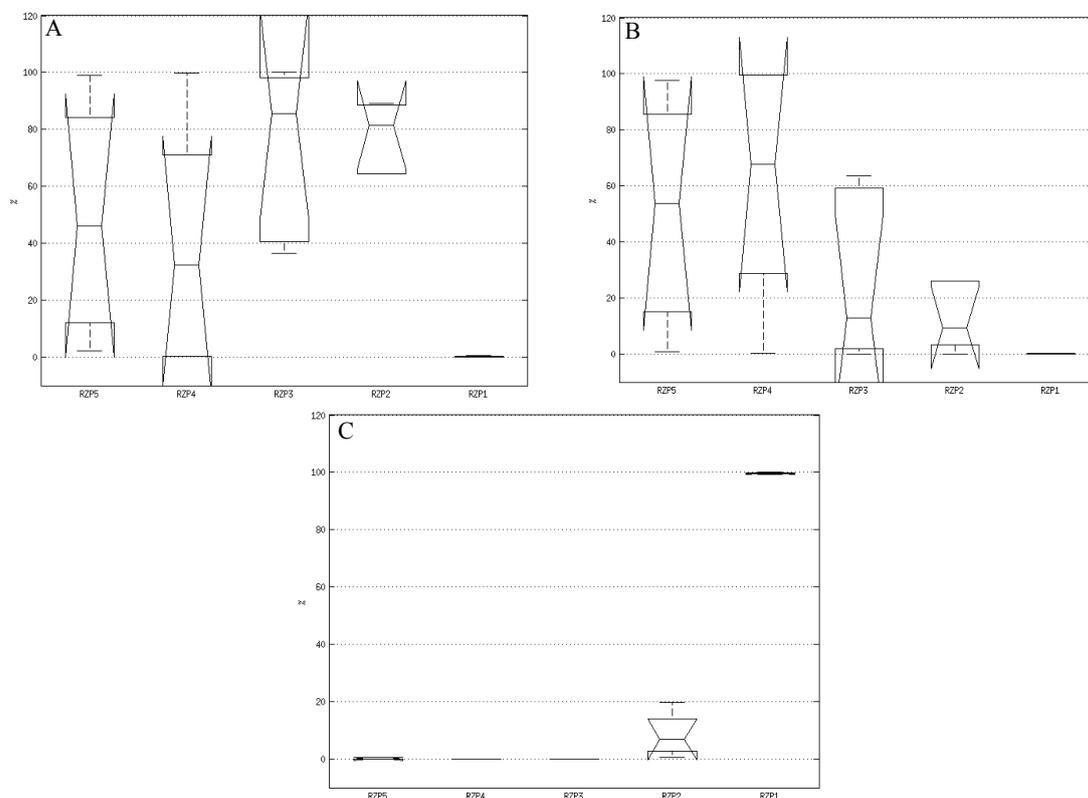


Figura 4.15 – boxplot dos resultados para sobrevivência (A), mortalidade por temperatura (B) e perdas por advecção (C).

Para verificar estatisticamente quais das áreas se diferenciavam foi aplicado o teste de Tukey, que confirmou que a RZP1 apresentou-se diferente das demais, nos três casos analisados (Figura 4.16a, Figura 4.16b e Figura 4.16c). Aplicando-se novamente o teste para verificar a diferença entre as médias das regiões para cada uma das variáveis, porém excluindo-se RZP1, observa-se que para a sobrevivência e para a mortalidade por temperatura as quatro regiões restantes não se diferenciam (sobrevivência –  $p = 0,32$ ; mortalidade por temperatura –  $p = 0,21$ ). Somente para as perdas por advecção que a região RZP2 diferencia-se ( $p = 0,003$ ), o que pôde ser verificado pelo *boxplot* dessa variável (Figura 4.17) e resultado do teste de Tukey (Figura 4.16d). Através do

*boxplot*, observa-se que a perda por advecção em RZP2 apresenta um valor máximo de 19,8%, contra valores menores que 1% para as outras três regiões de desova.

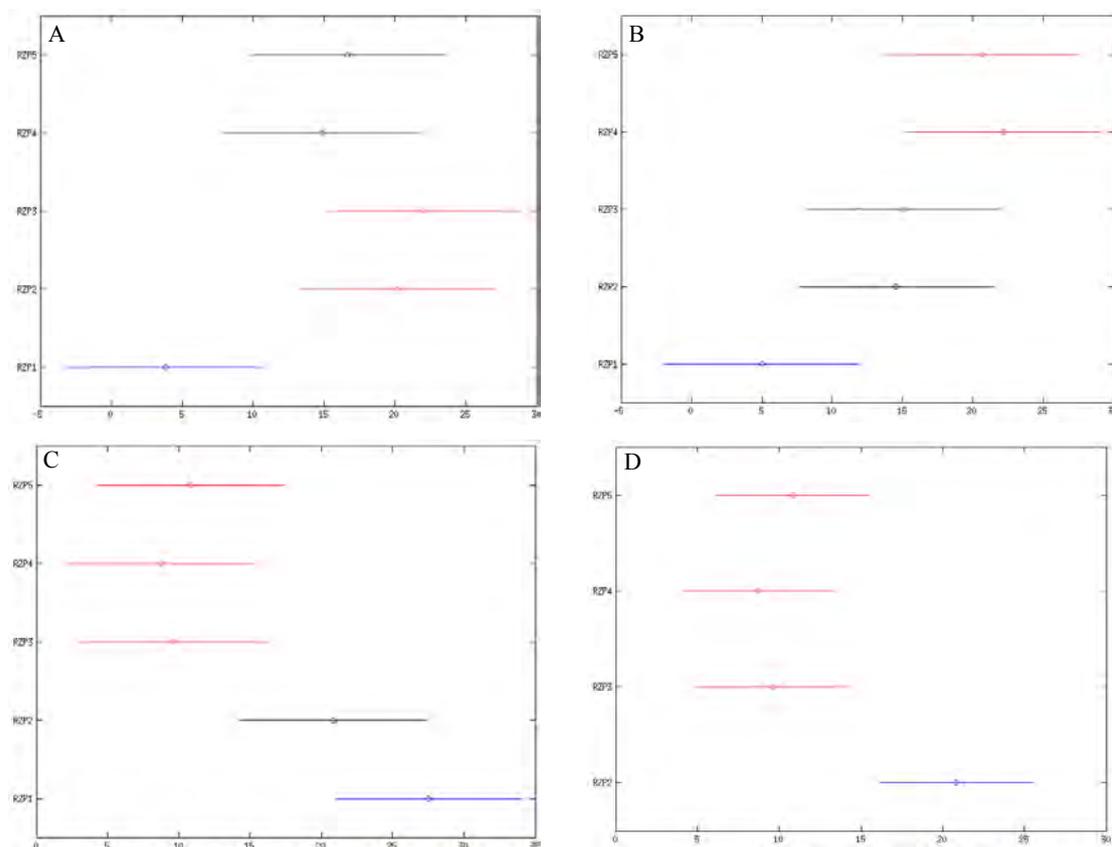


Figura 4.16 – teste de Tukey entre as cinco áreas de desova para sobrevivência (A), mortalidade por temperatura (B) e perdas por advecção (C) e excluindo-se a RZP1 para advecção (D). Em azul, a área de desova que está sendo testada e em vermelho aquelas que se diferenciam da área testada.

Com essa informação, a diferença entre os resultados de RZR e RZP, excluindo-se as larvas cujos ovos foram lançados na área de desova RZP1, foi testada. Os resultados mostram que, novamente, as médias entre as amostras de sobrevivência e mortalidade por temperatura não apresentam diferença significativa ( $p = 0,26$  e  $p = 0,94$ , respectivamente), enquanto que as perdas por advecção apresentam diferenças significativas ( $p = 0,001$ ). Apesar de as médias não se diferenciarem, é possível observar nos *boxplots* (Figura 4.14b) que as proporções de sobreviventes são consideravelmente maiores no

experimento RZP (o máximo é de 84% em RZP contra 71% em RZR e o mínimo está em 19% contra 14,5%, respectivamente). As médias também são maiores em RZP, que é 74,2% contra 54,6% em RZR, enquanto que as perdas por advecção são consideravelmente inferiores em RZP (máximo de 13% contra 30% em RZR e mínimo de 0,4% contra 8,7%, respectivamente).

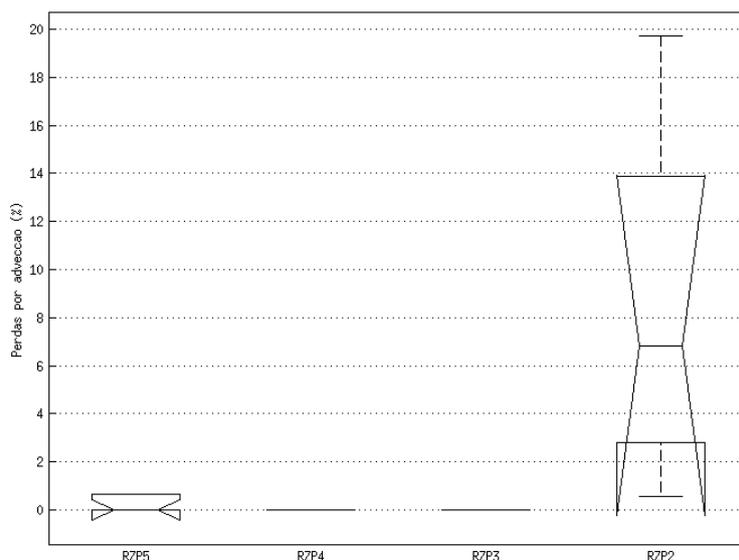


Figura 4.17 – perdas por advecção, por RZP excluindo-se RZP1.

### 4.3.3. Variabilidade interanual da desova

O resultado da análise de ordenação por escalonamento multidimensional não-paramétrico dos anos de simulação para os experimentos RZR e RZP mostram que a similaridade entre os anos é menor em RZR do que em RZP (Figura 4.18). Comparando-se a variabilidade interanual entre as duas estratégias de desova, os resultados de RZP mostram a formação de um grupo único no espaço MDS, composto por cinco dos seis anos analisados (1980, 1988, 1991, 1992 e 1993), evidenciando a maior similaridade entre os resultados (Figura 4.18b). Já em RZR há uma maior variação, sendo que o grupo formado nesse caso é composto por três dos seis anos testados (1988, 1991 e 1993) (Figura 4.18a). A dispersão entre dos valores das variáveis ao longo dos anos pode ser verificada por meio do cálculo do desvio padrão desses dados. Em RZR há um maior valor de desvio padrão do que em RZP, indicando que a dispersão dos

valores ao longo dos anos é maior (24,03% contra 19,35% para mortalidade por temperatura; 7,73% contra 3,40% para perdas por advecção; e 20,78% contra 17,81% para sobrevivência).

Nota-se claramente que o ano de 1981 foi aquele que apresentou as maiores diferenças em relação aos outros, tanto para RZP quanto para RZR, bem como foi aquele que está mais afastado do ano hipotético considerado “Ideal” (com sobrevivência final das larvas de 100%). De fato, 1981 apresentou altas taxas de mortalidade por temperatura, maiores do que aquelas apresentadas para os outros cinco anos, como pode ser observado na Figura 4.19 e na Figura 4.20 (62,2% contra taxas menores de 40% nos outros anos, para RZR e 56,9% contra menores de 23%, em RZP) e, conseqüentemente, a sobrevivência foi bem mais baixa (cerca de 14% para ambos os casos contra taxas sempre maiores que 40%). Os anos que mais se aproximaram do “Ideal” foram 1988 e 1993, para ambos os casos, com taxas de sobrevivência de 71,2% e 67,7%, respectivamente, em RZR e 61,6% e 57,8%, em RZP.

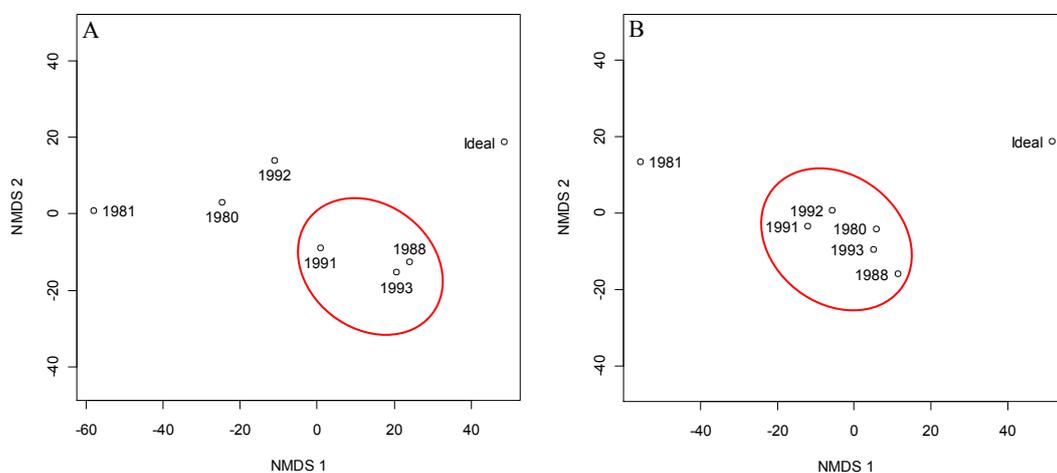


Figura 4.18 – Análise de escalonamento multidimensional para (A) RZR e (B) RZP. Os eixos das abscissas e das ordenadas indicam os valores de dissimilaridade entre as amostras. Quanto mais próximo um ponto do outro, maior a similaridade entre eles.

O ano de 1980 aparece como a maior diferença entre as análises MDS para as duas estratégias de desova: enquanto em RZR este ano está mais distante do

“ideal”, apresentando uma menor taxa de sobrevivência e alta taxa de mortalidade por temperatura (40,3% e 41%, respectivamente), em RZP este ano apresenta-se bem próximo a 1988 e 1993 (considerados os mais propícios para sobrevivência, como discutido acima), com taxas de sobrevivência de 59,4% e de mortalidade por temperatura de 12%.

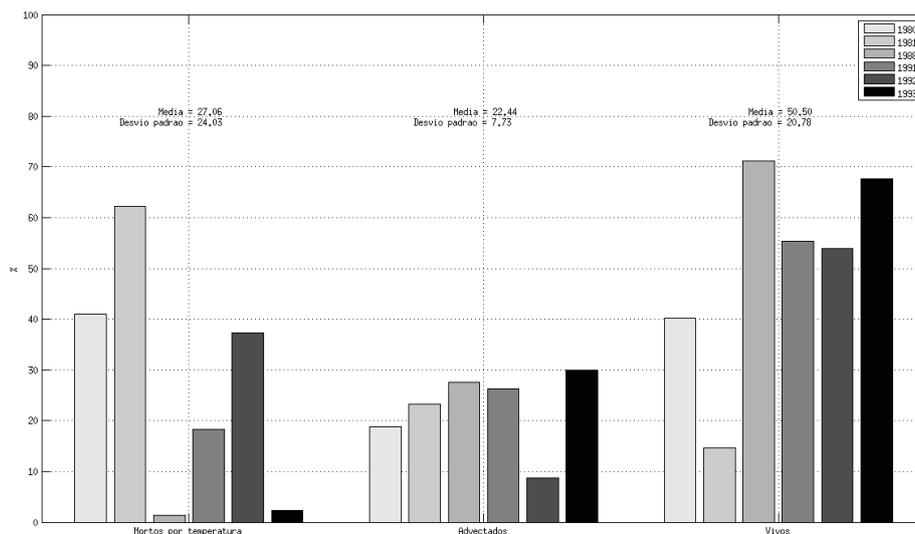


Figura 4.19 – proporção total de indivíduos mortos por temperatura, advectados para fora do habitat de desova e sobreviventes, ao longo dos seis anos de estudo, para o experimento RZR.

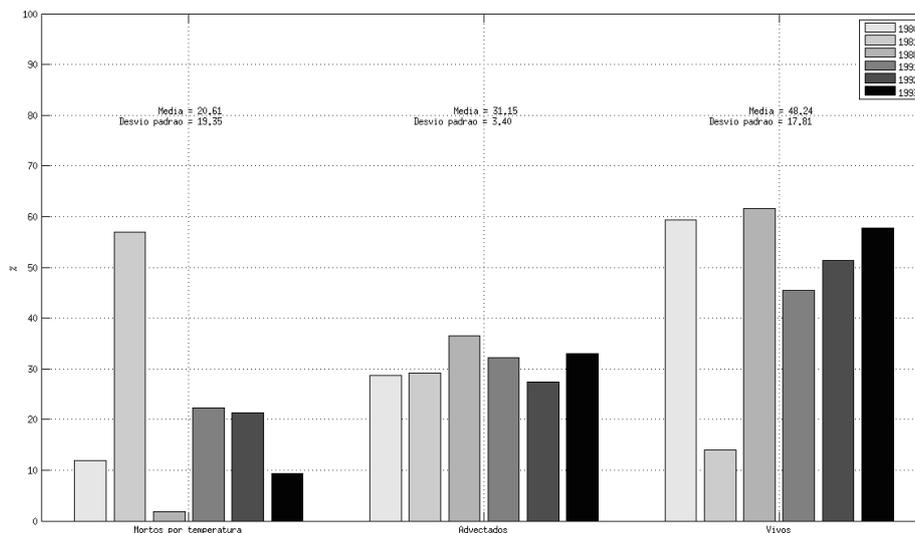


Figura 4.20 – proporção total de indivíduos mortos por temperatura, advectados e sobreviventes, ao longo dos seis anos de estudo, para o experimento RZP.

Dentre as variáveis, a perda por advecção é aquela que apresenta a menor dispersão dos valores entre os anos, com baixos valores de desvio padrão (7,73% em RZR e 3,40% em RZP). Isso é um indício de que a sobrevivência final das larvas de sardinha-verdadeira está intimamente relacionada à variabilidade da temperatura da água, pois os valores de desvio padrão das taxas de sobrevivência e de mortalidade por temperatura são altos e estão bem próximos (20,78% e 24,03%, respectivamente, em RZR e 17,81% e 19,35% em RZP).

A Figura 4.21 e a Figura 4.22 mostram como a sobrevivência das larvas nos seis anos estudados varia em função do tempo, para RZR e RZP, respectivamente. Para RZR, nota-se que a taxa de sobrevivência apresenta-se maior nos primeiros 15 dias de experimento, para os seis anos analisados. Já em RZP, esse padrão se repete, excetuando-se os anos de 1981 e 1988, que apresentam a maior queda na taxa de sobrevivência entre 18 e 25 dias.

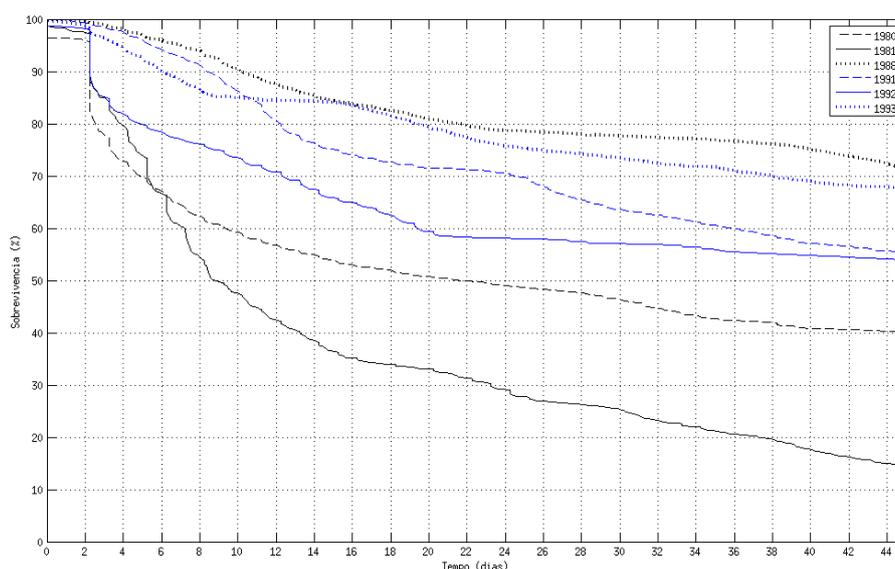


Figura 4.21 – Sobrevivência em função do tempo do experimento ao longo de 45 dias, para os seis anos estudados e para o experimento RZR

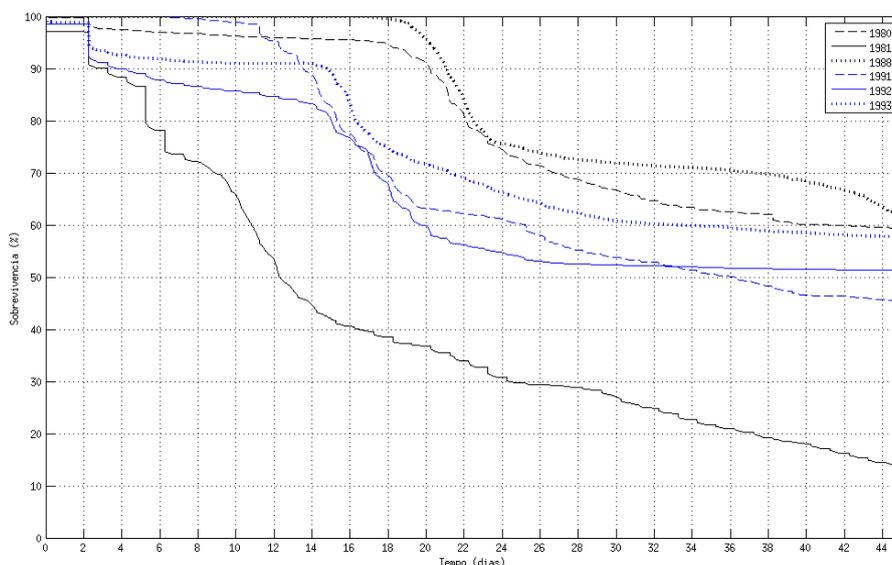


Figura 4.22 – Sobrevivência em função do tempo do experimento ao longo de 45 dias, para os seis anos estudados e para o experimento RZP

#### 4.3.4. Variabilidade interanual e espacial da desova

As regiões de desova localizadas mais ao Sul do domínio (RZP3 e RZP2) foram aquelas que apresentaram as maiores taxas de sobrevivência ao longo dos anos analisados, enquanto que as regiões ao Norte (RZP5 e RZP4) apresentaram as maiores mortalidades por temperatura. As exceções a esse padrão dentre os anos estão em 1980 e em 1988. No primeiro caso, há uma alta taxa de mortalidade por temperatura em RZP3 (59,3%) e alta sobrevivência em RZP5 e RZP4 (84,3% e 71,1%, respectivamente) (Figura 4.23). Já em 1988, há uma alta taxa de sobrevivência nessas quatro regiões (99% em RZP5 e RZP4; 98% em RZP3 e 77% em RZP2).

A maior discrepância encontrada entre as regiões está em RZP1, onde quase que a totalidade das larvas cujos ovos foram lançados nessa região de desova foram perdidas por advecção (>99%), padrão este repetido para os seis anos estudados (Figura 4.23c).

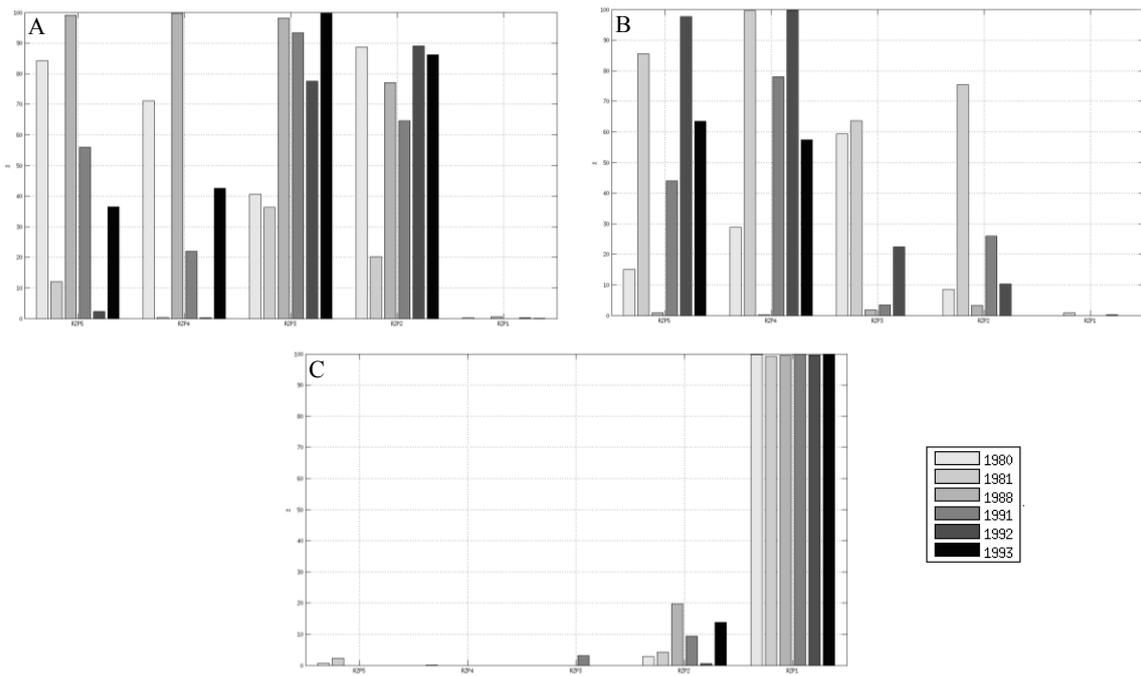


Figura 4.23 – sobrevivência (A), mortalidade por temperatura (B) e perdas por advecção (C) por RZP e por ano

## 5 DISCUSSÃO

### 5.1. Desempenho dos modelos

As soluções obtidas pelo modelo hidrodinâmico representaram os principais processos físicos e características termohalinas observadas sobre a PCSE e o talude. A análise das soluções do modelo para a TSM permitiu verificar que o modelo representou os principais processos em superfície da PCSE, como a CB, a ressurgência costeira de Cabo Frio e a CCB (Figura 4.1a). Além disso, através das médias sazonais, verificou-se que a variabilidade sazonal dos principais processos atuantes sobre a região foi representada (Figura 4.3a e Figura 4.3b): a intensificação da ressurgência costeira de Cabo Frio e da CB no verão (SILVEIRA et al, 2000) e a CCB, no inverno (intrusão de águas costeiras frias, próximo ao Cabo de Santa Marta) (SOUZA e ROBINSON, 2003). As maiores diferenças encontradas, tanto para a média sazonal quanto para a anual, estão para a região costeira, principalmente na região de influência da ressurgência de Cabo Frio (Figura 4.2c, Figura 4.3c e Figura 4.4c). A incerteza das medidas de satélite próximas à costa, devido à contaminação por nuvens, pode explicar essas diferenças. A influência da ZCAS na região onde as maiores diferenças foram encontradas (entre latitudes 21°S e 23°S) é um evento bastante conhecido. Ela é mais intensa durante o verão e é responsável por causar uma condição constante de nebulosidade sobre a área nessa época do ano (CHAVES e NOBRE, 2004; DE ALMEIDA et al., 2007). Além disso, a base de dados utilizada para comparação (BSST) utiliza apenas pixels com menor contaminação, para então ser realizada a interpolação espacial dos dados. Esse processo tende a reduzir os contrastes térmicos e a suavizar os gradientes, diminuindo o poder de detecção de feições oceanográficas caracterizadas por estes gradientes (como vórtices) e subestimar a variabilidade espaço-temporal dos campos de TSM (KILPATRICK et al., 2001). Diferenças semelhantes para a TSM em áreas de ressurgência, utilizando o ROMS, foram também observadas em estudos recentes para a Plataforma Continental Central-Sul do Chile (PARADA et al., 2012; YANICELLI et al.,

2012;) e para a área costeira do Brasil entre as latitudes 16°S e 22°S (SILVA et al., 2009).

Apesar das diferenças encontradas, no geral, as estruturas e os valores de TSM foram bem representados pelas soluções do modelo. De acordo com Castro e Miranda (1998), que compilaram informações de dados históricos da PCSE, durante o verão a maior parte das águas superficiais da PCSE possui temperatura entre 25 e 27° C. A parte Norte do domínio possui um gradiente horizontal de temperatura maior do que em outras partes e ainda possui uma orientação costa-plataforma, o que reflete a influência de uma ressurgência persistente. Já para o inverno, os valores da TSM variam de 20 a 23°C e o maior gradiente horizontal de temperatura passa a ser na parte Sul da PCSE, onde a penetração de águas mais frias provenientes do sul é evidente. A assinatura dessa água fria pode ser observada em toda a parte sul da PCSE, até as proximidades da Ilha de São Sebastião (latitude 24°S).

A atividade de mesoescala atuante sobre a região também foi capturada nas soluções do modelo, onde diversos meandros e vórtices foram representados ao longo da CB, o que pôde ser verificado pela análise da média anual nos campos de ASM. Apesar das diferenças encontradas entre os valores de ASM resultantes do modelo e extraídos do AVISO, a variabilidade espacial entre os dois campos ficou bastante consistente (Figura 4.5). Em profundidade, os diagramas TS resultantes do modelo mostram a interação das três massas de água presentes sobre a PCSE: AC, ACAS e AT (MIRANDA, 1982). Quando comparados com diagramas TS resultantes de coletas de campo, nota-se que o formato e os valores são bem parecidos e ainda conseguem reproduzir a variabilidade interanual dos anos de coleta (de 1985 a 1988) (CASTRO, 1996). Por fim, os perfis verticais de temperatura, salinidade e correntes meridionais também permitiram verificar a interação das massas de água da região, incluindo sua a variabilidade sazonal, além da circulação superficial e em profundidade. Esses fatores, em conjunto com outros já detalhados nesse

trabalho, nos deu confiança de utilizar os resultados do modelo hidrodinâmico no estudo de dispersão de ovos e larvas da sardinha-verdadeira.

A comparação entre a distribuição espacial das larvas da sardinha-verdadeira coletadas e a modeladas mostrou certa concordância em termos de presença e ausência em determinados locais ao longo dos anos estudados, com as maiores concentrações das larvas ocorrendo na parte Sul do domínio, principalmente entre Paranaguá e Florianópolis, e na parte central, ao sul da Ilha de São Sebastião, tanto para os dados reais quanto para os simulados. Apesar de as localizações dos agrupamentos serem parecidas, os dados simulados apresentaram-se mais costeiros do que os dados reais. Além disso, alguns agrupamentos que foram reproduzidos pelo modelo não foram encontrados nos dados reais, bem como em alguns anos os picos de máxima densidade entre os dados simulados e os reais não coincidiram. Essas discordâncias já foram reportadas para outras regiões em estudos utilizando o ROMS e o Ichthyop na verificação do transporte e retenção de ovos e larvas de pequenos pelágicos (BROCHIER et al., 2008a; PARADA et al., 2008; SOTO-MENDONZA et al., 2012) e podem estar relacionada à falta de conhecimento a respeito de informações biológicas das espécies, como predação e alimentação. Um fator importante que também tem que ser considerado, ao realizar essas comparações, está relacionado às escalas em que os dados de cruzeiro são coletados. As escalas dos processos de agregação de sardinhas e anchovas raramente ultrapassam 30 km (CURTIS, 2004; MAYNOU et al., 2008), sendo que para a sardinha-verdadeira essas escalas são estimadas entre 3 – 10 km (SPACH, 1990), enquanto que as escalas das coletas estão entre aproximadamente 40 – 50 km. Isso também pode causar essas diferenças, uma vez que possivelmente alguns processos relacionados à dinâmica do ictioplâncton não são capturados pelas coletas.

## 5.2. Estratégias espaciais de desova

Na PCSE há determinadas regiões que foram relatadas como potenciais áreas de desova para a sardinha-verdadeira, com base em presença de ovos em dados coletados por cruzeiros (GIGLIOTTI et al., 2010). Para verificar a potencialidade dessas regiões, primeiramente testou-se os resultados para os ovos lançados aleatoriamente ao longo da costa (experimento RZR) e para os ovos lançados nas regiões indicadas por Gigliotti et al. (2010) (experimento RZP). Os resultados mostram que, estatisticamente, não há diferença significativa para a sobrevivência e para a mortalidade por temperatura das larvas cuja desova ocorreu nessas duas estratégias. Esses resultados sugerem que não haveria vantagem para a espécie desenvolver uma estratégia de desova que priorizasse certas regiões da PCSE em detrimento de outras. Porém, foi mostrado aqui que a desova a partir de áreas específicas apresentou uma dispersão menor nos seus valores de mortalidade, sobrevivência e perdas por advecção, do que a desova em áreas aleatórias. Isso faz com que a sobrevivência ao longo dos anos apresente menor variabilidade entre os anos testados, sendo um indício inicial de que a estratégia de desova em RZP seria mais eficiente para a sobrevivência das larvas. Outro fato a ser considerado relaciona-se às diferenças encontradas entre as áreas de desova testadas no experimento RZP: dentre as cinco áreas testadas, a região localizada ao Sul do domínio, *offshore* do Cabo de Santa Marta (RZP1) apresentou grandes diferenças em relação às outras quatro, em especial no quesito “perdas por advecção” que foram sempre maiores que 99%, indicando que esta não é uma região propícia à desova. Nesse local, o padrão de circulação superficial sobre a PCSE (NE-SE) faz com que os ovos lançados nessa área sejam advectados para sul. De fato, as perdas por advecção apresentaram-se significativamente diferentes entre os experimentos RZR e RZP. Por isso, realizou-se outro teste considerando essas duas estratégias de desova, porém, excluindo os resultados das larvas lançadas em RZP1 (no experimento RZP). Os resultados mostram que, apesar de as médias

não se diferenciarem, as proporções de sobreviventes são consideravelmente maiores no experimento RZP (o máximo é de 84% em RZP contra 71% em RZR e o mínimo está em 19% contra 14,5%, respectivamente), bem como as médias da sobrevivência (74,2% contra 54,6% em RZR). Já as perdas por advecção são consideravelmente inferiores em RZP (máximo de 13% contra 30% em RZR e mínimo de 0,4% contra 8,7%, respectivamente) (Figura 4.14).

Já é bastante conhecida e relatada na literatura a tendência dos adultos das populações de pequenos pelágicos se agregarem na hora da desova. Bellier et al. (2007) demonstraram que a distribuição dos ovos da *Sardina pilchardus* na Baía de Biscay (França) ocorre em pequenas machas distribuídas ao longo da costa e essas áreas podem mudar de tamanho ano a ano, a depender da variabilidade interanual dos fenômenos de mesoescala, como a ressurgência costeira e os vórtices. Ainda, Le-Fur e Simon (2009) sugerem que as agregações observadas para pequenos pelágicos podem refletir o histórico de sucessivos eventos de desova da população. No contexto da sardinha-verdadeira, Moraes et al. (2012) mostraram que as agregações dos ovos dessa espécie tendem a se estruturarem em escalas espaciais médias (50 a 100 km) e locais (<50 km).

Os resultados aqui apresentados, em termos de sobrevivência das larvas para as duas estratégias testadas, e as evidências reportadas na literatura, nos levam a crer que a sardinha-verdadeira possui ambientes mais favoráveis para a desova ao longo PCSE, que são determinados pelas características termodinâmicas da região (ver seção 5.4). A correta localização das áreas de desova e o período de início da desova são vitais para a sobrevivência nos primeiros estágios de vida dos peixes (WOOTTON, 1990; SHANNON et al., 1996; HUGGETT et al., 2003). Para a sardinha-verdadeira, das cinco regiões apresentadas como de áreas propícias à desova (GIGLIOTTI et al., 2010), a região RZP1, como já discutido, apresenta-se fora desse padrão. Entre as outras quatro, duas delas localizam-se ao Norte do domínio (RZP5 e RZP4), uma na parte central (RZP3) e outra na parte Sul (RZP2). Os resultados

mostram que a sobrevivência final das larvas lançadas nessas regiões não se diferencia estatisticamente. Apesar disso, as regiões localizadas mais ao Sul do domínio (RZP3 e RZP4) foram aquelas que apresentaram os maiores valores de sobrevivência ao longo dos anos (Figura 4.23a), com destaque para RZP3, cujos valores foram sempre maiores que 35%. No caso das regiões ao Norte, em alguns anos a sobrevivência foi bastante baixa (<1%). A melhor adequação da parte centro-sul da PCSE para a desova da sardinha, simulada pelo modelo, já foi reportada em diversos estudos anteriores, que sugerem que a existência de uma plataforma continental mais larga nessa região fornece um ambiente mais estável, o que contribui para a formação de uma área de desova mais propícia (MATSUURA, 1998; LOPES et al., 2006; GIGLIOTTI et al., 2010; MORAES et al., 2012).

### **5.3. Influência da variabilidade interanual na sobrevivência das larvas**

Consideráveis diferenças foram encontradas entre os valores de sobrevivência das larvas ao longo dos seis anos analisados, variando de cerca de 14% a 70 (Figura 4.19 e Figura 4.20). As fontes de mortalidade consideradas neste trabalho foram as perdas por advecção e a temperatura da água abaixo do limite letal para a espécie. Este último parece ser determinante na variabilidade interanual da sobrevivência das larvas, pois as perdas advectivas variam pouco ano a ano, principalmente em RZP (desvio padrão=7,7% em RZR e 3,4% em RZP). Tal fato pode ser exemplificado pelo mês de janeiro de 1981, que apresentou as menores taxas de sobrevivência, bem abaixo da média, em ambos os experimentos. Em contrapartida, a mortalidade por temperatura apresentou valores bastante elevados.

A maior diferença entre os experimentos RZR e RZP ocorreu em janeiro de 1980, quando a mortalidade por temperatura no primeiro foi de 41% contra 12% em RZP. Esse mês apresentou anomalias negativas de temperatura para grande parte do domínio, com exceção da região de influência da ressurgência costeira de Cabo Frio, que apresenta uma forte anomalia positiva (Figura 4.8).

Como em RZR o espalhamento das larvas é maior, um maior número delas tem contato com águas com baixas temperaturas. Já em RZP, há uma agregação de larvas em determinadas regiões, inclusive na região cujas temperaturas foram mais elevadas (RZP5 e RZP4), aumentando as chances de sobrevivência. De fato, as taxas de mortalidade por temperatura em RZP5 e RZP4 foram menores que aquelas em RZP3, sendo este um padrão diferente dos outros anos. Isso pode ser tomado como mais uma evidência da melhor eficiência da estratégia de desova adota em RZP. Além disso, há algumas evidências reportadas em estudos recentes de que a população adulta da sardinha-verdadeira pode ser capaz de explorar ambientes de desova adequados, de acordo com as características físicas do ambiente (GIGLIOTTI et al., 2010; MORAES et al., 2012). Observando os mapas de distribuição de ovos das coletas (Figura 5.1) nota-se que, entre o período estudado, janeiro de 1980 foi o único mês que há uma maior concentração de ovos na parte Norte da PCSE. Esse foi o período em que foram observadas as maiores anomalias positivas de temperatura para esta região, indicando um enfraquecimento da ressurgência. Por outro lado, para o restante do domínio, as anomalias de temperatura foram negativas (Figura 4.8), o que indica que a temperatura da água estava abaixo da média climatológica podendo comprometer a sobrevivência dos ovos e das larvas. Isso sugere que a porção Norte da PCSE, para esse ano, se apresentou mais vantajosa à desova, diferindo dos outros anos. Esses resultados reforçam a ideia de que a sardinha é capaz de explorar ambientes mais favoráveis para a desova de acordo com a variabilidade interanual das características físicas atuantes sobre a PCSE.

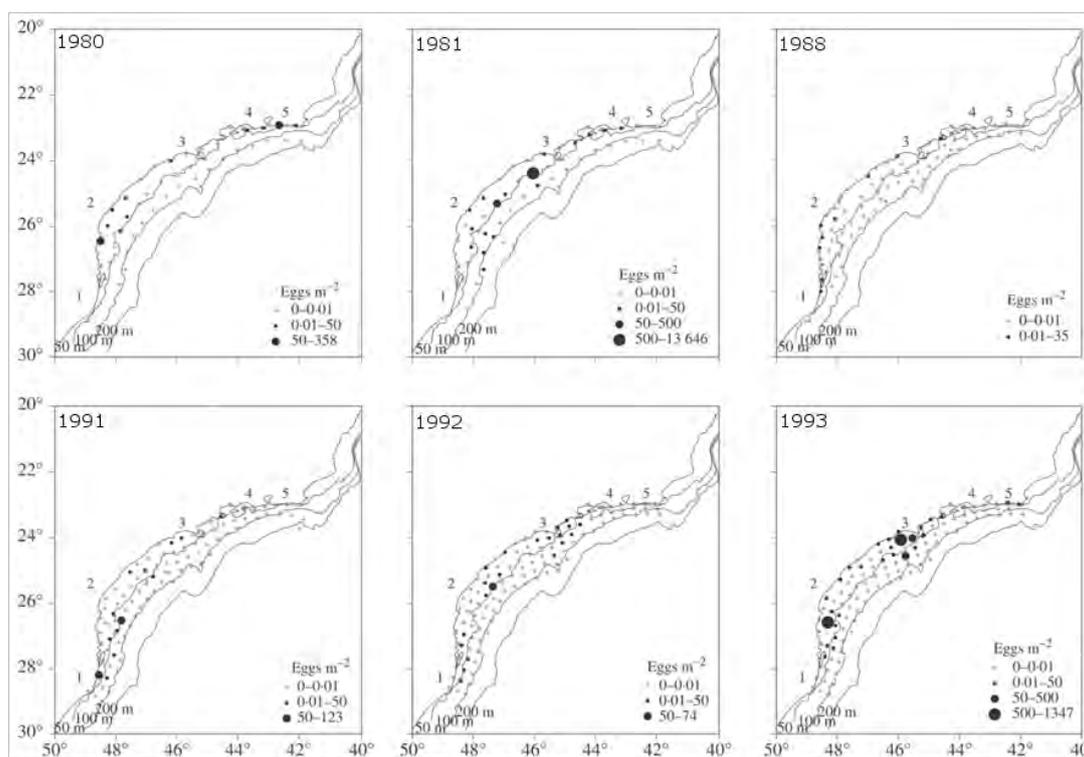


Figura 5.1 – variabilidade interanual na abundância de ovos coletados da *Sardinella brasiliensis*.

Fonte: GIGLIOTTI et al. (2010) (modificado).

#### 5.4. Características físicas da PCSE e sua relação na sobrevivência das larvas

As características termodinâmicas atuantes sobre a PCSE influenciam diretamente na retenção das larvas e, conseqüentemente, na sua sobrevivência. Diversos trabalhos foram produzidos com o intuito de verificar essa influência para a sardinha-verdadeira, sugerindo que a qualidade do habitat de desova é consequência de diversos fatores ambientais e biológicos: produção primária e disponibilidade de alimento, influenciada pela intrusão de águas enriquecidas sobre a plataforma (ACAS). Essa intrusão é também responsável por aumentar a estabilidade do ambiente, propiciando maior retenção larval (BAKUN e PARRISH, 1990; JABLONKY e LEGEY, 2004; GIGLIOTTI et al., 2010; MORAES et al., 2012). Ainda, a interação entre processos oceânicos e atmosféricos, como o transporte de Ekman induzido

pelo vento, que pode causar uma mistura mais intensa das primeiras camadas do oceano, surte efeito direto na qualidade do habitat de desova (SOARES et al., 2011). Neste trabalho pudemos verificar o efeito de três principais características físicas atuantes sobre a PCSE: a temperatura da água, a ressurgência costeira de Cabo Frio e o padrão hidrodinâmico da região.

A temperatura da água, como já demonstrado, influencia diretamente na sobrevivência das larvas e na variabilidade interanual da desova da sardinha-verdadeira. A temperatura como fator determinante na sobrevivência dos ovos e das larvas de pequenos pelágicos de outras regiões já foi relatada em alguns estudos. No Sul da África, a mortalidade por temperatura mostrou um significativo efeito sobre os ovos de *Engraulis encrasicolus* (PARADA et al., 2003). No Mar do Norte, as temperaturas foram determinantes na sobrevivência das larvas de *Sprattus sprattus*, afetando o crescimento e a disponibilidade de alimento (DAEWEL et al., 2008).

As maiores taxas de mortalidade por temperatura das larvas da sardinha-verdadeira ocorrem para aquelas cujos ovos foram lançados nas áreas de desova da porção Norte (RZP4 e RZP5). São justamente essas regiões que sofrem influência da ressurgência costeira de Cabo Frio, presente com mais intensidade no verão, época de desova da sardinha-verdadeira (CAMPOS et al., 2000). Em épocas que a mortalidade por temperatura dessas duas regiões de desova foi mais baixa (janeiro de 1980 e janeiro de 1988), as anomalias de temperatura encontradas foram positivas, o que indica um enfraquecimento da ressurgência. Isso nos leva a crer que a ressurgência costeira de Cabo Frio tem também um papel fundamental na modulação das áreas de desova da sardinha-verdadeira ao longo da PCSE. Em períodos cujas anomalias de temperatura nas adjacências de Cabo Frio são negativas (janeiro de 1981 e de 1992), as mortalidades por temperatura nas regiões RZP4 e RZP5 são as maiores encontradas (>80%). De fato, o efeito da ressurgência pode limitar as áreas de desova para a porção centro-sul da PCSE (MORAES et al., 2012), não apenas pelos efeitos da temperatura, mas também pelo transporte

*offshore*, causado pelos ventos que induzem a ressurgência (SORAES et al., 2011). Muitas espécies de pequenos pelágicos, cujo habitat caracteriza-se por áreas de ressurgência, tendem a desovar entre o outono e o inverno, onde as condições ambientais, principalmente a direção e a intensidade do vento, favorecem a retenção das larvas. Isso foi reportado para *Engraulis ringens* ao Norte da Corrente de Humbolt, no Peru (LETT et al., 2007; BROCHIER et al., 2008a) e na plataforma cetro-sul do Chile (SOTO-MENDONZA et al., 2012); para *Engraulis anchoita* na plataforma continental Sul do Brasil (VAZ et al., 2007) e para *Engraulis encrasicolus* nas Ilhas Canárias (BROCHIER et al., 2008b). Já a sardinha-verdadeira possui maior intensidade reprodutiva entre a primavera e o verão, com picos nos meses de dezembro e janeiro (SACCARDO e ROSSI-WONGTSCHOWSKI, 1991). Isso sugere que, apesar de o verão ser uma época favorável à ressurgência, as temperaturas da água para o resto do domínio apresentam-se mais elevadas que no inverno, o que é mais propício ao desenvolvimento e sobrevivência das larvas. Com isso, a sardinha pode explorar a parte centro-sul da PCSE que, além de temperaturas mais propícias, apresenta um padrão de circulação superficial que favorece a retenção das larvas nessa região. Observando os mapas de circulação superficial (Figura 4.10), nota-se a presença constante de uma célula de circulação ciclônica entre São Sebastião e Paranaguá (24°S a 26°S). Ainda, pela análise da distribuição espacial das larvas, observa-se que, no geral, esse foi o local onde se localizaram as maiores concentrações.

Esse padrão advectivo não havia sido reportado como uma possível causa de retenção das larvas da sardinha-verdadeira na parte centro-sul da PCSE. Esse ponto é reforçado observando que em períodos que essa célula de circulação esteve menos intensa (por exemplo, janeiro de 1981) houve um maior transporte em direção ao sul, fazendo com que as mortalidades por temperatura fossem consideravelmente mais elevadas do que para os outros anos. Esse fato, aliado à questão da estabilidade e enriquecimento do ambiente, provocados pela intrusão da ACAS durante o verão e à maior largura

da plataforma continental nessa porção, nos dá bastante confiança para afirmar que essa região é, de fato, a mais propícia para a desova e sobrevivência das larvas da sardinha-verdadeira.

A hipótese central desse trabalho é a de que o confinamento da sardinha-verdadeira na PCSE é resultado, principalmente, do padrão de circulação superficial no período de desova e que a parte centro sul da PCSE é a mais propícia para ocorrer a desova, devido principalmente ao padrão de circulação e às características termodinâmicas das águas sobre a plataforma. Através da implementação do IBM em conjunto com um modelo numérico hidrodinâmico, essas hipóteses puderam ser confirmadas. A natureza confinada da sardinha está relacionada principalmente aos padrões de circulação e de temperatura das águas sobre a PCSE. As larvas não são transportadas para o norte devido ao padrão de correntes da região que, como demonstrado, é predominante para SW. Além disso, se o transporte ocorrer para o Sul, a chance dessas larvas entrarem em contato com águas cuja temperatura está abaixo do limite de sobrevivência aumenta consideravelmente. Como a sardinha fica confinada, ela é capaz de explorar *habitats* mais propícios ao seu desenvolvimento, como a plataforma centro-sul, que apresenta um padrão advectivo capaz de manter as larvas retidas nessa região e próximas à costa.



## 6 CONCLUSÕES

A dinâmica do ictioplâncton é de fundamental importância para o recrutamento dos peixes e, conseqüentemente, na sobrevivência destes até a vida adulta. Neste contexto, este trabalho procurou estabelecer relações entre a sobrevivência das larvas da sardinha-verdadeira até a fase juvenil e as características físicas do ambiente. Este é um estudo pioneiro para a espécie, pois utilizou um IBM aliado a um modelo hidrodinâmico regional e a dados de densidade de ictioplâncton coletados em campo, permitindo o estudo de processos relacionados à dinâmica do ictioplâncton.

O efeito de três características físicas da PCSE sobre a sobrevivência das larvas foi investigado: a temperatura da água, a ressurgência costeira de Cabo Frio e o padrão hidrodinâmico da região. A temperatura da água possui influência direta na sobrevivência das larvas e na variabilidade interanual da desova da sardinha-verdadeira. Isso se relaciona com a ressurgência costeira de Cabo Frio, que possui um importante papel na modulação das áreas de desova da sardinha-verdadeira ao longo da PCSE, de acordo com sua intensidade de ocorrência, podendo limitar as áreas de desova à parte centro-sul da PCSE. Ainda, essa limitação a essa região também é influenciada pelo padrão hidrodinâmico da área. Os ventos que induzem a ressurgência tendem a causar um transporte dos indivíduos para regiões não propícias ao seu desenvolvimento, podendo levar à mortalidade. Já a porção centro-sul apresenta um padrão de circulação superficial que mantém as larvas retidas nessa região, além de possuir temperaturas mais propícias ao desenvolvimento. Esse fato, aliado a outros já descritos anteriormente na literatura, como a estabilidade e o enriquecimento do ambiente provocados pela intrusão da ACAS durante o verão e pela maior largura da plataforma continental nessa porção, nos deu bastante confiança para afirmar que essa região é a mais propícia para a desova e sobrevivência das larvas da sardinha-verdadeira.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLAIN, G.; PETITGAS, P.; LAZURE, P. The influence of mesoscale ocean processes on anchovy (*Engraulis encrasicolus*) recruitment in the Bay of Biscay estimated with a three-dimensional hydrodynamic mode. **Fisheries Oceanography**, v. 10, p. 151–163, 2001.
- ASSIREU, A. T.; STEVENSON, M. R.; STECH, J. L. Surface circulation and kinetic energy in the SW Atlantic obtained by drifters. **Continental Shelf Research**, v. 23, p. 145–157, 2003.
- ÁZCARATE, A. A.; BARTH, A.; BEN-BOUALLÈGE, Z.; RIXEN, M.; BECKERS, J. M. Forecast verification of a 3D model of the Mediterranean Sea. The use of discrete wavelet transforms and EOFs in the skill assessment of spatial forecasts. **Journal of Marine Systems**, v. 65, p. 460 – 483, 2007.
- BAKUN, A. Ocean triads and radical interdecadal variation: bane and boon to scientific fisheries management. In: PITCHER, T. J.; HART, P. J.; PAULY, D. **Reinventing fisheries management**. London: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- BAKUN, A.; PARRISH, R.H. Comparative studies of coastal pelagic fish reproductive habitats: the Brazilian sardine (*Sardinella aurita*). **Journal du Conseil International Pour l'Exploration de la Mer**, v. 46, p. 269-283, 1990.
- BARANGE, M.; COETEEZEE, J.; TAKASUKA, A.; HILL, K.; GUITIERREZ, M.; OOZEKI, Y.; VAN DER LINGEN, C.; AGOSTINI, V. Habitat expansion and contraction in anchovy and sardine populations. **Progress in Oceanography**, v. 83, p. 251-260, 2009.
- BECKER, J. J.; SANDWELL, D. T.; SMITH, W. H. F. et al. Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30 PLUS, **Marine Geodesy**, v. 32, n. 4, p. 355-371, 2009.
- BELLIER, E.; PLANQUE, B.; PETITGAS, P. Historical fluctuations in spawning locations of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) and sardine (*Sardina pilchardus*) in the Bay of Biscay during 1967 – 1973 and 2000 – 2004. **Fisheries Oceanography**, v. 16, p. 1–15, 2007.
- BOEBEL, O.; SCHMID, C.; ZENK, W. Flow and recirculation of Antarctic Intermediate Water across the Rio Grande Rise. **Journal of geophysical research**, v. 102, n. 20, p. 967-986, 1997.
- BRICKMAN, D; SHACKELL, N. L.; FRANK, K. T. Modelling the retention and survival of Browns Bank haddock larvae using an early life stage model. **Fisheries Oceanography**, v.10, p.284–296, 2001.
- BROCHIER, T. Ichthyoplankton transport from the African coast to Canary Island. **Journal of Marine Systems**, v. 87, p. 109-122, 2011.
- BROCHIER, T.; LETT, C.; TAM, J.; FRÉON, P.; COLAS, F.; AYÓN, P. An individual-based model study of anchovy early life history in the northern Humboldt Current system. **Progress in Oceanography**, v. 79, p. 313-325, 2008a.

BROCHIER, T.; RAMZI, A.; LETT, C.; MACHU, E.; BERRAHO, A.; FRÉON, P.; HERNÁNDEZ-LÉON, S. Modelling sardine and anchovy ichthyoplankton transport in the Canary Current System. **Journal of Plankton Research**, v. 30, n. 10, p. 1133-1146, 2008b.

BROWMAN, H. I.; ST-PIERRE, J. F.; SKIFTESVIK, A. B.; RACCA, R. G. Behaviour of Atlantic cod (*Gadus morhua*) larvae: an attempt to link maternal condition with larval quality. In: BROWMAN H. I.; SKIFTESVIK, A. B. (eds) The big fish bang: proceedings of the 26th annual larval fish conference. **Institute of Marine Research**, Bergen, p. 71-95, 2006.

BROWN, C. A.; HOLT, S. A.; JACKSON, G. A.; BROOKS, D. A.; HOLT, G. J. Simulating larval supply to estuarine nursery areas: How important are physical processes to the supply of larvae to the Aransas Pass Inlet? **Fisheries Oceanography**, v. 13, p. 181-196, 2004.

CALADO, L. Dinâmica da interação da atividade de meso-escala da Corrente do Brasil como fenômeno de ressurgência costeira ao largo de Cabo Frio e Cabo de São Tomé, RJ. **Tese (Doutorado em Oceanografia Física)** Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, Brasil, 158pp, 2006.

CALADO, L.; SILVEIRA, I. A. C.; GANGOPADHYAY, A.; CASTRO, B. M. Eddy-induced upwelling off Cape São Tomé (22°S, Brazil). **Continental Shelf Research**, v. 30, p. 1181-1188, 2010.

CAMPOS, E. D. J.; VELHOTE, D.; SILVEIRA, I. C. A. Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders. **Geophysical Research Letters**, v. 27, p. 751-754, 2000.

CAMPOS, E. J. D.; GONÇALVES, J. E.; IKEDA, Y. Water mass structure and geostrophic circulation in the South Brazil Bight – summer of 1991. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 18537-18550, 1995.

CAPET, X.; COLAS, F.; PENVEN, P.; MARCHESIELLO, P.; MCWILLIAMS, J.C., Eddies in eastern-boundary subtropical upwelling systems. **Eddy-resolving Ocean Modeling**, AGU Monograph, Washington DC, v. 177, p. 350, 2008.

CARTON, J. A.; GIESE, B. S. A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). **Monthly Weather Review**, v. 136, p. 2999-3017, 2008.

CARTON, J. A.; GIESE, B. S.; GRODSKY, S. A. Sea level rise and the warming of the oceans in the SODA ocean reanalysis. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, art# 10.1029/2004JC002817, 2005.

CASTELÃO, R. M.; CAMPOS, E. J. D.; MILLER, J. L. A modeling study of coastal upwelling driven by wind and meanders of the Brazil Current. **Journal of Coastal Research**, v. 20, n. 3, p. 662-671, 2004.

CASTRO, B. M. **Correntes e massas d'água na plataforma continental Norte de São Paulo**. Tese (Livre Docência) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. 248 p.

CASTRO, B. M.; LORENZETTI, 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-WONGTSCHOWSKI, C. L. B.; MADUREIRA, L. S. (eds.). O ambiente oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região Sudeste-Sul do Brasil. São Paulo: **Edusp – Editora da Universidade de São Paulo**, 2006. 472 p. ISBN 85-314-0948-9, 2006.

CASTRO, B. M.; MIRANDA, L. B. Physical oceanography of western Atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S coastal segment. *In*: ROBINSON, A. R.; BRINK, K. H. (Eds.), **The Sea**. Wiley, Berlin, 1998. v. 11, p. 209–251.

CASTRO, B. M.; MIRANDA, L. B.; MIYAO, S. Y. Condições hidrográficas na Plataforma Continental ao largo de Ubatuba: variações sazonais e em mesoescala. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 35, n. 2, p. 135-151, 1987.

CERGOLE, M. C. Avaliação do estoque da sardinha verdadeira, *Sardinella brasiliensis* da costa sudeste do Brasil, período 1977 a 1990. **Tese de (Doutorado)**, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 245p, 1993.

CERGOLE, M. C.; ÁVILA-DA-SILVA, A. O.; ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C. L. D. B. Análise das principais pescarias comerciais da região sudeste-sul do Brasil: dinâmica populacional das espécies em exploração. São Paulo, IO/USP, 2005. 176 p. (**Série de documentos REVIZEE – SCORE SUL**), 176 p. ISBN(85-98729-05-1), 2005.

CERGOLE, M. C.; NETO, J. D. (orgs.). **Plano de gestão para o uso sustentável da sardinha-verdadeira do Brasil**. Brasília: Ibama, 2011. ISBN 978-85-7300-343-7. Série de Planos de Gestão dos Recursos Pesqueiros, n. 5.

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.

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, n.1/2, p.113-127, 1994.

CHAVES, R. R.; NOBRE, P. Interactions between sea surface temperature over the South Atlantic Ocean and the South Atlantic Convergence Zone. **Geophysical Research Letters**, v. 31, L03204. doi:10.1029/2003GL018647, 2004.

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

CURY, P. M.; SHIN, Y. J.; PLANQUE, B.; DURANT, J. M.; FROMENTIN, J. M.; KRAMER-SHADET, S.; STENSETH, N. C.; TRAVERS, M.; GRIMM, V. Ecosystem oceanography for global change in fisheries. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 2, n. 6, p. 338-346, 2008.

DAEWEL, U.; PECK, M.; KUHN, W.; JOHN, M.; ALEKSEEVA, I.; SCHRUM, C. Coupling ecosystem and individual-based models to simulate the influence of

environmental variability on potential growth and survival of larval sprat (*Sprattus sprattus* L.) in the North Sea. **Fisheries Oceanography**, v. 17, n. 5, p. 333–351, 2008.

DE ALMEIDA, R. A.; NOBRE, F. P.; HAARSMA, R. J.; CAMPOS, E. J. D. Negative ocean-atmosphere feedback in the South Atlantic Convergence Zone. **Geophysical Research Letters**, v. 34, L18809. doi:10.1029/2007GL030401, 2007.

EVANS, D. L.; SIGNORINI, S. R. Vertical structure of the Brazil Current. **Nature**, v.315, p. 48–50, 1985.

FIGUEIREDO, J. L. de; MENEZES, N. A. Manual de peixes marinhos do Sudeste do Brasil. II. Teleostei (1). São Paulo: **Universidade de São Paulo, Museu de Zoologia**, 110 p, 1978. 110 p

FOGARTY, M. J. Recruitment in randomly varying environments. **ICES Journal of Marine Sciences**, v. 50, p. 247–260, 1993.

GALLEGO, A.; NORTH, E. W.; HOUDE, E. D. Understanding and quantifying mortality in pelagic, early life stages of marine organisms – Old challenges and new perspectives. **Journal of Marine Systems**, v. 93, p. 1-3, 2012.

GIGLIOTTI, E. S. **Medidas de variabilidade interanual marinha sobre a Palataforma Continental Sudeste do Brasil e sua relação com áreas de desova da sardinha-verdadeira (*Sardinella brasiliensis*)**. 2009. 169 p. (INPE-16539-TDI/1560). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/35E4TLP>>. Acesso em: 17 maio 2013.

GIGLIOTTI, E. S.; GHERARDI D. F. M.; PAES, E. T.; SOUZA, R. B.; e KATSURAGAWA, M. Spatial analysis of egg distribution and geographic changes in the spawning habitat of the Brazilian sardine *Sardinella brasiliensis*. **Journal of Fisheries Biology**, doi:10.1111/j.1095-8649.2010.02802.x, 2010.

GRIMM, V.; RAILSBACK, S. F. **Individual-based modeling and ecology**. Princeton University Press, 2005. 45p.

HAIVOGEL, D. B.; ARANGO, H. G.; HEDSTRÖM, K.; BECKMANN, A.; MALANOTTE-RIZZOLI, P.; SHCHEPETKIN, A. F. Model evaluation experiments in the North Atlantic basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates. **Dynamics Atmosphere and Oceans**, v. 32, p. 239–281, 2000.

HAIVOGEL et al. Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. **Journal of Computational Physics**, v. 227, p. 3595–3624, 2008.

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 to spatio-temporal spawning patterns. **Marine Ecology Progress Series**, v. 250, p. 247–262, 2003.

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

to spatio-temporal spawning patterns. **Marine Ecology Progress Series**, v. 250, p. 247–262, 2003.

IVANOV, L. M.; COLLINS, C. A.; MARCHESIELLO, P.; MARGOLINA, T. M. On model validation for meso/submeso scale currents: metrics and applications to ROMS off Central California. **Ocean Modelling**, v. 28, p. 209-225, 2009.

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.

KATSURAGAWA, M. Spatial analysis of egg distribution and geographic changes in the spawning habitat of the Brazilian sardine *Sardinella brasiliensis*. **Journal of Fisheries Biology**, doi:10.1111/j.1095-8649.2010.02802.x, 2010.

KILPATRICK, K. A.; PODESTÁ, G. P.; EVANS, R. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution radiometer Pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database. **Journal of Geophysical Research**, v.106, n. C5, p. 9179-9197, 2001.

KODAMA, Y. M. Large Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones. **Journal of Meteorological Society of Japan**, v. 70, n. 4, p. 813-841, 1992.

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

KURTZ, F. W.; MATSUURA, T. Food and feeding ecology of Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) larvae from the southeastern Brazilian Bight. **Revista brasileira de oceanografia**, v. 49, n. ½, p. 61-74, 2001.

LE-FUR, J.; SIMON, P. A new hypothesis concerning the nature of small pelagic fish clusters. An individual-based modeling study of *Sardinella aurita* dynamics off West Africa. **Ecological Modelling**, v. 220, p. 1291–1304, 2009.

LEGECKIS, R.; GORDON, A. L. Satellite observations of the Brazil and Falkland Currents – 1975 to 1976 and 1978. **Deep-Sea Research**, v. 29, p. 375–401, 1982.

LETT, C. A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. **Environmental Modelling and Software**, v. 23, p. 1210-1214, 2008.

LETT, C.; PEVEN, P.; AYÓN, P., FRÉON, P. Enrichment, concentration and retention processes in relation to anchovy (*Engraulis ringens*) eggs and larvae distributions in the northern Humboldt upwelling ecosystem. **Journal of Marine Systems**, v. 64, n. 1 – 4, p. 189 – 200, 2007.

LIMA, I. D.; GARCIA, C. A. E.; MOLLER JR., O. O. Ocean surface processes on the Southern Brazilian Shelf: characterization and seasonal variability. **Continental Shelf Research**, v. 16, n. 10, p. 1307–1317, 1996.

- LOPES, R. M.; KATSURAGAWA, M.; DIAS, J. F.; MONTÚ, M. A.; MUELBERT, J. H.; GORRI, C.; BRANDINI, F. P. Zooplankton and ichthyoplankton distribution on the southern Brazilian shelf: an overview. **Scientia Marina**, v. 70, p. 189–202, 2006.
- LORENZZETTI, J. A.; STECH, J. L.; MELLO-FILHO, W. L.; ASSIREU, A. T. Satellite observation of Brazil Current inshore thermal front in the SW South Atlantic: Space/time variability and sea surface temperatures. **Continental Shelf Research**, v. 29, p. 2061-2068, 2009.
- LUTJEHARMS, J. R. E.; PENVEN, P.; ROY, C. Modelling the shear edge eddies of the southern Agulhas Current. **Continental Shelf Research**, v. 23, p. 1099–1115, 2003.
- MATANO, R. P.; PALMA, E. D.; PIOLA, A. R. The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the Southwestern Atlantic Shelf circulation. **Ocean Sciences**, v. 6, p. 983-995, 2010.
- MATSURRA, Y. A study of the history of brazilian sardine, *Sardinella brasiliensis*. III. Development of sardine larvae. **Boletim do Instituto Oceanográfico de São Paulo**, v. 24, p. 17-29, 1975b.
- MATSUURA, Y. A study of the history of brazilian sardine, *Sardinella brasiliensis*. II. Spawning in 1970 end 1971. **Boletim do Instituto Oceanográfico de São Paulo**, v. 24, p. 1-16, 1975<sup>a</sup>.
- MATSUURA, Y. A study of the life history of brazilian sardine, *Sardinella brasiliensis*. IV. Distribution and abundance of sardine larvae. **Boletim do Instituto Oceanográfico de São Paulo**, v. 26, p. 19-247, 1977b.
- MATSUURA, Y. A study of the life history of brazilian sardines, *Sardinella aurita*. I. Distribution and abundance of sardine eggs in the region of Ilha Grande, Rio de Janeiro. **Boletim do Instituto Oceanográfico de São Paulo**, v. 20, n.1, p. 33-60, 1971.
- MATSUURA, Y. Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) spawning in the southeast Brazilian Bight over period 1976-1993. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 46, n.1, p. 33-43, 1998.
- MATSUURA, Y. O ciclo de vida da sardinha-verdadeira. Introdução à oceanografia pesqueira. **Publicação especial do Instituto Oceanográfico**, São Paulo, v. 4, 146p, 1977<sup>a</sup>.
- MATSUURA, Y.; SPACH, H. L.; KATSURAGAWA, M., 1992. Comparison of spawning patterns of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) and anchoita (*Engraulis anchoita*) in Ubatuba region, southern Brazil during 1985 through 1989. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, São Paulo, v. 40, n. 1/2, p. 101-115.
- MATSUURA, Y. **Estudo comparativo das fases iniciais do ciclo de vida da sardinha-verdadeira, *Sardinella brasiliensis* e da sardinha-cascuda, *Harengula jaguana* (Pisces: Clupeidae), e nota sobre a dinâmica da população da sardinha-verdadeira na região sudeste do Brasil.** Tese (Livre-Docência) - São Paulo: Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 1983. 150p.

- MAYNOU, E.; OLIVAR, M. P.; EMELIANOV, M. Patchiness and spatial structure of the early developmental stages of *clupeiforms* in the NW Mediterranean Sea. **Journal of Plankton Research**, v. 30, p. 873–883, 2008.
- MCGILL, R.; TUKEY, J. W.; LARSEN, W. A. Variations of box plots. **The American Statistician**, v. 32, p. 12-16, 1978.
- MEEKAN, M. G.; FORTIER, L. Selection for fast growth during the larval life of Atlantic cod *Gadus morhua* on the Scotian Shelf. **Marine Ecology Progress Series**, v. 137, p. 25–37, 1996.
- MILLER, D. C. Contribution of individual-based coupled physical–biological models to understanding recruitment in marine fish populations. **Marine Ecology Progress Series**, v. 347, p. 127-138, 2007.
- MIRANDA, L. B. Análise de massas de água da plataforma continental e da região oceânica adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) à Ilha de São Sebastião (SP). Tese de livre docência. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 194 p, 1982.
- MULLER, 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 (C3), p. 5429-5437, 1998.
- 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, p. 5429-5437, 1998.
- MYERS, R. A.; BOWEN, K. G.; BARROWMAN, N. J. Maximum reproductive rate of fish at low population sizes. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science**, v. 56, p. 2404–2419, 1999.
- PAES, E. T.; MORAES, L. E. S. 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**, n. 2, p. 94-102, 2007.
- PALMA, E. D.; MATANO, R. P. Disentangling the upwelling mechanisms of the South Brazil Bight. **Continental Shelf Research**, v. 29, p. 1525–1534, 2009.
- PARADA, C.; COLAS, F.; SOTO-MENDONZA, S.; CASTRO, L. Effects of across and alongshore transport seasonal variability of anchoveta (*Engraulis ringens*) larvae on modeled-based pre-recruitment indices off Central Chile. **Progress in Oceanography** (special issue), v. 92-95C, p. 192-205, 2012.
- PARADA, C.; VAN DER LINGEN, C. D.; MULLON, C.; PENVEN, P. Modelling the effect of buoyancy on the transport of anchovy (*Engraulis capensis*) eggs from spawning to nursery grounds in the southern Benguela: an IBM approach. **Fisheries Oceanography**, v.12, n. 3, p. 170–184, 2003.
- PELIZ, A.; MARCHESIELLO, P.; DUBERT, J.; MARTA-ALMEIDA, M.; ROY, C.; QUEIROGA, H. A study of crab larvae dispersal on the Western Iberian Shelf: Physical processes. **Journal of Marine Systems**, V. 68, P. 215 – 236, 2007.

PENVEN, P.; ROY, C.; LUTJEHARMS, J. R. E.; COLIN de VERDIÈRE, A.; JOHNSON, A.; SHILLINGTON, F.; FRÉON, P.; BRUNDRIT, G. A regional hydrodynamic model of the Southern Benguala. **South African Journal of Science**, v. 97, p. 472–476, 2001.

PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper level circulation in the South Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, v. 26, p.1-73, 1991.

PODESTÁ, G. P., BROWDER, J. A., HOEY, J. Exploring the association between swordfish catch rates and thermal fronts on US longline grounds in the western North Atlantic. **Continental Shelf Research**, v. 13, n. 2/3, p. 253–277, 1993.

RICE, J. A.; MILLER, T. J.; ROSE, K. A.; CROWDER, L. B.; MARSCHALL, E. A.; TREBITZ, A.S.; DeANGELIS; D. L. Growth rate variation and larval survival: inferences from an individual-based size-dependent population model. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science**, v. 50, p. 133–142, 1993.

ROBINSON, I. S. **Measuring the Oceans from Space, the principles and methods of satellite oceanography**. Chichester: Praxis Publishing Ltd., 2004.

RUDORFF, C.A.G.; LORENZETTI, J.A.; GHERARDI, D.F.M.; LINS-OLIVEIRA, J.E. Modeling spiny lobster larval dispersion in the Tropical Atlantic. **Fisheries Research**, v. 96, p. 206-215, 2009.

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

SAHA, S. et al. The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 9, p. 1015–1057, 2010.

SHANNON, L. J.; NELSON, G.; CRAWFORD, R. J. M.; BOYD, A. J. Possible impacts of environmental change on pelagic fish recruitment: modelling anchovy transport by advective processes in the southern Benguela. **Global Change Biology**, v. 2, n. 5, p. 407–420, 1996.

SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. The regional ocean modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. **Ocean Modeling**, v.9/4, p. 347-404, 2005.

SHE, J.; KLINCK, J.M. Flow near submarine canyons driven by constant wind. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, p. 28671–28694, 2000.

SIGNORINI, S. R. On the circulation and volume transport of the Brazil Current between the Cape of São Tomé and Guanabara Bay. **Deep Sea Research**, v. 25, p. 481-490, 1978.

SILVA, M.; ARAUJO, M.; SERVAIN, J.; PENVEN, P.; LENTINI, C. A. D. High-resolution regional ocean dynamics simulation in the southwestern tropical Atlantic. **Ocean Modelling**, v. 30, p. 256-569, 2009.

SILVEIRA, I. C. A.; CALADO, L.; CASTRO, B. M.; CIRANO, M.; LIMA, J. A. M.; MASCARENHAS, A. S. On the baroclinic structure of the Brazil Current – Intermediate

Western Boundary Current at 22°S – 23°S. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 14, p. 4308, 2004;

SILVEIRA, I. C. A.; LIMA, J. A. M.; SCHMIDT, A. C. K.; CECCOPIERI, W.; SARTORI, A.; FRANCISCO, C. P. F.; FONTES, R. F. C. Is the meander growth in the Brazil current system off Southeast Brazil due to baroclinic instability?. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 45, p. 187–207, 2008.

SILVEIRA, I. C. A.; SCHMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J.; GODOI, S. S.; IKEDA, Y. A Corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n. 2, p. 171–183, 2000.

SILVERMAN, B. W. Density Estimation for Statistics and Data Analysis. Nova York: **Chapman and Hall**, 1986.

SOARES, H. C.; PEZZI, L. P.; GHERARDI, D. F. M.; PAES, E. T. Oceanic and atmospheric patterns during spawning periods prior to extreme catches of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) in the southwest Atlantic. **Scientia Marina**, v. 75, n. 4, p. 665-677, 2011.

SONG, Y., HAIDVOGEL, D. B. A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate. **Journal of Computational Physics**. v. 115, p. 228–244, 1994.

SOTO-MENDONZA, S.; PARADA, C.; CASTRO, L.; COLAS, F.; SCHNEIDER, W. Modeling the transport and survival of anchoveta eggs and yolk-sac larvae in the coastal zone off central-southern Chile: assessing spatial and temporal spawning parameters. **Progress in Oceanography**, v. 32-35C, p. 178-191, 2012.

SOUZA, R. B.; LORENZETTI, J. A.; LUCCA, E. V. D. Estimativas da Temperatura da Superfície do Mar através do Sensoriamento Remoto no infravermelho. In: SOUZA, R. B. (org.). **Oceanografia por satélites**. São José dos Campos: Oficina de textos, 2005. p. 102-115,

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

SPACH, H. L. **Estudo comparativo da distribuição espaço-temporal e de padrões de agregação de ovos e larvas de *Herengula jaguana*, *Sardinella brasiliensis* (Clupeidae: Osteichthyes) e *Engraulis anchoita* (Engraulidae: Osteichthyes) na costa sudeste do Brasil**. Tese de doutorado - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990. 249p.

STECH, J. L.; LORENZETTI, J. A. The response of South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. **Journal of Geophysical Research**, v. 97 (C6), p. 9507-9520, 1992.

STENEVIK, E. K.; SKOGEN, M.; SUNDBY, S.; BOYER, D. The effect of vertical and horizontal distribution on retention of sardine (*Sardinops sagax*) larvae in the northern Benguela – observations and modelling. **Fisheries Oceanography**, v. 12, p. 185–200, 2003.

STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 20863-20883, 1999.

SUDA, M.; AKAMINE, T.; KISHIDA, T. Influence of environmental factors, interspecific-relationships and fishing mortality on the stock fluctuation of the Japanese sardine *Sardinops melanostictus*, off the Pacific coast of Japan. **Fisheries Research**, v. 76, n. 3, p. 368-378, 2005.

THANASSEKOS, S.; ROBERT, D.; FORTIER, L. An Individual based model of Artic cod (*Boreogadus saida*) early life in Artic polynas: II. Length-dependent and growth-dependent mortality. **Journal of Marine Systems**, v. 93, p. 39-46, 2012.

THORROLD, S.; LATKOCZY, C.; SWART, P.; JONES, C. Natal homingin a marine fish metapopulation. **Science**, v. 291, p. 297-299, 2001.

TURINGAN, R. G.; BECK, J. L.; KREBS, J. M.; LICAMELE, J. D. Development of feeding mechanics in marine fish larvae and the swimming behavior of zooplankton prey: implications for rearing marine fishes. In: LEE, C.S.; O'BRYEN, P. J.; MARCUS, N. M. (eds.). **Copepods in aquaculture**. Ames, Blackwell, 2005. p. 119-132.

VAN DER LINGEN, C. D. Characterizing spawning habitat of anchovy (*Engraulis encrasicolus*), redeye round herring (*Etrumeus whiteheadi*), and sardine (*Sardinops sagax*) from CUFES sampling in the Southern Benguela. **Report of Global Ocean Ecosystem dynamics (GLOBEC)**, n. 21, p. 29-30, January 2004. Special issue on GLOBEC/SPACC Workshop on characterizing and comparing the spawning habitats of small pelagic fish.

VAZ, A.; PARADA, C.; PALMA, E.; MUELBERT, J.; CAMPOS, E. Modeling transport and retention of *Engraulis anchoita* Hubbs & Marini, 1935 (*Clupeiformes, Engraulidae*) early life stages along the Central Southwestern Atlantic Continental Shelf. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 2, n. 2, p. 179-190, 2007.

WERNER F. E.; QUINLAN J. A.; BLANTON B. O.; LUETTICH, R. A. Jr. The role of hydrodynamics in explaining variability in fish populations. **Journal of Sea Research**, v. 37, p. 195-212, 1997.

WOOTTON, R. Ecology of teleost fishes: In: **Fish and fisheries**. Chapman and Hall, 1990. p. 404 (Series 1).

YANNICELLI, B.; CASTRO, L.; PARADA, C.; SCHNEIDER, W.; COLAS, F.; DONOSO, D. Distribution of *Pleurocondes monodon* larvae over the continental shelf of south-central Chile: field and modeling evidence of partial local retention and transport. **Progress in Oceanography** (special issue), v. 92-95C, 206-227, 2012.

YONEDA, N. T. **Criação em laboratório de larvas da sardinha-verdadeira *Sardinella brasiliensis* e estudo dos incrementos diários nos otólitos**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 1987. 92p.