



MARINHA DO BRASIL
INSTITUTO DE ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PROGRAMA ASSOCIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA MARINHA

RENATO GONÇALVES DOS SANTOS

**DETERMINAÇÃO DE UM ÍNDICE DE RESSURGÊNCIA PARA REGIÃO DE
ARRAIAL DO CABO: CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA, PREVISIBILIDADE E
APLICAÇÃO BIOTECNOLÓGICA.**

ARRAIAL DO CABO/RJ
2019

RENATO GONÇALVES DOS SANTOS

**DETERMINAÇÃO DE UM ÍNDICE DE RESSURGÊNCIA PARA REGIÃO DE
ARRAIAL DO CABO: CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA, PREVISIBILIDADE E
APLICAÇÃO BIOTECNOLÓGICA.**

Dissertação de Mestrado, apresentada ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira e a Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Biotecnologia Marinha.

Orientador: Prof. Dr. Lohengrin Dias de Almeida Fernandes

Coorientadora: Dra. Tânia Ocimoto Oda

**ARRAIAL DO CABO/RJ
2019
RENATO GONÇALVES DOS SANTOS**

**DETERMINAÇÃO DE UM ÍNDICE DE RESSURGÊNCIA PARA REGIÃO DE
ARRAIAL DO CABO: CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA, PREVISIBILIDADE E
APLICAÇÃO BIOTECNOLÓGICA.**

Dissertação apresentada ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira e à Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Biotecnologia Marinha.

COMISSÃO JULGADORA:

**Dr. Eduardo Barros Fagundes Netto
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM)**

**Dr. Rogério Neder Candella
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM)**

**Dra. Tânia Ocimoto Oda
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM)**

**Dr. Lohengrin Dias de Almeida Fernandes
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM)
Professor Orientador – Presidente da Banca Examinadora**

Arraial do Cabo, 27 de setembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente a Deus, por iluminar o meu caminho e me dar forças para seguir em frente, em qualquer situação.

A minha mãe Mariza Tavares Gonçalves dos Santos, minha maior motivadora, desde o século passado.

Ao meu irmão Bernardo Gonçalves dos Santos, por sempre perguntar quando termina o curso.

Ao meu filho Lucas Pereira Gonçalves dos Santos, por ser minha fonte de inspiração e minha luz.

A minha companheira Simone Marques, por ser meu pilar de sustentação e me apoiar em todos os momentos com carinho e ternura.

A Marinha do Brasil, por ter me designado a servir em um instituto de pesquisa.

Ao IEAPM, por ter me concedido a oportunidade de realizar este mestrado.

Agradeço muito ao meu orientador, Lohengrin, pelo voto de confiança e por ter aceito o desafio de orientar um aluno meteorologista.

A minha encarregada de divisão e coorientadora Dra. Tânia, que tornou toda essa pesquisa possível.

Aos colegas de pós-graduação que sempre foram generosos em sanar minhas dúvidas.

Aos colegas de trabalho que na medida do possível fizeram trocas de serviço para que não faltasse às aulas.

A 2º SG ME Carla Gustavo, por me auxiliar na burocracia que circunda a vida militar, sempre me lembrando dos prazos.

Agradeço a todos os professores, técnicos administrativos e palestrantes que contribuíram para a realização do Programa Associado de Pós-Graduação em Biotecnologia Marinha (IEAPM/UFF).

Obrigado a todos.

***“A great wind is blowing, and that gives
you either imagination or a headache.”***

- Catherine the Great

RESUMO

A ressurgência costeira é o fenômeno caracterizado pelo afloramento de águas mais frias e profundas próximo à costa. Essa água ressurgida é rica em nutrientes e responsável pelos ecossistemas biologicamente ricos e produtivos das correntes costeiras. O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um índice de ressurgência para região de Arraial do Cabo, baseado no transporte de Ekman, que pudesse ser utilizado como ferramenta em estudos Bio-Oceanográficos. Para isso foi calculado o transporte de Ekman utilizando dados de uma boia meteo-oceanográfica e informações de ventos oriundos da reanálise ERA-Interim. Através da análise da série de dados da boia meteo-oceanográfica foram observados fenômenos recorrentes, descritos em cinco casos que relacionam a intensidade e o sentido do índice de ressurgência com a temperatura do mar. O estudo desses casos mostrou que quanto mais negativa é a componente meridional do índice, maior é a probabilidade de ocorrência do afloramento ou redução da profundidade da ACAS. A partir dos dados de reanálise foi elaborada uma climatologia do Índice de Ressurgência (IR). Os resultados de anomalias de IR superiores a $2 \cdot 10^3 \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$ (volume transportado por secção de costa por segundo) podem indicar anomalias na TSM. A utilização de dados de ventos provenientes de modelos atmosféricos de previsão do tempo gera um índice previsto. A previsão IR pode ser empregada no planejamento de trabalhos de campo ou prevendo melhores períodos para atividades pesqueiras, mostrando que o IR é perfeitamente aplicável à região de estudo, porém o sentido, intensidade e sazonalidade devem ser observados para um melhor aproveitamento.

ABSTRACT

Coastal upwelling is the phenomenon characterized by the transport to surface of colder and deeper waters near the coast. This upwelling water is rich in nutrients and responsible for the biologically rich and productive ecosystems of coastal streams. The aim of the present work was to develop upwelling index for Arraial do Cabo region that could be used as a tool in Bio-Oceanographic studies. Then, the Ekman transport was calculated with meteo-oceanographic buoy data and wind data extracted from ERA-Interim reanalysis. Analyzing the meteo-oceanographic buoy data series, recurring phenomena were observed, described in five cases that relate the intensity and the direction of the upwelling index to the sea temperature. The study of these cases showed that the more negative the meridional component of the index, the greater the likelihood of the outcrop or SACW depth decreasing. From the reanalysis data Upwelling Index (UI) climatology was elaborated. The results showed that UI anomalies greater than $2 \cdot 10^3 \text{ m}^3 / \text{s} \cdot \text{km}$ (volume per coast section per seconds) may indicate TSM anomalies. Using wind data from weather forecast atmospheric models generates a predicted index. The UI forecast can be used in planning of field work or foreseeing the best periods for fishing activities, showing that the UI is perfectly applicable to the study region, but the direction, intensity and seasonality should be observed for better use.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Imagem de TSM obtida do sensor MODIS, data 30 outubro de 2014.....	11
Figura 4.1. Vetor do vento e transporte de Ekman.....	21
Figura 4.2. Área de estudo, Praia de Massambaba.	22
Figura 4.3. Boia meteo-oceanográfica.	24
Figura 4.4. Perfil de temperatura da água do mar, boia meteo-oceanográfica, 15 de julho de 2013 até 3 de agosto 2015.....	25
Figura 4.5. Temperatura da superfície do mar, Álcalis.....	25
Figura 4.6. (a) Histograma direcional do vento (m / s) ERA-Interim; (b) Histograma direcional do vento (m / s) INMET.....	28
Figura 5.1. Evolução temporal de Q_{B2}	32
Figura 5.2. CASO I, período de 01 a 20 janeiro 2015.	34
Figura 5.3. CASO II, período de 12 a 30 junho 2015.	36
Figura 5.4. CASO III, período de 12 a 30 abril 2014.	38
Figura 5.5. CASO IV, período de 15 a 31 maio 2015.....	40
Figura 5.6. CASO V, período de 07 a 31 julho 2015.....	42
Figura 5.7. Frequência Relativa de Q_{B2y}	43
Figura 5.8. Frequência Relativa de Q_{B2y} para ocorrência de $TSM < 18^{\circ}C$	44
Figura 5.9. Frequência Relativa de Q_{E2y}	48
Figura 5.10. Frequência Relativa de Q_{E2y} para ocorrência de $TSM < 18^{\circ}C$	48
Figura 5.11. Média mensal do módulo da componente meridional negativa do índice de ressurgência.....	50
Figura 5.12. Média mensal do número de dias com ocorrência de ressurgência ($TSM < 18^{\circ}C$) Álcalis.....	52
Figura 5.13. Gráfico em barra com a média mensal da temperatura da superfície do mar medidos pela Álcalis.....	52
Figura 5.14. Gráfico em barras das anomalias de 1989: (a) anomalia mensal do módulo de Q_y , (b) anomalia mensal de TSM.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Descrição sucinta dos casos.....	33
Tabela 5.2 Tabela de Probabilidade de Ocorrência de Ressurgência pela intensidade de Q_{B2y}	45
Tabela 5.3 Tabela de Probabilidade de Ocorrência de ressurgência ou redução da profundidade da isoterma de 18°C pela intensidade de Q_{B2y}	46
Tabela 5.4 Tabela de Probabilidade de Ocorrência de Ressurgência pela intensidade de Q_{E2y}	49

LISTA DE ABREVIATURAS

ACAS – Água Central do Atlântico Sul;
ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul;
 Cd – Coeficiente de Arrasto Adimensional Empírico;
ECMWF – European Center for Medium-Range Weather Forecasts;
 f – Parâmetro de Coriolis;
FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos;
FNWC – U.S. Navy, Fleet Numerical Weather Central;
GNU – General Public License;
HN – Hemisfério Norte;
HS – Hemisfério Sul;
IEAPM – Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira;
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia;
IR – Índice de Ressurgência;
MODIS – Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer;
p-chi – Nível de significância do Chi-quadrado;
Q – Transporte de Ekman;
 Q_{B1} – Transporte de Ekman Somatório da Boia 1 dias;
 Q_{B2} – Transporte de Ekman Somatório da Boia 2 dias;
 Q_{B3} – Transporte de Ekman Somatório da Boia 3 dias;
 Q_{E1} – Transporte de Ekman Somatório da ERA-Iterim 1 dias;
 Q_{E2} – Transporte de Ekman Somatório da ERA-Iterim 2 dias;
 Q_{E3} – Transporte de Ekman Somatório da ERA-Iterim 3 dias;
 Q_x – Componente Zonal do Transporte de Ekman;
 Q_y – Componente Meridional do Transporte de Ekman;
S – Salinidade da Água do Mar;
SAR – Busca e Salvamento marítimo;
SIOCD – Sistema de Obtenção de Dados Ambientais para Defesa;
SIODOC – Sistema de Obtenção de Dados Oceanográficos;
T – Temperatura;

TSM – Temperatura da Superfície do Mar;

u – Componente Zonal do Vento;

UI – Upwelling Index;

v – Componente Meridional do Vento;

X^2 – Teste de hipótese Chi-quadrado;

ρ_a – Densidade do Ar;

ρ_w – Densidade da água.

τ_x – Componente Zonal do vetor tensão do vento; e

τ_y – Componente meridional do vetor tensão do vento.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4. MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1 ÍNDICE DE RESSURGÊNCIA	20
4.2 ÁREA DE ESTUDO	21
4.3 INFORMAÇÕES METEO-OCEANOGRÁFICAS	22
4.3.1 BOIA METEO-OCEANOGRÁFICA SIODOC	23
4.3.2 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR ÁLCALIS	25
4.3.3 REANÁLISE ERA INTERIM.....	26
4.4 ANÁLISE DA TEMPERATURA DO MAR.....	29
4.5 MÉTODOS COMPUTACIONAIS	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1 SÉRIE TEMPORAL DA BOIA METEO-OCEANOGRÁFICA	31
5.1.1 CASO I.....	34
5.1.2 CASO II.....	35
5.1.3 CASO III.....	37
5.1.4 CASO IV	39
5.1.5 CASO V	41
5.1.6 ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA RESSURGÊNCIA.....	43
5.2 SÉRIE TEMPORAL DA REANÁLISE ERA-INTERIM.....	47
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
6.1. CONCLUSÕES	54
6.2. PERSPECTIVAS.....	55
7. REFERÊNCIAS	56
8. ANEXO A - Figuras de anomalia de Q e TSM de 1979 a 1992.....	62

1. INTRODUÇÃO

A ressurgência costeira é o fenômeno caracterizado pelo afloramento de águas mais frias e profundas próximo à costa. Em geral, esse tipo de ressurgência é provocada pelos ventos que transportam a água superficial da costa em direção ao oceano e por continuidade águas mais profundas e frias são trazidas à superfície. Essa água ressurgida é rica em nutrientes e contribui com os ecossistemas biologicamente ricos e produtivos das regiões costeiras. A maioria das regiões de ressurgência costeira do mundo está localizada na costa oeste dos continentes: no Peru, Equador, Califórnia e Oregon, no Oceano Pacífico, e no noroeste da África e no sul de Benguela, no Oceano Atlântico.

Devido ao aumento da produção primária, as regiões de ressurgência são economicamente importantes, e apesar de compreenderem apenas 1% das regiões costeiras do mundo, são responsáveis por cerca de 20% da pesca mundial (NARAYAN et al., 2010).

A exploração e a gestão do ambiente marinho costeiro estão ligadas também ao conhecimento dos padrões da circulação oceânica. Operações que envolvam prospecção de recursos, navegação, salvatagem e manobras militares dependem, dentre outras coisas, do conhecimento do meio marinho (TORRES JUNIOR, 1995). Em atividades militares, é importante conhecer o comportamento da ressurgência, pois a alteração da temperatura do mar interfere na operação dos sonares. A temperatura da superfície do mar também afeta o tempo de sobrevivência de naufragos. Por exemplo, em uma temperatura de 15,6°C o tempo de sobrevivência é de 2,8 a 5,5 horas (MOLNAR, 1946).

BRASILEIRO et al. (2009) afirmam que a região do Cabo Frio é uma das mais importantes áreas da diversidade de algas no Brasil. Localizada na Região dos Lagos no litoral do Estado do Rio de Janeiro, a região do Cabo Frio possui peculiaridades geológicas, climáticas e ecológicas, além de abrigar espécies endêmicas e raras (COE et al., 2007). A ressurgência do Cabo Frio apresenta características diferenciadas em relação a outras regiões de ressurgência mais conhecidas e de maior dimensão.

Destaca-se a localização do Cabo Frio, que está na costa leste da América do Sul, enquanto o mais comum são áreas de ressurgência na costa oeste dos continentes. Outra característica peculiar da ressurgência do Cabo Frio é a frequência episódica durante o ano todo, sendo, entretanto, mais comum no verão e na primavera.

A melhor forma de caracterizar um episódio de ressurgência é medindo a temperatura (T) e a salinidade (S) da água do mar. Através do diagrama TS é possível caracterizar a massa d'água presente na região. No entanto, a realização destas medidas não é trivial, pois depende de embarcações oceanográficas ou de equipamentos sofisticados, como boias meteo-oceanográficas, que possuem custo elevado e necessidade de mão de obra especializada para manutenção. No período de 2013 a 2015, o projeto "Sistema de Obtenção de Dados Oceanográficos" (SIODOC) manteve uma boia monitorando em tempo real a ressurgência do Cabo Frio, com custo do equipamento incluindo a manutenção na ordem de R\$ 2 milhões (valores referentes ao ano de 2015).

A Figura 1.1 mostra a temperatura da superfície do mar (TSM), captada pelo sensor MODIS do satélite Terra, em um evento de ressurgência ocorrido no dia 30 de outubro de 2014. Nesta figura é possível ver toda extensão da Praia de Massambaba mais fria do que o entorno. Dados de satélite representam bem a distribuição espacial da ressurgência, porém apresentam uma baixa resolução temporal e uma série de limitações metodológicas que dificultam o uso operacional para o monitoramento do fenômeno.

Perante a dificuldade do monitoramento *in situ* e partindo do pressuposto que quanto mais intenso é o vento, maior é o transporte das águas superficiais, aumentando a entrada de nutrientes na camada eufótica (camada do ecossistema marinho que recebe luz solar suficiente para que ocorra a fotossíntese), o presente trabalho vislumbra calcular um índice que expresse a intensidade da ressurgência para a Região do Cabo Frio (índice de Ressurgência).

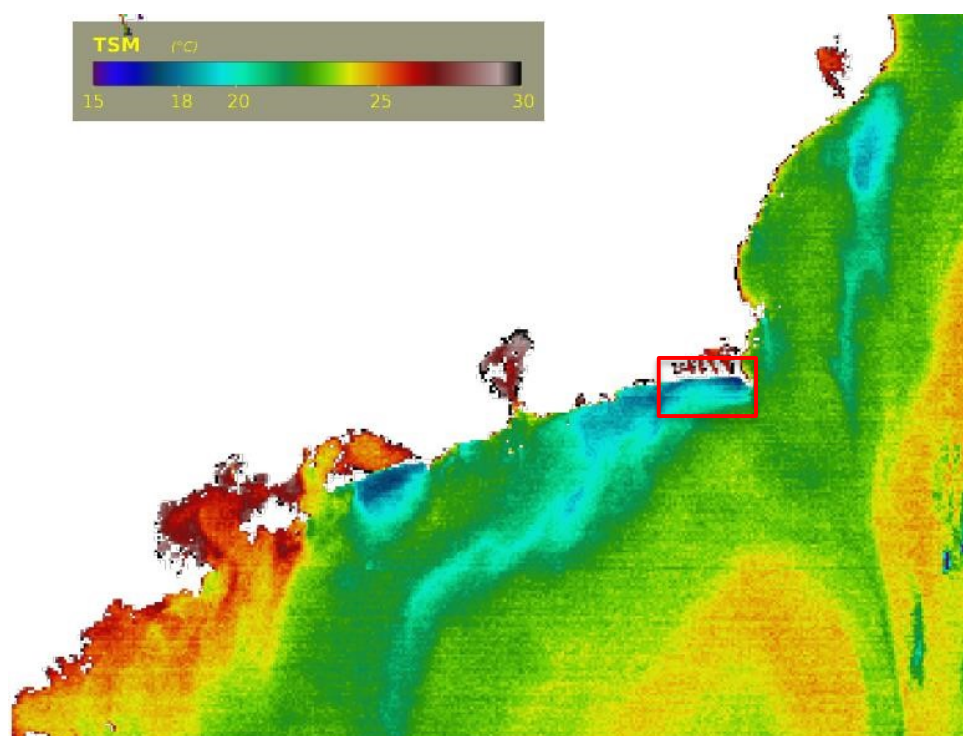


Figura 1.1. Imagem de temperatura da superfície do mar (TSM) obtida do sensor MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo do satélite Terra da NOAA, data 30 outubro de 2014. Fonte: NASA, Ocean Biology Processing Group (2014).

A dissertação foi dividida em seis partes, na primeira parte (Introdução) é exposta a importância da ressurgência para a região de estudo, assim como, a dificuldade para obtenção de dados *in situ*. Os objetivos do trabalho são apresentados na segunda parte. A terceira parte é reservada à revisão bibliográfica, com uma descrição da ressurgência costeira e seus processos físicos, um breve levantamento de estudos realizados sobre a ressurgência do Cabo Frio, índices de ressurgência já utilizados em outras localidades e por fim exemplos de aplicações desses índices.

A quarta parte é dedicada a Material e Métodos, onde são apresentadas às séries de dados utilizados, e uma descrição da metodologia aplicada neste trabalho. Na quinta parte os resultados são discutidos por séries temporais com descrição de casos para exemplificação. Por fim, as considerações finais são expostas na sexta e última parte.

Diante do exposto a hipótese do trabalho é que um índice em função do vento pode representar o fenômeno da ressurgência na região de Arraial do Cabo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é desenvolver um índice de ressurgência, para Arraial do Cabo, utilizando dados de vento local.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

O objetivo específico desenvolver uma ferramenta que represente a ressurgência podendo ser utilizada em estudos Oceanográficos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

EKMAN (1905) partiu do pressuposto que as correntes geradas pelo vento podem ser tratadas como um problema simplificado, utilizando apenas a fricção do vento como a força geradora do movimento. NANSEN (apud EKMAN) realizou observações de vento e de gelo à deriva no mar e constatou que a deriva produzida pelo vento não seguia a direção deste, mas desviava-se de 20° a 40° para a direita, em consequência da rotação da Terra. Utilizando a força de Coriolis e a força de atrito de fricção, EKMAN desenvolveu uma teoria para correntes marinhas provocadas pelo vento.

Essa teoria ficou conhecida como transporte de EKMAN, que é a base para a compreensão do efeito da tensão do vento na circulação oceânica. Aplicando a teoria do transporte de Ekman, SVERDRUP (1942) descreveu o processo de ressurgência costeira como efeito do vento que sopra paralelo à costa oeste, e que gera um transporte da água superficial para longe da costa. Por continuidade, águas profundas são trazidas para camadas mais superficiais e ocasionalmente afloram na superfície.

SMITH (1968) definiu ressurgência como resultado da divergência horizontal na camada superficial do oceano. Essa divergência faz com que águas mais profundas sejam trazidas para próximo da superfície. A ressurgência é um fenômeno que geralmente ocorre ao longo da costa oeste dos continentes, onde os ventos paralelos à costa transportam a água da superfície para o oceano.

Quanto mais forte é o vento, maior é o transporte induzido no mar, aumentando a ressurgência. Portanto, quanto mais intensa é a ressurgência, maior é a entrada de nutrientes na camada eufótica. A intensidade da ressurgência pode ser estimada usando o transporte de Ekman calculado a partir da componente do vento paralelo à costa. Ressurgências do tipo Ekman são encontradas nas costas do Peru, Califórnia, Marrocos e Senegal (CURY e ROY, 1989).

Compreender a variabilidade dos nutrientes à zona eufótica impulsionados pela ressurgência é importante para entender a variabilidade das populações e a dinâmica dos ecossistemas (GARCIA-REYES et al., 2014).

O transporte da água fria a partir de níveis mais profundos para a superfície caracteriza os sistemas de ressurgência costeira. Esse fluxo disponibiliza nutrientes para a camada eufótica, o que aumenta a produção e o crescimento do fitoplâncton. Na costa brasileira, a região do Cabo Frio apresenta a ressurgência mais intensa. A frequência e a intensidade dos ventos dominantes são o principal fator promotor da ascensão da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), mas os meandros e vórtices na Corrente do Brasil, bem como a topografia local e a linha de costa também são importantes (COELHO-SOUZA et al., 2012).

A ACAS tem origem na confluência da corrente do Brasil com a corrente das Malvinas e constitui-se na principal massa de água central do mar territorial brasileiro. Essa massa d'água pode ser identificada por um diagrama de temperatura e salinidade com uma correlação quase linear entre os pontos $T=6^{\circ}\text{C}$, $S=34,5$ e $T=18^{\circ}\text{C}$, $S=36$ (SVERDRUP et al., 1942).

Apesar de ser uma região de ressurgência de menor escala, diversos estudos abordam a ressurgência do Cabo Frio, principalmente devido ao seu caráter atípico. Ao contrário da maioria das regiões de ressurgência, localizadas na costa oeste dos continentes, a ressurgência do Cabo Frio ocorre a leste do continente, um dos fatos que acabou despertando o interesse de pesquisadores (ODA, 1997). Dentre os autores que estudaram a ressurgência do Cabo Frio podemos citar como exemplos RODRIGUES (1973), VALENTIN (1987, 2001), TORRES JUNIOR (1995), CARBONEL (1998), CAMPOS et al. (2000), CALADO (2006), CASTELÃO e BARTH (2006) e CALIL (2009).

GONZALEZ-RODRIGUEZ et al. (1992) caracterizaram o fenômeno da ressurgência em três fases sequenciais, que são fortemente influenciadas pelos ventos locais: a primeira fase, quando a ACAS se eleva trazendo os nutrientes; a segunda fase, quando ocorre um aquecimento superficial acompanhado de um aumento de biomassa e produção primária e a diminuição simultânea das concentrações de nutrientes; e a terceira fase, de afundamento, levando a uma situação oligotrófica e conseqüentemente à diminuição da biomassa e do fitoplâncton devido à dispersão e depleção de nutrientes.

BAKUN (1973) utilizou a teoria de EKMAN (1905), do transporte superficial causado pela tensão do vento, como um índice de ressurgência, *upwelling index* (UI). Como dado de entrada para as equações, ele utilizou o vento geostrófico calculado a partir das

médias mensais do campo de pressão ao nível do mar obtidos do FNWC (*Fleet Numerical Weather Central*) da Marinha dos Estados Unidos da América. Desta forma, ele obteve médias mensais do UI para diversos pontos da costa Oeste da América do Norte de 1946 até 1971. Com essa climatologia ele analisou e discutiu anos anômalos em pontos específicos da costa.

Posteriormente, BAKUN (1975) calculou uma nova série temporal para UI, desta vez com médias diárias e semanais. Para isso manteve a metodologia utilizada em 1973, porém usou outra fonte de dados para o cálculo do vento geostrófico. A fonte de dados utilizada foram os campos de pressão atmosférica ao nível médio do mar, gerado pelo FNWC, disponíveis nos horários sinóticos (00, 06, 12 e 18 GMT), dispostos em uma grade com resolução horizontal de 3 graus. Para uma melhor estimativa do vento próximo à superfície do mar, a direção do vento geostrófico foi reduzida em 15 graus e a magnitude teve uma redução de 30% para aproximar os efeitos de atrito.

Nos dois trabalhos, BAKUN (1973 e 1975) relatou uma distorção no campo de vento devido à topografia e o aquecimento diferenciado entre o continente e o mar. Citou como exemplo a costa sul da Califórnia, onde o gradiente de pressão atmosférica na superfície é aumentado artificialmente devido à presença de uma cadeia montanhosa.

MASON e BAKUN (1986) observaram que havia inconsistências nos dois conjuntos de séries temporais de índices de ressurgência costeira calculados anteriormente por BAKUN (1973 e 1975), ou seja, índices de ressurgência mensais de 1946 até 1971, e médias diárias e semanais do índice de ressurgência com dados sinóticos a cada 6 horas de 1967 até 1973. Devido à forma com que foram calculadas, as duas séries não devem ser misturadas ou utilizadas concomitantemente. Após essas análises as duas séries foram expandidas e atualizadas até 1985 para costa oeste da América do Norte.

BLANTON et al. (1987) calcularam o índice de ressurgência para cada mês ao longo de um período de 17 anos (1969-1985), para um ponto da costa ocidental da Espanha. A variação do índice de ressurgência foi diretamente correlacionada com o posicionamento de dois centros de pressão atmosférica, a Alta dos Açores e a Baixa do Labrador ou Islandês. Variações interanuais do posicionamento destes sistemas têm um impacto mensurável na ressurgência, aumentando ou diminuindo o nitrogênio utilizado pelos mexilhões. Em um estudo de caso, percebeu que em um ano com maior

ressurgência houve um aumento de 15,8% na massa corpórea dos mexilhões, enquanto em um ano com maior subsidência, os mexilhões apresentaram uma redução de 9,5%. Os autores concluíram que previsões de longo alcance, previsões climáticas e de escala sinótica poderiam ser usadas para prever o potencial valor nutricional de mexilhões coletados, permitindo que as práticas de aquicultura minimizem os danos econômicos.

Segundo BAKUN (1990), o índice de ressurgência varia com o aumento dos gases do efeito estufa, gerando um aumento de ressurgências. Assim, as condições de nevoeiros de verão, característicos das regiões de ressurgência, podem tornar-se ainda mais pronunciadas. Os efeitos do aumento da ressurgência no ecossistema marinho são incertos, mas potencialmente dramáticos.

NYKJAER e CAMP (1994) investigaram a variabilidade sazonal e interanual da ressurgência costeira na área de ressurgência do noroeste da África para o período de 1981 a 1991 utilizando dados de temperatura da superfície do mar (TSM) e vento. A partir do conjunto de dados de satélite, um índice de ressurgência de TSM, definido como a diferença de temperatura zonal, foi derivado em função da latitude e do tempo. Os dados de vento do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Alcance foram usados para determinar um segundo índice de ressurgência calculado como a equação do transporte de Ekman perpendicular à costa. Os dois índices independentes foram comparados com dados publicados de variabilidade sazonal e interanual. Indicando que as variabilidades interanuais mais fortes se encontram ao sul de 20°N, onde a ressurgência foi particularmente fraca durante o período de 1982 até o final de 1984, coincidindo com o fenômeno El Niño excepcionalmente forte no Pacífico.

CABANAS e ALVAREZ (2005) construíram uma série temporal de 40 anos do índice de ressurgência baseado no transporte Ekman em uma área oceânica a 150 km da costa Nordeste da Espanha (43°N, 11°W). A análise de frequência mostrou sinais em 365 dias, uma flutuação em 50 dias e 20 dias, essa última relacionada à passagem de tempestades. O transporte de Ekman mostrou diferentes padrões sazonais, sendo o padrão de verão caracterizado pelo transporte em direção ao mar, praticamente perpendicular à linha de costa (favorável ao afloramento), enquanto o padrão de inverno é caracterizado por transporte apontando para o continente (favorável à subsidência). Como resultado, observou que, apesar das condições de afloramento serem mais

favoráveis durante o verão, nos últimos 15 anos, a frequência de eventos de ressurgência ocorridos no inverno aumentou, devido à prevalência de ventos do norte.

SCHWING et al. (2006) observaram que a ressurgência tem um efeito cumulativo sobre a produtividade e a estrutura do ecossistema e assim, geraram um índice de ressurgência acumulativo com base na integração dos índices de ressurgência diários médios proposto por BAKUN (1975). Deste índice acumulativo foi calculada uma série histórica para estudar a produtividade e estrutura do ecossistema da corrente da Califórnia. Neste ambiente, a força da ressurgência costeira é um fator ecológico crítico, particularmente para espécies cujos ciclos de vida estão sintonizados com o ciclo anual da ressurgência. Condições físicas e biológicas incomuns observadas afetaram o ecossistema ilustrando a sensibilidade a possíveis extremos climáticos futuros.

GONZALEZ-NUERO et al. (2014) elaboraram uma análise comparativa de uma série histórica do índice de ressurgência (calculada a partir de cartas do campo de pressão), com índices gerados com dados de satélite (Quikscat), boia meteo-oceanográficas e um modelo atmosférico, para a ressurgência do Noroeste da Península Ibérica. Essa análise mostrou que é possível substituir a série histórica por uma série calculada de modelo numérico atmosférico, tipo reanálise. A série derivada de dados eólicos de boias apresentou sérios problemas de inconsistência temporal, assim como o vento estimado pelos dados de satélite tem problemas metodológicos que dificultam seu uso em estudos em grande escala temporal. As séries oriundas da boia e do satélite podem ser usadas para avaliar períodos curtos, mas não são recomendadas para estudos com grandes períodos.

GARCÍA-REYES et al. (2014), com intuito de prever a biologia, utilizaram três índices que quantificam a ressurgência em escala sinótica: (i) intensidade do vento, (ii) temperatura da superfície do mar (TSM) (iii) disponibilidade de nitrato na superfície. Os cálculos desses índices foram baseados em 31 anos (1982-2012) de dados observados de boias localizadas na costa centro-norte da Califórnia. Todos os resultados apoiam a hipótese de que uma ressurgência moderada é o ideal para o crescimento das populações de fitoplâncton e krill. Os índices baseados na TSM e disponibilidade de nitrato tiveram um desempenho melhor do que o tradicional índice de BAKUN (1973) na previsão das populações.

DEMARCO e FAURE (2000) utilizando dados de TSM, obtidos do canal infravermelho dos satélites da série Meteosat, caracterizaram a dinâmica da ressurgência costeira da África Ocidental no período de 1984 a 1998. Estes dados descrevem a estrutura espacial da ressurgência obtendo um índice de intensidade de ressurgência normalizado, com base nas diferenças de TSM. Através desta técnica, foi possível delinear áreas de desova das espécies pelágicas costeiras. Como estudo de caso, o índice foi aplicado para localização de *Sardinella aurita* no Senegal e *Octopus vulgaris* na Mauritânia.

CARVALHO et al. (2003) calcularam índice térmico de ressurgência que leva em consideração a área de abrangência do fenômeno e a diferença de temperatura, para a ressurgência do Cabo Frio no verão de 2001. Os dados de TSM e vento foram obtidos de satélites. Este índice foi correlacionado com a direção e intensidade do campo de vento local. Os resultados preliminares indicam que o índice de intensidade de ressurgência possui correlação significativa com a intensidade do vento zonal (paralelo a costa), com 12 e 24 horas antes de cada condição de afloramento.

PÉREZ-BRUNIUS et al. (2007) compararam o índice de ressurgência calculado com três diferentes fontes: vento observado por uma estação meteorológica próximo à costa, vento estimado pelo satélite e vento geostrófico calculado a partir do campo de pressão de um modelo atmosférico. Neste trabalho, são expostas algumas dificuldades em utilizar dados provenientes de satélite próximo à costa, onde não são bem representadas as variações induzidas topograficamente e dificuldades devido à baixa resolução temporal, por exemplo, omitindo efeito de brisa.

Diversos trabalhos aplicaram o índice de ressurgência em estudos de causas ambientais e população de peixes no Sistema da Corrente de Califórnia. MASON e BAKUN (1986) citam estudos relacionando o índice com as seguintes espécies, anchova do norte, cavala do Pacífico, sardinha, pescada do Pacífico, bonito, linguado de Dover, rockfish, salmão coho, caranguejo Dungeness e camarão rosa. O índice também foi usado em vários estudos de aspectos biológicos, físicos e da variabilidade do ecossistema da Califórnia.

O índice de ressurgência desenvolvido por BAKUN (1973) tem sido amplamente utilizado em estudos no Noroeste do Sistema de Ressurgência Ibérico, desde oceanografia química até engenharia de pesca. Mais recentemente, tem sido aplicado

para a determinação de tendências temporais do plâncton, e avaliação da dinâmica de longo prazo das proliferações de algas nocivas nesta Região (GONZALEZ-NUEVO et al. 2014).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÍNDICE DE RESSURGÊNCIA

Considerando os diversos estudos relacionando a ressurgência do Cabo Frio ao regime de ventos na região, foi desenvolvido um índice baseado no transporte de Ekman para caracterizar o fenômeno da ressurgência em termos deste transporte.

EKMAN (1905) desenvolveu uma teoria para correntes marinhas provocadas pelo atrito do vento com a superfície do mar, considerando a força de atrito como única fonte de transferência de momento do vento para o oceano e a força de Coriolis. Para que essa teoria seja válida deve-se assumir um oceano homogêneo infinito, movimento não acelerado, vento uniforme soprando à superfície livre do mar.

Partindo do pressuposto que o transporte superficial da água gerado pela tensão do vento (*wind stress*) é a causa a ressurgência costeira, BAKUN (1973) desenvolveu um método para calcular a ressurgência baseado na teoria do transporte de Ekman.

O transporte de massa médio por seção de superfície do oceano é direcionado 90 graus à esquerda (no hemisfério sul) da direção do vento. A magnitude deste transporte está relacionada com a intensidade do vetor tensão do vento sendo representados pelas seguintes expressões matemáticas:

$$Q_x = \frac{\tau_y}{f \cdot \rho_w} \cdot 10^3 \quad (1)$$

$$Q_y = \frac{\tau_x}{f \cdot \rho_w} \cdot 10^3 \quad (2)$$

$$\tau_x = \rho_a \cdot C_d \cdot \sqrt{u^2 + v^2} \cdot u \quad (3)$$

$$\tau_y = \rho_a \cdot C_d \cdot \sqrt{u^2 + v^2} \cdot v \quad (4)$$

Onde:

Q_x e Q_y são respectivamente as componentes zonal e meridional do transporte de Ekman;

τ_x e τ_y são respectivamente as componentes zonal e meridional do vetor tensão do vento;

u e v são respectivamente as componentes zonal e meridional do vento;

ρ_a é a densidade do ar ($1,22 \text{ kg m}^{-3}$ a 15°C);

C_d é o coeficiente de arrasto adimensional empírico ($C_d = 0,0014$);

f é o parâmetro de Coriolis [$f = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ seno (latitude)}$];

ρ_w é a densidade da água ($\sim 1025 \text{ kg m}^{-3}$).

A figura esquemática (figura 4.1) representa o vetor vento predominante de região (NE) e o vetor do transporte de Ekman. Devido à orientação Leste-Oeste da Praia de Massambaba é notável que a componente meridional negativa é mais favorável ao transporte de água da costa em direção ao oceano.

Ao decompor o vento em componentes zonal (u) e meridional (v) verifica-se que, a intensidade da componente zonal negativa do vento é o principal fator responsável por afastar a camada superficial e promover o movimento ascendente de água junto à costa.

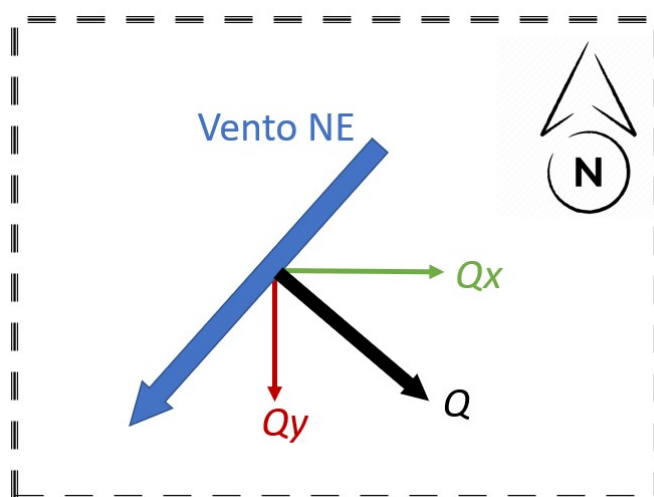


Figura 4.1. Vetor do vento (azul), transporte de Ekman (preto), componente zonal do transporte (verde) e meridional do transporte (vermelho).

4.2 ÁREA DE ESTUDO

A região próxima ao município do Arraial do Cabo, mais precisamente entre a Praia de Massambaba e a Ilha do Cabo Frio, é caracterizada pela ocorrência de ressurgência costeira. A Praia de Massambaba fica localizada entre a lagoa de Araruama

e o Oceano Atlântico, com uma extensão de quase 50 km, do município de Saquarema até Arraial do Cabo, como ilustra a figura 4.2.

Na figura 4.2 estão marcados os pontos referentes às estações de coleta dos dados utilizados no trabalho, os pontos estão próximos, sendo a maior distância entre eles aproximadamente de 20 km. Os dados utilizados são apresentados detalhadamente na seção 4.3.

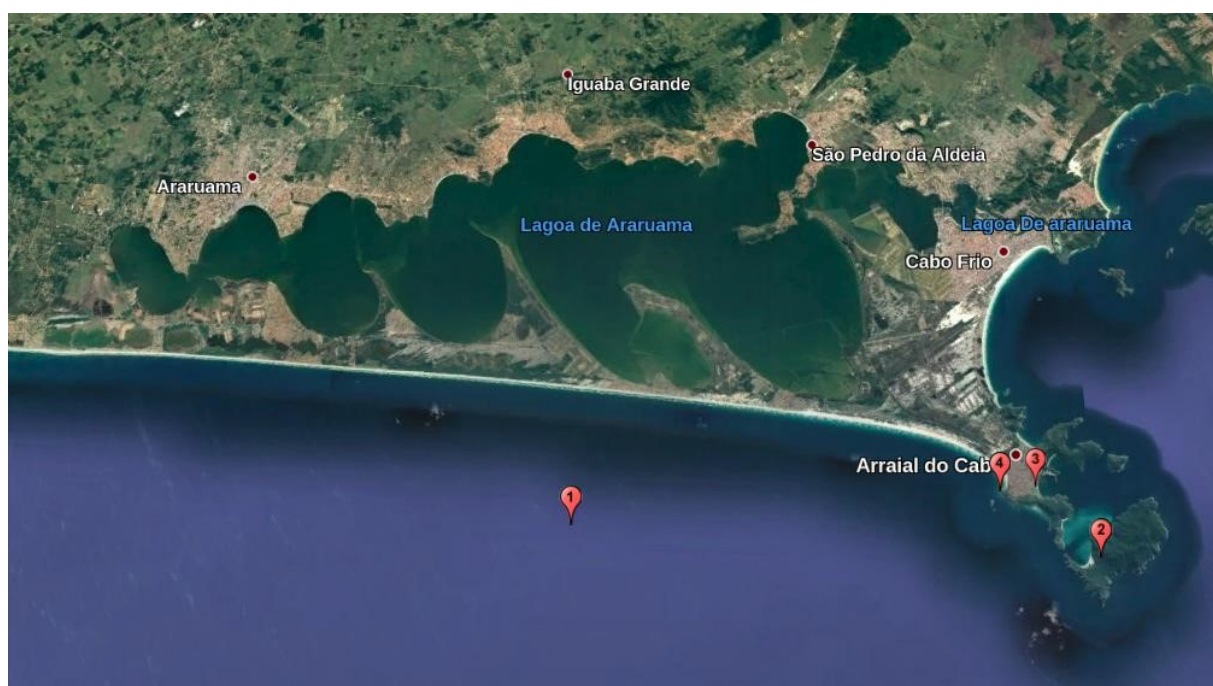


Figura 4.2 Área de estudo, Praia de Massambaba (22°56'31"S, 042°12'40"W). Ponto 1, Boia meteo-oceanográfica, Ponto 2, ponto de grade do ERA-Interim, Ponto 3, Estação Meteorológica do INMET e Ponto 4, medições da Álcalis. Fonte: Google Earth, 2019.

4.3 INFORMAÇÕES METEO-OCEANOGRÁFICAS

Para o presente estudo foram utilizadas três fontes de dados meteo-oceanográficos: dados coletados da boia meteo-oceanográfica do projeto Sistema de Obtenção de Dados Oceanográficos (SIODOC), medições de temperatura da superfície do mar feitas pela Companhia Álcalis, e informações de vento a 10m geradas pelo projeto de reanálise do Centro Europeu de Previsão do Tempo de Médio Alcance (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF).

4.3.1 BOIA METEO-OCEANOGRÁFICA SIODOC

Com objetivo de manter um monitoramento ambiental, o Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) manteve em operação uma boia meteo-oceanográfica, em 22° 59,62' Sul; e 042°11,65' Oeste, cerca de 6,2 km da costa da Praia de Massambaba aproximadamente 13 km a oeste da Ilha do Cabo Frio, em Arraial do Cabo, Rio de Janeiro. O equipamento fez parte do subprojeto SIODOC que integrava o projeto Sistema de Obtenção de Dados Ambientais para Defesa (SIOCD), custeado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

Durante o período de 15 de julho de 2013 até 22 de novembro 2015 o equipamento realizou medidas de temperatura e salinidade na superfície do mar e nas profundidades de 5, 10, 15, 20, 25, 35 e 45m. Devido a falhas nos sensores de 5, 15, 20 e 35m de profundidade, os dados provenientes destes sensores não foram utilizados no presente estudo.

Além dos dados oceanográficos a boia registrava variáveis atmosféricas, como temperatura do ar, pressão atmosférica, irradiância solar e intensidade e direção do vento a três metros acima da superfície do mar. A boia tinha uma frequência horária de aquisição dos dados, transmitindo-os via satélite.

A Figura 4.3 ilustra o esquema dos sensores e fundeio da boia meteo-oceanográfica do projeto SIODOC.

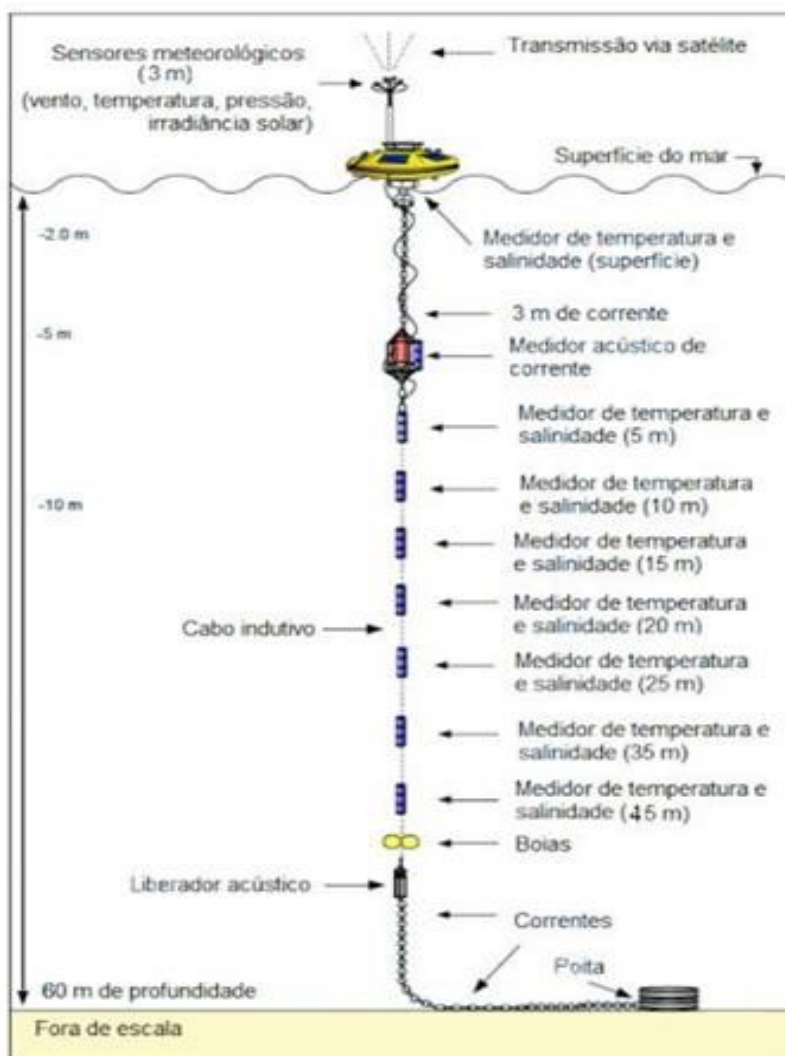


Figura 4.3 Boia meteo-oceanográfica. Fonte: Projeto SIODOC.

SILVA et al, (2006) calcularam o tempo de resposta da ressurgência, ou seja, o tempo que leva para a TSM chegar a 18°C a partir do momento que o vento começa a soprar do quadrante NE. O tempo de resposta varia durante o ano, sendo menor no verão, entre 20 a 40 horas, e maior no inverno, ficando superior a 80 horas. O tempo de retorno, período em que cessa o vento do quadrante NE e a TSM atinge valor superior a 18°C , também foi calculado ficando entre 10 e 30 horas.

A boia meteo-oceanográfica realizava observações com uma frequência horária. Com base no tempo de resposta e de retorno estimado da ressurgência do Cabo Frio foi calculado o índice Q de três formas diferentes: somatório diário do transporte de Ekman (Q_{B1}), somatório de dois dias (Q_{B2}) e somatório de três dias (Q_{B3}). Para homogeneizar e

reduzir ruídos de alta frequência das séries de temperaturas foram utilizadas as médias diárias.

Foi elaborada uma análise probabilística da ocorrência de ressurgência em função da intensidade do índice de ressurgência. Para certificar que a distribuição de frequência do índice para dias com ressurgência não é similar à distribuição natural de Q foi utilizado o teste de hipótese, não paramétrico, Chi-quadrado (χ^2) de Pearson. Esse teste tem como princípio básico comparar proporções, ou seja, possíveis divergências entre as frequências observadas e esperadas para um certo evento.

Os dados obtidos da boia meteo-oceanográfica foram eleitos como conjunto principal por possuir um perfil de temperatura do mar estendendo da superfície até 45m de profundidade, conforme é possível observar na figura 4.4.

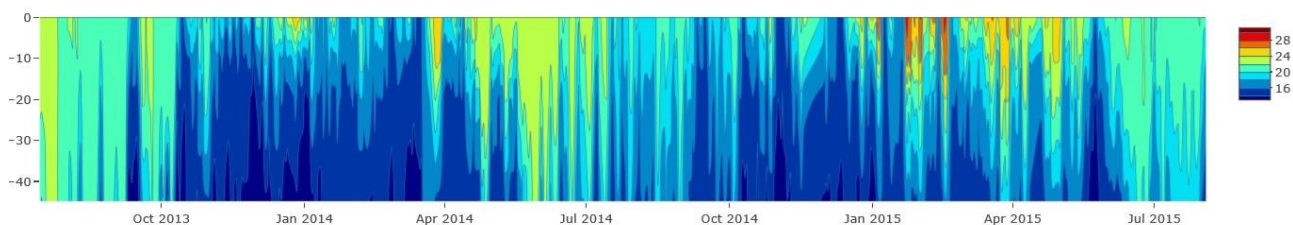


Figura 4.4. Perfil de temperatura da água do mar, em graus Celsius, medido pela boia meteo-oceanográfica. Foram interpolados linearmente os dados dos sensores, 10m, 25m e 45m de profundidade, para o período de 15 de julho de 2013 até 3 de agosto 2015.

4.3.2 TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR ÁLCALIS

A Companhia Nacional de Álcalis instalada em Arraial do Cabo, Rio de Janeiro, funcionou no período de 1960 a 2006, tendo como principal produto a barrilha (PEREIRA, 2010). A empresa realizava medições rotineiras da temperatura da água do mar. Essas observações deram origem a uma das mais longas séries de dados oceanográficos do oceano Atlântico Sul. A série é proveniente de medições horárias da temperatura da água para avaliar a eficiência dos trocadores de calor da fábrica (CALIL, 2009).

A figura 4.5. mostra a série temporal das médias diárias de TSM da Álcalis, e a linha vermelha indica a isoterma de 18°C. As medições foram realizadas na Ponta da Cabeça, a costa rochosa localizada próxima à Praia Grande. A série se estende de 1971 até 2002, com algumas falhas, sendo o período mais consistente de 1971 a 1992. Neste trabalho foram usadas as médias diárias das observações.

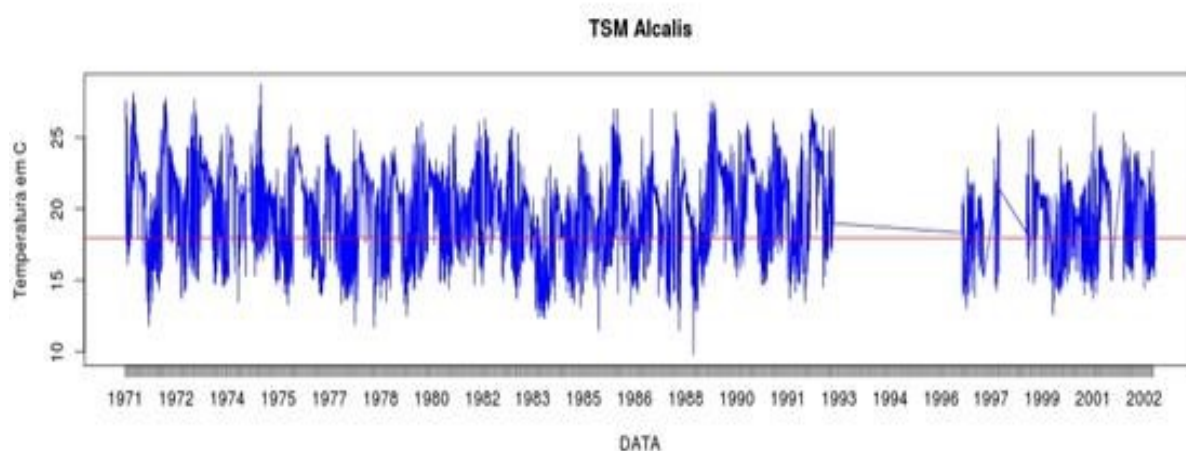


Figura 4.5. A linha azul representa a série temporal da média diária da temperatura da superfície do mar, para o cálculo da média foram utilizados os dados obtidos pela Companhia Nacional Álcalis, a linha vermelha ilustra a isoterma de 18°C.

4.3.3 REANÁLISE ERA INTERIM

Em estudos meteorológicos, há a necessidade de grandes volumes de dados de qualidade para gerar longas séries temporais contínuas e consistentes, apesar da dificuldade de se obter dados com essas características (LEMOS FILHO et al., 2013). Com o intuito de reduzir as falhas e possíveis erros de observação, os grandes centros de previsão numérica do tempo passam os dados meteorológicos por diversos filtros até serem assimilados pelos modelos. Esse primeiro campo do modelo contendo as condições iniciais é chamado de análise.

Para iniciar um modelo operacional de previsão do tempo, há um prazo limite para aquisição de dados, pois, quanto mais horas são utilizadas no processamento, menor é a previsão útil. Desta forma, os dados que chegam após esse prazo não são aproveitados para a previsão, mas são assimilados posteriormente para estudos de modelagem e climatologia. Toda vez que há uma atualização no equacionamento ou método computacional de assimilação de dados é necessário refazer todo o procedimento de análise (de uma determinada data até o presente), sendo esse processo chamado de reanálise. Os dados de reanálise fornecem uma análise multivariada, espacialmente completa e de grande valor para a pesquisa.

Uma vantagem da reanálise é a coerência física, onde os parâmetros estimados devem ser consistentes com as leis da física, bem como com as observações. Um modelo suficientemente realista é capaz de extrapolar informações de parâmetros observados localmente para parâmetros não observados em locais próximos.

O projeto ERA-Interim é a versão mais atual da reanálise atmosférica global produzida pelo European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Este projeto disponibiliza dados globais em horários sinóticos (00, 06, 12 e 18TMG) desde 1 de janeiro de 1979 até os dias atuais. Uma descrição completa do ERA-Interim é encontrada em DEE et al. (2011).

Ciente de que a reanálise ERA-Interim possui diversas configurações, para este estudo foi eleita a versão com resolução espacial de $0,75^\circ$ (~ 83 km), que possui um ponto de grade nas coordenadas 23° Sul e 42° Oeste. Este ponto fica localizado na Ilha do Cabo Frio, próximo à Praia do Farol, e, portanto, dentro da área de estudo. Desta forma, as informações da reanálise foram utilizadas sem a necessidade de interpolações.

As incertezas nas reanálises são muito difíceis de quantificar, sendo fundamental considerar os dados de reanálise em conjunto com séries de dados climáticos mais tradicionais, observacionais (SIMMONS et al., 2010). Desta forma a série temporal do ERA-Interim foi comparada com os dados da Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática de Arraial do Cabo, código OMM 86892, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Esta estação está localizada na latitude $22,975468^\circ$ Sul, longitude $42,021450^\circ$ Oeste e altitude de 3m, dentro do IEAPM na Praia dos Anjos.

A figura 4.6 mostra o histograma direcional do vento para os dados de reanálise do projeto ERA-Interim (a) e dos dados da estação meteorológica do INMET (b), onde é possível observar a semelhança entre as duas séries temporais, que apresentam predominância no primeiro quadrante (quadrante que compreende 0° até 90°). No entanto os dados da estação do INMET indicam uma maior tendência para o leste sendo a direção predominante ENE. Por sua vez os dados da reanálise são mais direcionados para norte com direção predominante de NE.

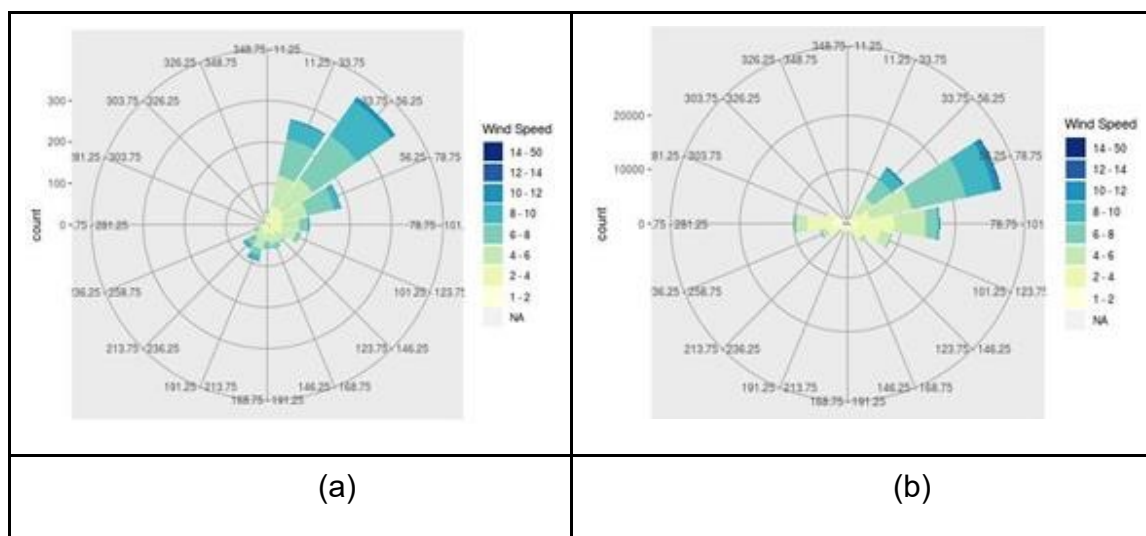


Figura 4.6 (a) Histograma direcional do vento (m / s) ERA-Interim no período de 2007 a 2017 com uma frequência de quatro valores diários (horários sinóticos); (b) Histograma direcional do vento (m / s) da estação 86892 do INMET para o período de 2007 a 2017 com uma frequência horária.

A análise de uma série temporal do vento à superfície, observada próximo ao Cabo Frio, indica um sinal de brisa marítima, mostrando os ventos de nordeste mais zonais durante a tarde por causa da brisa do mar. Como a circulação da brisa marinha depende da diferença de temperatura entre a terra e o mar, a circulação pode ser mais forte quando a ressurgência ocorre na região. Por outro lado, como a ressurgência costeira é forçada pelo vento de superfície, modificações nesse campo, devido à brisa marítima local, também podem afetar a ressurgência na região (FRANCHITO et al., 2008).

Desta forma, o efeito de brisa explica o fato de o vento observado na estação meteorológica ser mais zonal do que o do ERA-Interim. A reanálise é em sua natureza uma representação da escala sinótica e não consegue captar o efeito da brisa. Outra causa provável é a interferência do relevo, onde ao sul da estação do INMET encontra-se o Pontal do Atalaia, uma montanha com altura de aproximadamente 200m com orientação leste oeste, que pode interferir na direção do vento.

Os ventos oriundos da reanálise do projeto ERA-Interim foram utilizados para o cálculo do índice ressurgência (Q). Esse índice foi trabalhado juntamente com as temperaturas da superfície do mar observadas na Ponta da Cabeça pela Álcis. Esse conjunto de dados se diferencia dos dados observados da Boia Meteo-oceanográfica por

ser uma série temporal mais ampla. Assim foi possível realizar uma análise da variação interanual e da sazonalidade.

Os dados de reanálise são disponibilizados quatro vezes ao dia, assim foi calculado o índice somatório diário (Q_{E1}), somatório de dois dias (Q_{E2}) e somatório de três dias (Q_{E3}), mesma metodologia utilizada com os dados provenientes da boia meteo-oceanográfica.

4.4 ANÁLISE DA TEMPERATURA DO MAR

A ressurgência do Cabo Frio é caracterizada como o afloramento, presença na superfície, da Água Central do Atlântico Sul (ACAS). SVERDRUP et al. (1942) analisaram diagramas de temperatura *versus* salinidade para caracterizar a ACAS, sugerindo como limite superior a temperatura do mar de 18°C e salinidade de 36. Este critério foi adotado no presente trabalho para identificar um evento de ressurgência.

As temperaturas medidas pela boia meteo-oceanográfica foram analisadas em três situações: na primeira situação, se houve ou não afloramento, com TSM menor que 18°C à superfície; na segunda, se a profundidade da isoterma de 18°C (h18) estava aumentando e na terceira situação se a profundidade da isoterma de 18°C estava diminuindo. Para as análises da altura da isoterma h18, as alturas foram calculadas através de uma interpolação linear, dentro da camada da superfície até 45m de profundidade.

Para caracterizar o comportamento médio da TSM em Arraial do Cabo foram analisadas as médias mensais de TSM e a média mensal de dias com ressurgência dos dados da Álcalis. Com intuito de observar as variações interanuais foram calculadas as anomalias anuais (média de todo o período menos média do ano), tanto da TSM como do índice de ressurgência gerado pelos dados do ERA-Interim.

4.5 MÉTODOS COMPUTACIONAIS

Todos os tratamentos de dados, cálculos estatísticos e gráficos das séries temporais foram elaborados utilizando a linguagem de programação “R”. O ambiente computacional R foi eleito por ser uma linguagem de programação especializada em

manipulação, análise e visualização gráfica de dados. Outro fator importante é o fato do R ser um software livre sob licença GNU. Uma descrição detalhada é encontrada em R Core Team (2018).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma melhor apresentação os resultados são expostos e discutidos por séries, primeiramente os resultados da boia meteo-oceanográfica e posteriormente os da reanálise ERA-Interim.

5.1 SÉRIE TEMPORAL DA BOIA METEO-OCEANOGRÁFICA

A seguir estão expostos os resultados obtidos do tratamento de dados da série temporal provenientes de observações realizadas pela boia meteo-oceanográfica do projeto SIODOC. Essa série compreende o período aproximado de 2 anos, de 18 julho 2013 até 26 julho de 2015.

Conforme exposto no item 4.3.1 o índice Q foi calculado de três formas diferentes: somatório diário (Q_{B1}), somatório de dois dias (Q_{B2}) e somatório de três dias (Q_{B3}). Para as temperaturas foram utilizadas as médias diárias. A Figura 5.1 mostra a evolução temporal de Q_{B2} .

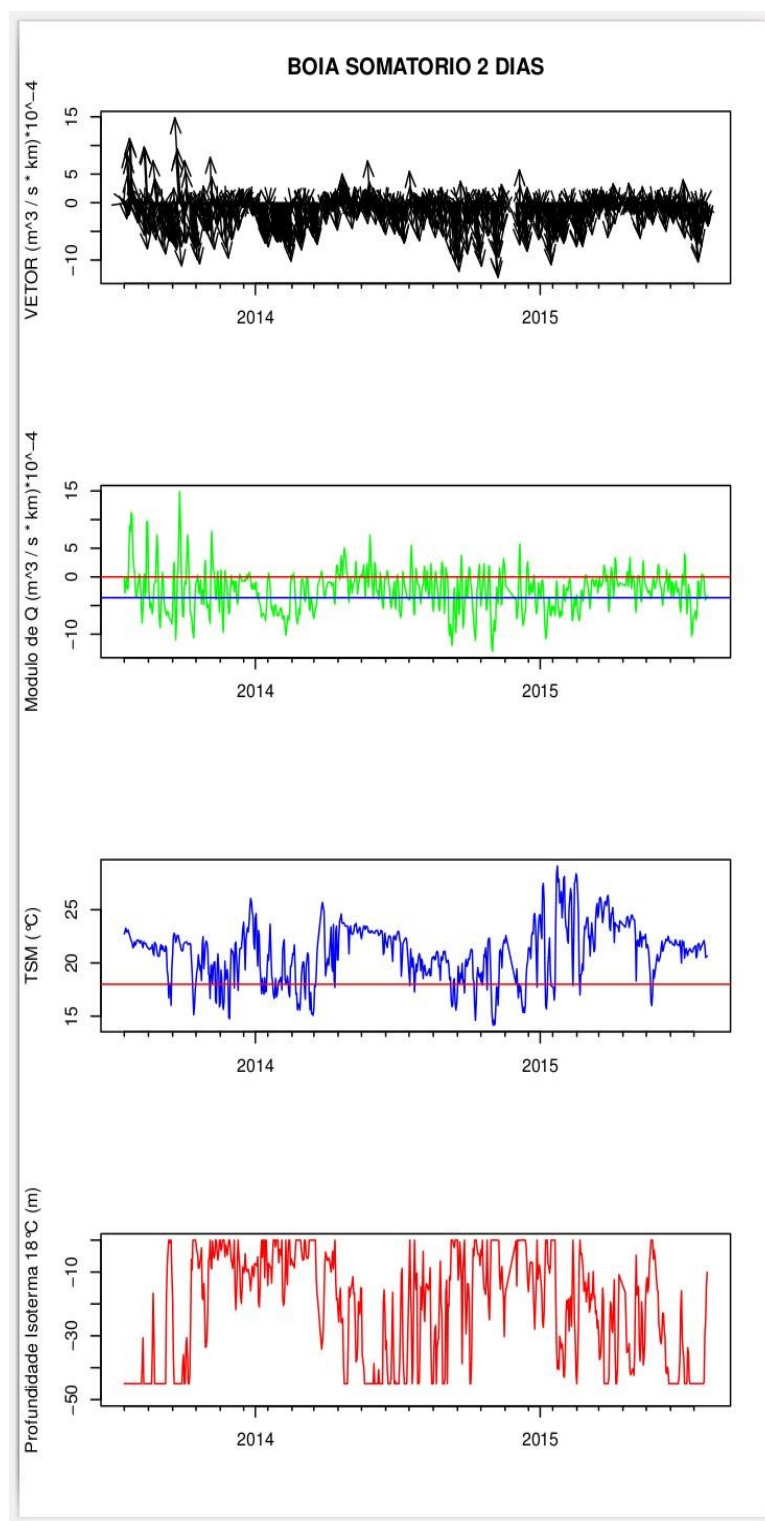


Figura 5.1 Evolução temporal de Q_{B2} , onde: primeiro quadro vetor de Q_{B2} ; segundo quadro de Q_{B2y} (linha verde), isolinha de zero (linha vermelha) e isolinha do valor médio de Q_{B2y} negativo (linha azul); terceiro quadro TSM (linha azul), isoterma de 18°C (linha vermelha); quarto quadro profundidade da isoterma de 18°C na camada de 45 m até superfície (h18).

Os resultados obtidos revelaram eventos recorrentes correlacionando as temperaturas do mar e o índice Q, em especial a componente meridional do índice, Q_y . Para um melhor entendimento desses eventos foram escolhidos cinco casos para exemplificar, são eles:

Tabela 5.1 Descrição sucinta dos casos.

	Período	Evento
CASO I	01 a 20 janeiro 2015	$Q_{B2y} < 0$ forte, TSM $< 18^\circ\text{C}$
CASO II	12 a 30 junho 2014	$Q_{B2y} < 0$ fraco, TSM $> 18^\circ\text{C}$, elevação de h18
CASO III	12 a 30 abril 2014	$Q_{B1y} > 0$, subsidência de h18
CASO IV	15 a 31 maio 2015	$Q_{B2y} < 0$ fraco, TSM $< 18^\circ\text{C}$
CASO V	07 a 31 julho 2015	$Q_{B2y} < 0$ forte, TSM $> 18^\circ\text{C}$

A série Q_{B2} (somatório de dois dias) foi escolhida para os casos de ressurgência, pois foi a série que melhor representou o fenômeno, onde 99,3% dos dias com TSM menor que 18°C o Q_{B2y} apresentou valores negativos, enquanto Q_{B1} apresentou 95,4% e Q_{B3} 99,2%. Para representar o caso de subsidência foi a eleita série Q_{B1} , na qual nos dias com Q_{B1y} positivo, em 52,8% a isoterma de 18°C ficou mais profunda ou menor que -45m, enquanto Q_{B2} 50,7% e Q_{B3} 48,8%. Como referência de forte e fraco foi utilizado valores abaixo e acima da média de Q respectivamente.

A seguir os casos são expostos detalhadamente com figuras ilustrativas da evolução temporal de Q, TSM e h18. (Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6).

5.1.1 CASO I

No primeiro evento foi observado a ocorrência de Q_y forte, que gera uma queda da TSM abaixo de 18°C . Para este evento foi escolhido o período do dia 01 ao dia 20 de janeiro de 2015 chamado de CASO I.

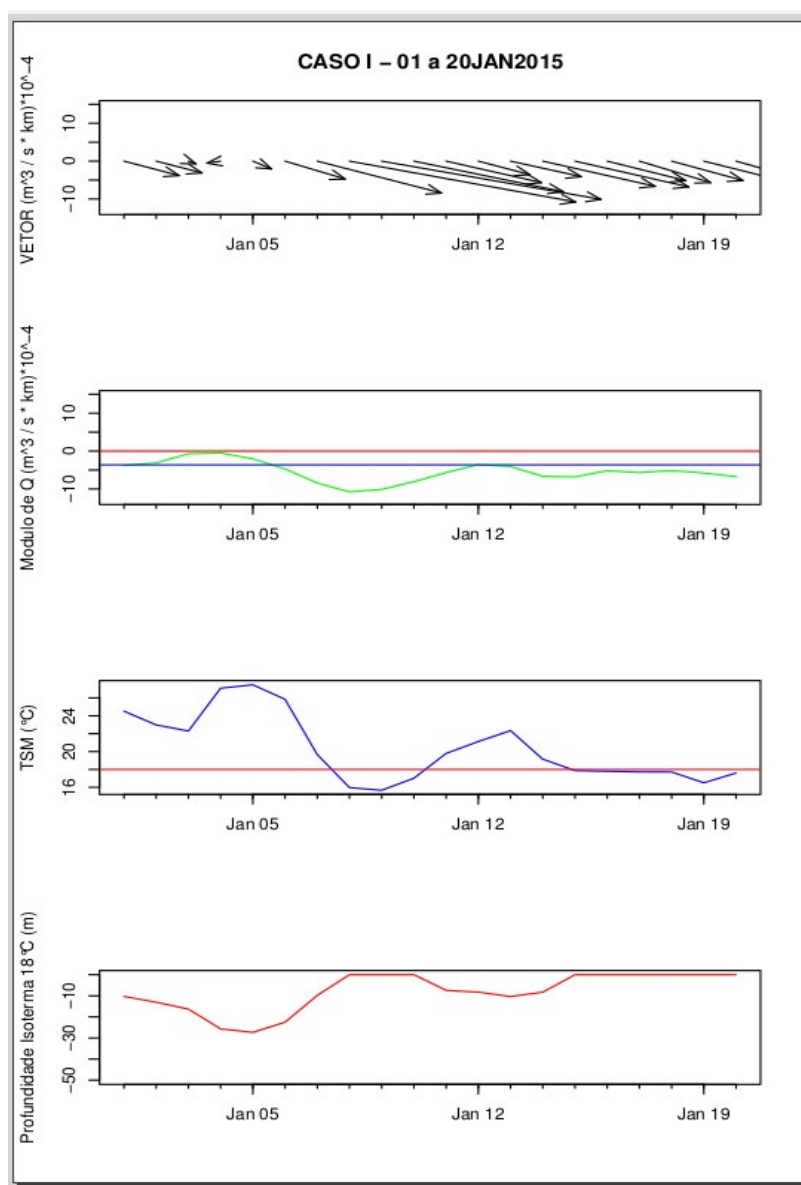


Figura 5.2 CASO I, período de 01 a 20 janeiro 2015, primeiro quadro vetor de Q_{B2} ; segundo quadro modulo de Q_{B2y} (linha verde), isolinha de zero (linha vermelha) e isolinha do valor médio de Q_{B2y} negativo (linha azul); terceiro quadro TSM (linha azul), isoterma de 18°C (linha vermelha); quarto quadro profundidade da isoterma de 18°C na camada de 45 m até superfície (h18).

A série que melhor representou o caso foi o somatório de dois dias do índice (Q_{B2}). Na figura 5.2 é possível observar que no dia 5 o Q_{B2y} encontra-se com valores negativos, a partir do dia 6 o índice ficou abaixo da média de Q_{B2y} negativo ($-36 \cdot 10^3 \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$), no dia 8 atingiu o mínimo do período com um valor de $-107 \cdot 10^3 \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$ e a partir do dia 9 começou a perder força.

Esses valores do índice geraram uma elevação de h_{18} de -27m até a superfície. Já a TSM teve uma queda brusca na temperatura ($\sim 12^\circ\text{C}$), passando de $27,4^\circ\text{C}$ do dia 5 para $15,7^\circ\text{C}$ no dia 9. Este caso ilustra o que é esperado no modelo teórico desenvolvido por Ekman (1905) e aplicado por Bakun (1973), o vento NE gera uma componente Q_{B2y} negativo que, por sua vez, promove o transporte das águas superficiais em direção oposta à costa e, por continuidade, a ACAS é conduzida de camadas inferiores até a superfície.

É importante ressaltar que não é qualquer valor de Q_{B2y} negativo que gera ressurgência. Apenas 17% das ocorrências de Q_{B2y} negativo estão relacionadas a TSM menor que 18°C . A intensidade é outro fator importante, sendo 88% das ocorrências de ressurgência o Q_{B2y} apresentava um valor abaixo da média ($-36 \cdot 10^3 \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$).

5.1.2 CASO II

Outro evento percebido é que valores pequenos do índice, abaixo da média de Q_{B2y} , podem não gerar um afloramento, porém existe uma elevação da isoterma de 18°C . Assim foram utilizados os dados do período de 12 a 30 junho de 2014 para exemplificar o que foi chamado de CASO II.

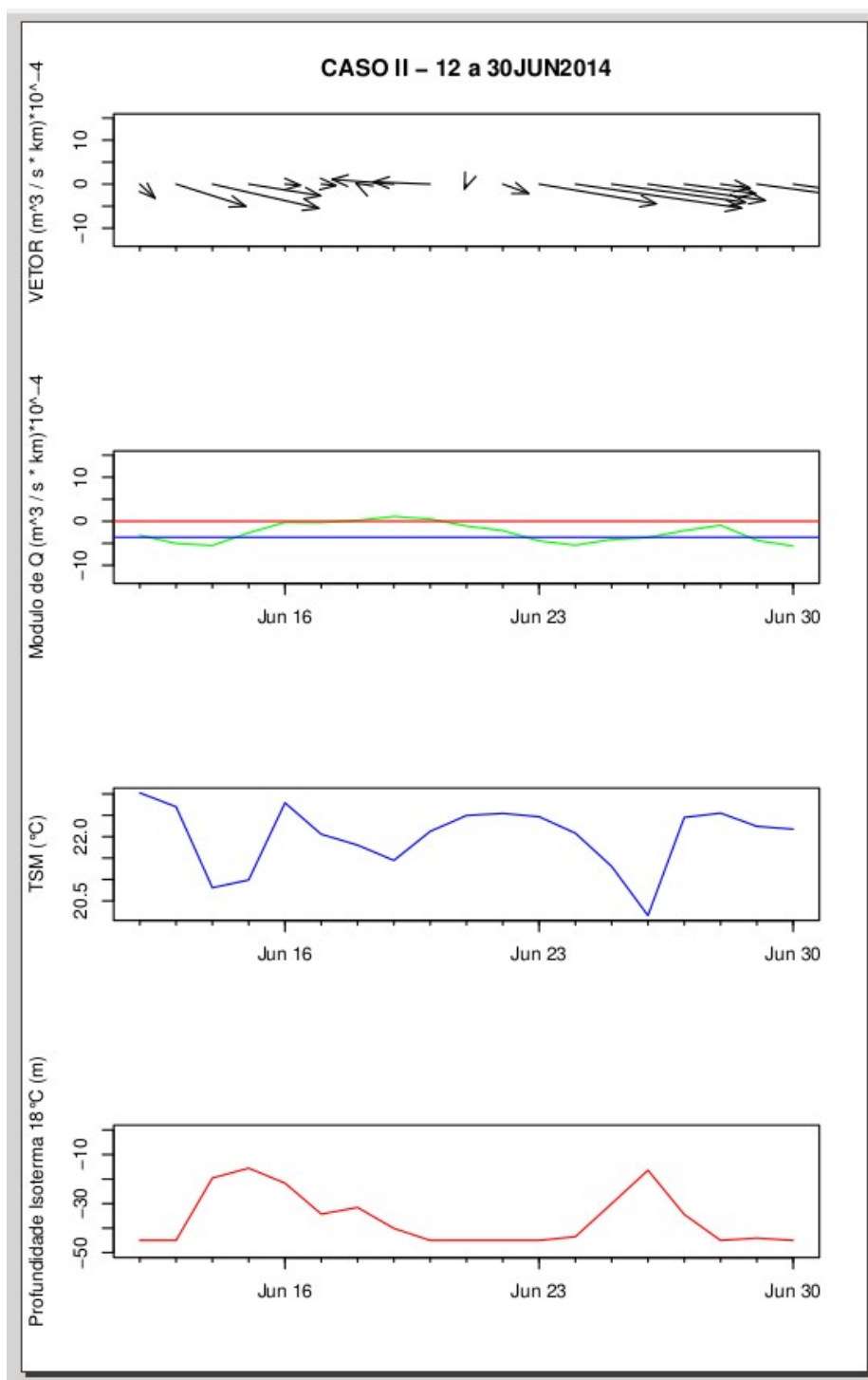


Figura 5.3 CASO II, período de 12 a 30 junho 2014, primeiro quadro vetor de Q_{B2} ; segundo quadro modulo de Q_{B2} (linha verde), isolinha de zero (linha vermelha) e isolinha do valor médio de Q_{B2} negativo (linha azul); terceiro quadro TSM (linha azul), isoterma de 18 $^{\circ}\text{C}$ (linha vermelha); quarto quadro profundidade da isoterma de 18 $^{\circ}\text{C}$ na camada de 45 m até superfície (h18).

Verifica-se na figura 5.3 que Q_{B2y} apresenta valores negativos a partir do dia 21 com o menor valor no dia 24 ($-54 \cdot 10^3 \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$). No dia 24 começa uma redução da profundidade da isoterma de 18°C , passando de -43 m para -16m no dia 26. A TSM registrou uma pequena queda de 22,5 para $20,1^\circ\text{C}$, no entanto não houve afloramento.

Este caso mostra que dependendo da profundidade da ACAS valores próximos à média do índice podem não ser o suficiente para gerar um afloramento. Porém, verificou-se uma elevação da isoterma de 18°C , o que pode ser suficiente para transportar nutrientes para a camada eufótica favorecendo a produção primária na região. Dentre todos os dias que apresentaram Q_{B2y} negativos, apenas 17% tinha uma TSM menor que 18°C , indicando que não basta ter Q_{B2y} negativo para ter ressurgência.

5.1.3 CASO III

O terceiro evento é representativo da subsidência (downwelling), quando Q_y é positivo e existe uma penetração de águas mais quentes em camadas mais profundas. Para este evento que foi chamado de CASO III, o período escolhido foi 12 a 30 de abril de 2014. Diferente dos outros casos a série temporal que mais bem representou este caso foi o somatório de um dia Q_{B1} , onde 54% das ocorrências de Q_{B1y} positivo houve um aumento da profundidade de h18.

Na figura 5.4 é visível nos dias 15, 21 e 24 três picos onde Q_{B1y} ficou acima da média dos valores positivos. No pico do dia 15, apesar de um aumento na profundidade h18, a TSM diminuiu, e essa redução não tem conexão com Q_{B1y} . Nos dias 21 e 24 não houve alteração significativa da TSM, mas é verificada uma redução gradativa dos valores da isoterma de 18°C até a profundidade de -45m, localização do último sensor.

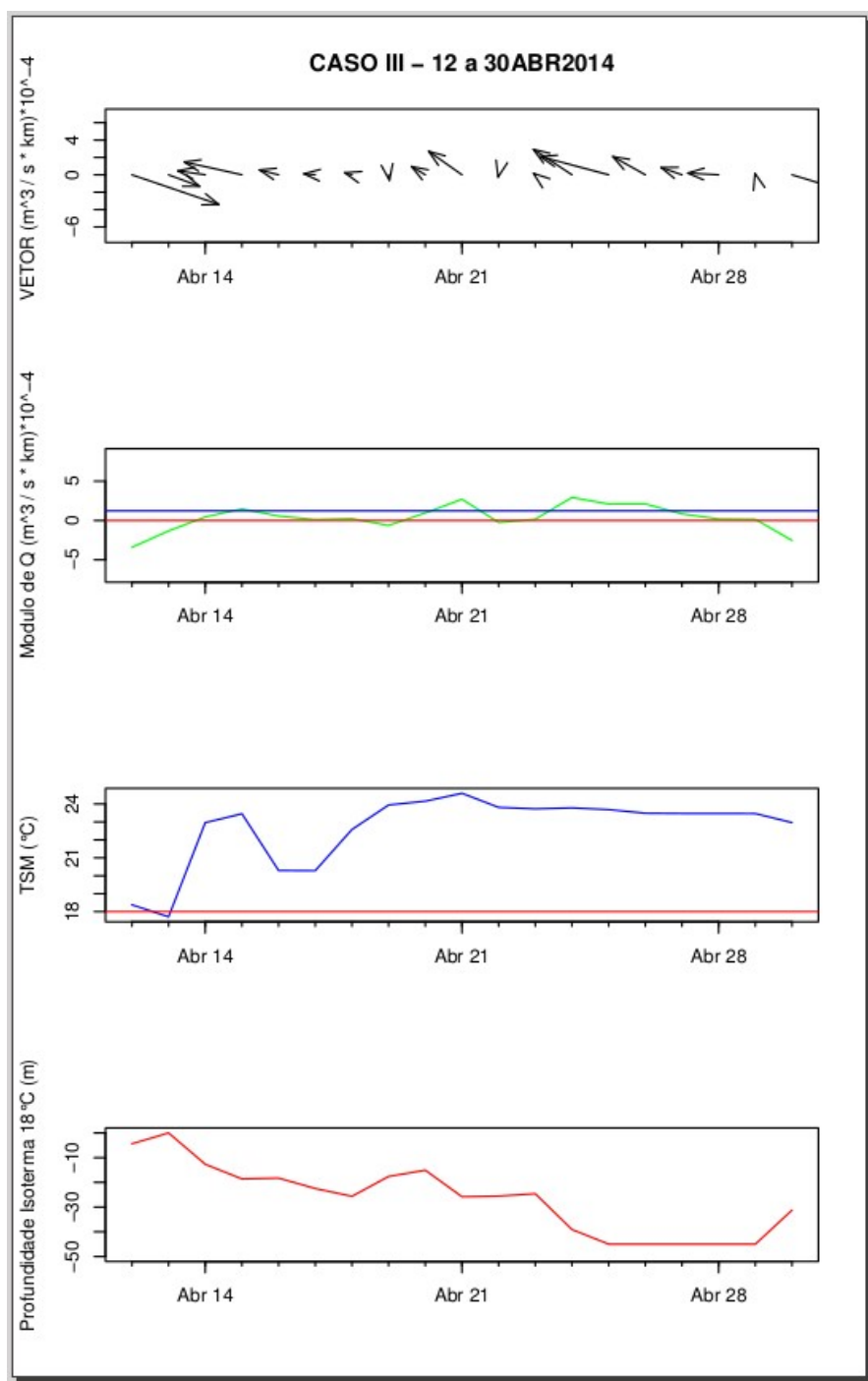


Figura 5.4 CASO III, período de 12 a 30 abril 2014, primeiro quadro vetor de Q_{B1} ; segundo quadro modulo de Q_{B1} (linha verde), isolinha de zero (linha vermelha) e isolinha do valor médio de Q_{B1} negativo (linha azul); terceiro quadro TSM (linha azul), isoterma de 18 $^{\circ}\text{C}$ (linha vermelha); quarto quadro profundidade da isoterma de 18 $^{\circ}\text{C}$ na camada de 45 m até superfície (h18).

5.1.4 CASO IV

O quarto evento é a ocorrência de ressurgência com um Q_y fraco, próximo a média do Q_y negativo. Para este evento (CASO IV), o período escolhido foi 15 a 31 de maio de 2015.

Desde o início do caso até o dia 23 houve um decréscimo gradual de Q_{B2y} até o valor próximo à média de Q_{B2y} negativo ($-36.5 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$). Desta forma h18 que estava em -32,4m foi subindo até chegar à superfície no dia 23. A TSM teve uma queda de aproximadamente 6°C atingindo a mínima (16°C) no dia 24. Apesar de pouco comum esse evento pode ocorrer quando houver um Q_y negativo persistente e a ACAS não estiver muito profunda.

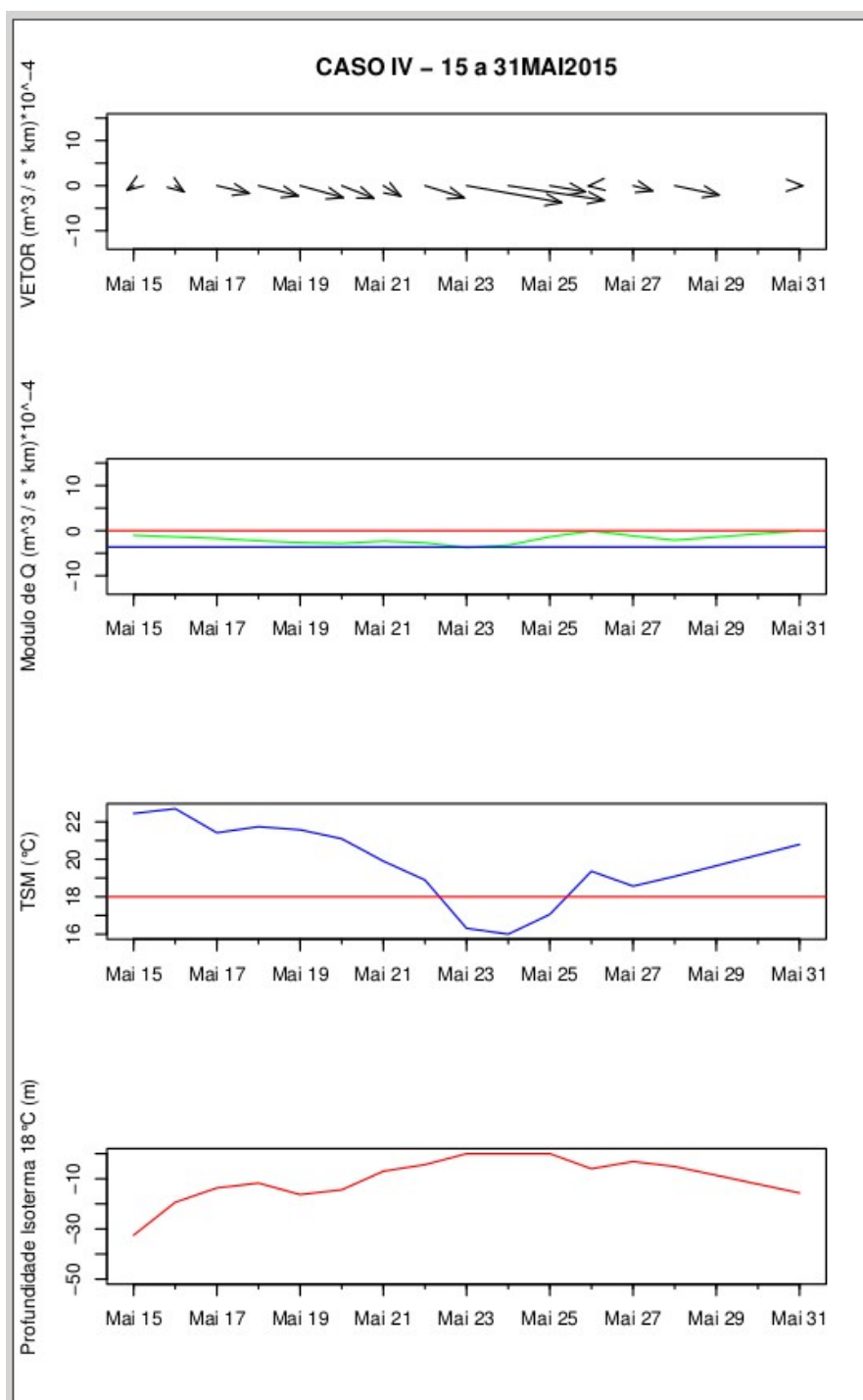


Figura 5.5 CASO IV, período de 15 a 31 maio 2015, primeiro quadro vetor de Q_{B2} ; segundo quadro modulo de Q_{B2y} (linha verde), isolinha de zero (linha vermelha) e isolinha do valor médio de Q_{B2y} negativo (linha azul); terceiro quadro TSM (linha azul), isoterma de 18°C (linha vermelha); quarto quadro profundidade da isoterma de 18°C na camada de 45 m até superfície (h18).

5.1.5 CASO V

O último evento relacionado é a presença de um Q_{B2y} forte, bem inferior à média de Q_{B2y} negativo, sem alteração significativa na TSM e sem Isoterma de 18°C na coluna entre a superfície e 45m de profundidade. O CASO V compreende o período de 07 a 31 de julho de 2015.

Quase todo intervalo apresenta Q_{B2y} negativo com valor mínimo de $-103 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$ no dia 14, porém a TSM ficou entre 20,5 e 22°C sem correlação alguma com Q_y (Figura 5.6). A isoterma de 18°C do dia 12 ao dia 29 não foi observada dentro da camada monitorada pela boia. Este caso foi observado no inverno, quando, segundo a climatologia, é a época em que a ACAS está mais profunda. Este caso mostra que mesmo com o índice favorável, se a ACAS estiver muito profunda não há ressurgência.

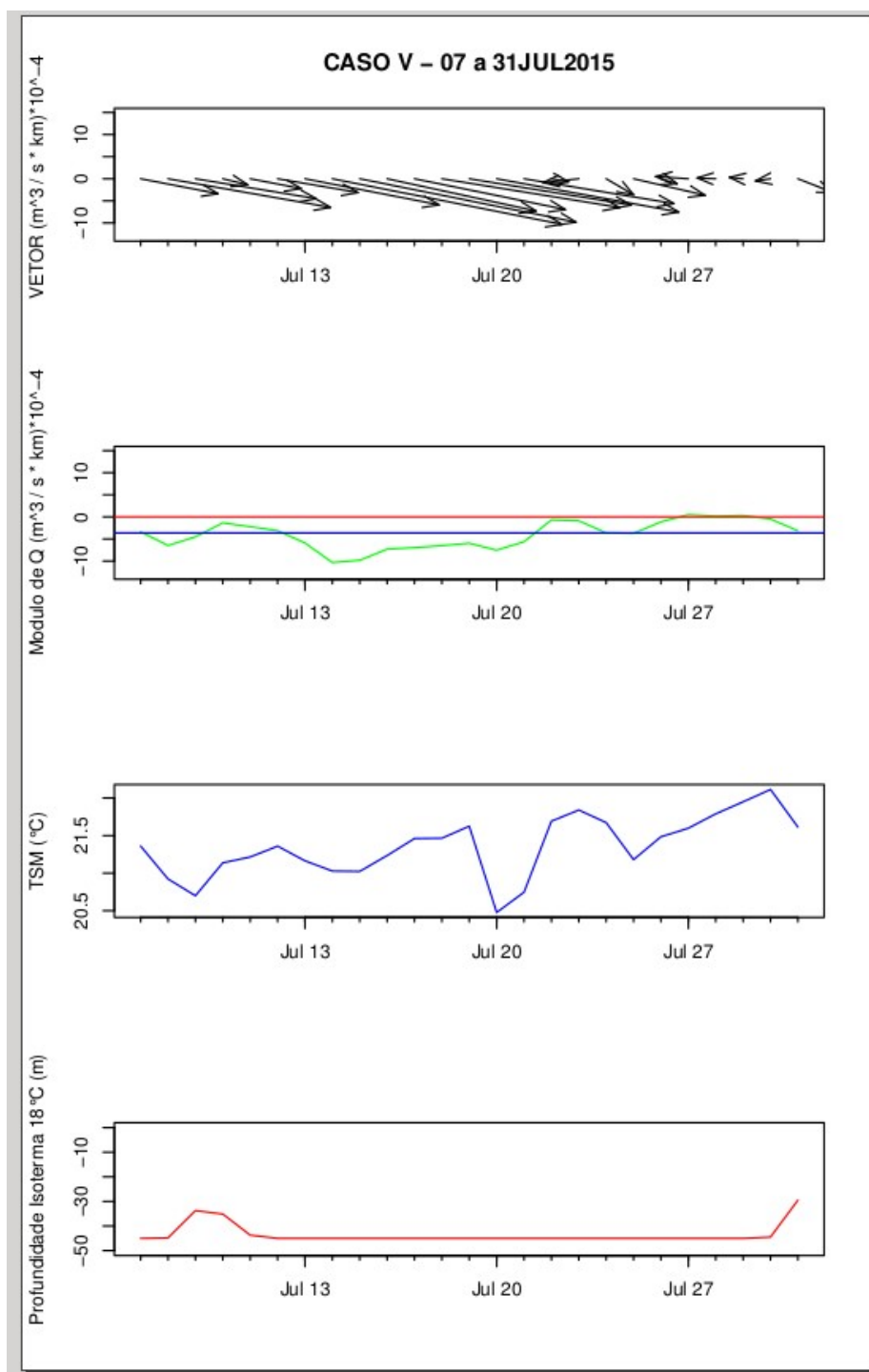


Figura 5.6 CASO V, período de 07 a 31 julho 2015. primeiro quadro vetor de Q_{B2} ; segundo quadro modulo de Q_{B2} (linha verde), isolinha de zero (linha vermelha) e isolinha do valor médio de Q_{B2} negativo (linha azul); terceiro quadro TSM (linha azul), isoterma de 18 $^{\circ}C$ (linha vermelha); quarto quadro profundidade da isoterma de 18 $^{\circ}C$ na camada de 45 m até superfície (h18).

5.1.6 ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA RESSURGÊNCIA

Os casos anteriores mostraram que o sentido e a intensidade de Q_{B2y} influenciam na dinâmica costeira. Em mais de 99% das ocorrências de ressurgência, o Q_{B2y} estava negativo, como no CASO I. Bem como em 54% das ocorrências de aumento da profundidade da isoterma de 18°C o Q_{B1y} estava positivo, conforme CASO III. Também foi notado que nem todo valor de Q_{B2y} negativo está correlacionado com a $TSM < 18^{\circ}\text{C}$, como ilustra o CASO II.

Na distribuição de frequência relativa de Q_{B2y} para toda série nota-se uma predominância valores negativos, a classe de -25 a 0 possui a maior frequência (superior a 30%), conforme figura 5.7. Apesar de valores de Q_{B2y} positivos serem menos frequentes eles representam 21% das observações.

A distribuição de frequência relativa de Q_{B2y} para as ocorrências de TSM menores que 18°C mostra uma moda na classe de -75 a -50, conforme é observado na figura 5.8, valores mais negativos do que a distribuição de Q_{B2y} para toda série.

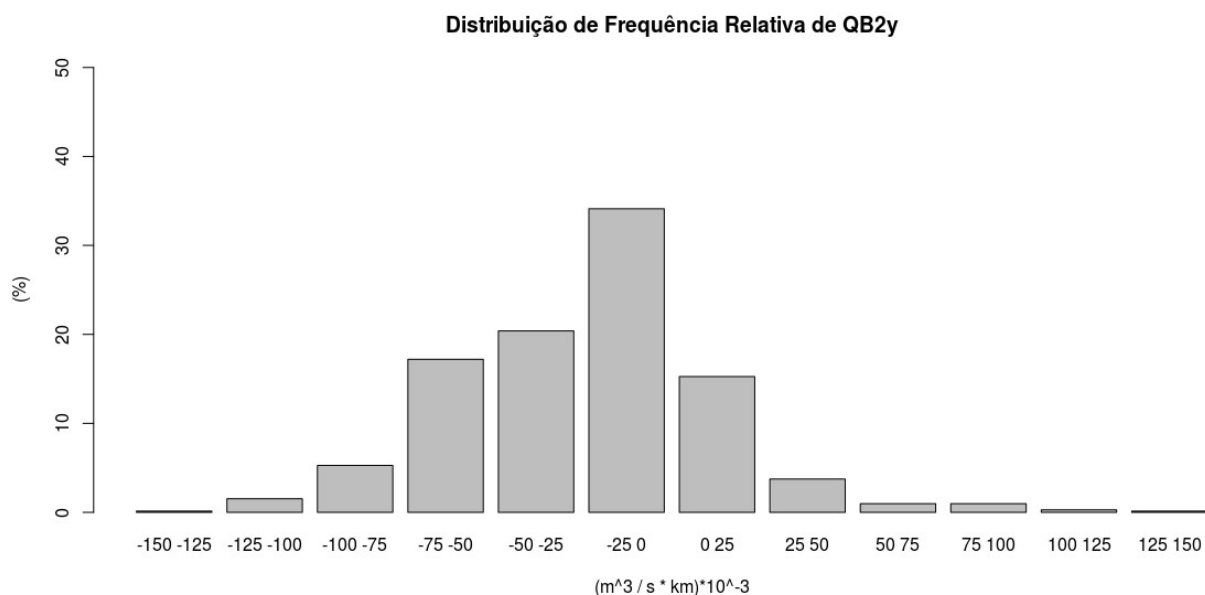


Figura 5.7. Frequência Relativa de Q_{B2y} separada por classes a partir de $-150 \cdot 10^3$ até $150 \cdot 10^3$, em intervalos de $25 \cdot 10^3$.

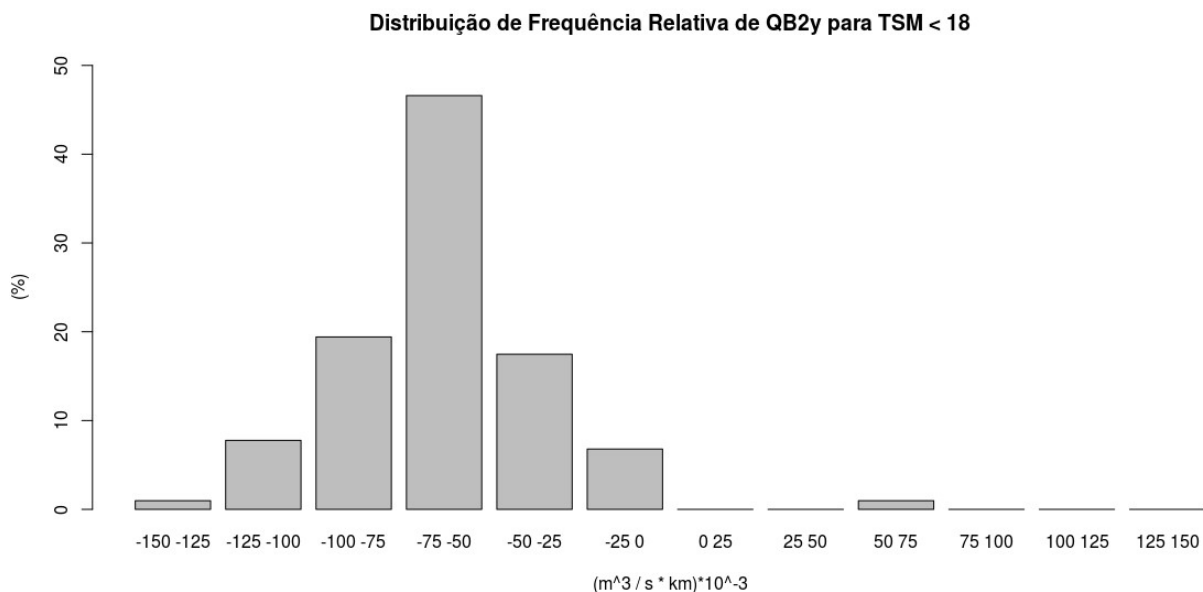


Figura 5.8. Frequência Relativa de Q_{B2y} para ocorrência de $TSM < 18^{\circ}C$, separada por classes a partir de $-150 \cdot 10^3$ até $150 \cdot 10^3$, em intervalos de $25 \cdot 10^3$.

O resultado do teste Chi-quadrado de Pearson refutou a hipótese nula de que as frequências observadas são iguais às frequências esperadas, com um nível de significância de $6,7 \cdot 10^{-29}$ (p-chi) para 11 graus de liberdade. Resultado similar foi obtido ao testar o Q_{B2y} negativo, novamente refuta-se a hipótese nula com um nível de significância de $7 \cdot 10^{-22}$ (p-chi) para 5 graus de liberdade.

A tabela 5.2 mostra uma análise probabilística da ocorrência de ressurgência em função da intensidade de Q_{B2y} negativo. A primeira coluna é referente ao valor de corte de Q_{B2y} , ou seja, na linha -5 foram utilizadas todas as observações de Q_{B2y} menor que $-5 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Km}$, assim sucessivamente. Mais uma vez o teste Chi-quadrado foi utilizado para diferenciar a frequência observada em função de Q da frequência natural de ressurgência (14%). Os valores de significância do teste para um grau de liberdade são encontrados na coluna p-Chi. Desta forma é verificado que em intensidades maiores que $-10 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Km}$ não é possível excluir a hipótese nula. Embora a frequência observada referente a classe de $-10 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Km}$ seja diferente da frequência natural essa classe possui uma baixa probabilidade de ocorrência de ressurgência, menos de 22%. Conforme os valores de Q_{B2y} ficam mais negativos, a probabilidade de ressurgência

aumenta, até que para valores de Q_{B2y} menor que $-105 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Km}$ a probabilidade atinge 85,7%.

Tabela 5.2 Tabela de Probabilidade de Ocorrência de Ressurgência pela intensidade de Q_{B2y} , onde as colunas são: o valor da intensidade de Q_{B2y} , coluna probabilidade de ocorrer ressurgência, número de ocorrências de ressurgência, número total de dias onde foram observados índices abaixo de Q , valor calculado do Chi-quadrado e nível de significância do Chi-quadrado (p-chi).

QB2Y ($\text{m}^3/\text{S} \cdot \text{Km} \cdot 10^3$)	PROB (%)	OCO	OBS	X²	PX²
0	17,9	102	567	1,120256	0,289863
-5	19,6	101	515	2,316524	0,128006
-10	21,7	101	465	4,514125	0,033616
-15	23,9	99	414	7,569313	0,005937
-20	26,8	98	365	12,8906	0,00033
-25	29,5	95	321	19,1406	1,21E-05
-30	32,1	94	292	26,18456	3,10E-07
-35	34,8	90	258	34,64936	3,95E-09
-40	37,5	84	224	44,01042	3,27E-11
-45	40,1	79	197	54,42724	1,61E-13
-50	44,2	77	174	73,33917	1,09E-17
-55	46,3	70	151	84,00289	4,94E-20
-60	48,4	61	126	95,11317	1,80E-22
-65	52,5	51	97	119,7435	7,20E-28
-70	54,5	36	66	132,3691	1,24E-30
-75	58	29	50	156,06	8,21E-36
-80	59,4	22	37	166,6545	3,98E-38
-85	65,3	17	26	213,2396	2,70E-48
-90	76,1	16	21	312,963	4,94E-70
-95	77,7	14	18	329,2181	1,42E-73
-100	75	9	12	301,0417	1,95E-67
-105	85,7	6	7	416,6667	1,30E-92
-110	100	4	4	600	1,67E-132

Existem casos com Q_{B2y} negativo onde não é observado afloramento, embora exista elevação da isoterma de 18°C , como demonstrado no CASO II desta seção. A tabela 5.3 segue o padrão da tabela 5.2, desta vez foram consideradas as observações onde a isoterma de 18°C se encontrava dentro da camada de 45m até a superfície. Verificaram-se 327 casos em que a TSM era menor que 18°C ou a profundidade da

isoterma de 18°C estava diminuindo, dentro de um universo de 560 observações, o que gera uma frequência esperada de 58%.

Novamente é possível afirmar que para valores de Q_{B2y} abaixo de $-10 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Km}$ há uma maior probabilidade de ter a ocorrência de ressurgência ou uma redução da profundidade da isoterma de 18°C. Ressalta-se que um Q_{B2y} abaixo de $-60 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Km}$ possui mais de 85% de probabilidade de um destes dois fatores ocorrerem.

Tabela 5.3 Tabela de Probabilidade de Ocorrência de ressurgência ou redução da profundidade da isoterma de 18°C pela intensidade de Q_{B2y} , onde as colunas são: o valor da intensidade de Q_{B2y} , coluna probabilidade de ocorrer ressurgência, número de ocorrências de ressurgência, número total de dias onde foram observados índices abaixo de Q , valor calculado do Chi-quadrado e valor calculado do p-chi.

QB2Y ($\text{m}^3/\text{S} \cdot \text{Km} \cdot 10^3$)	PROB (%)	OCO	OBS	X²	PX²
0	64,6	300	464	1,614144	0,20391
-5	67,7	284	419	3,627262	0,05684
-10	70,4	270	383	6,029408	0,014069
-15	73,7	253	343	9,72101	0,001822
-20	75,4	231	306	12,03177	0,000523
-25	78,2	212	271	16,19486	5,71E-05
-30	79,6	196	246	18,6421	1,58E-05
-35	81	180	222	21,18719	4,17E-06
-40	83,1	163	196	25,2545	5,02E-07
-45	84,8	146	172	28,88448	7,68E-08
-50	84,1	127	151	27,21331	1,82E-07
-55	84,7	111	131	28,55636	9,10E-08
-60	85,7	96	112	30,7241	2,97E-08
-65	82,9	73	88	24,83069	6,26E-07
-70	81	47	58	21,10025	4,36E-06
-75	86	37	43	31,47585	2,02E-08
-80	84,8	28	33	28,8077	7,99E-08
-85	90,9	20	22	43,51839	4,20E-11
-90	94,4	17	18	53,49598	2,59E-13
-95	100	15	15	71,25382	3,14E-17
-100	100	10	10	71,25382	3,14E-17
-105	100	6	6	71,25382	3,14E-17
-110	100	4	4	71,25382	3,14E-17

5.2 SÉRIE TEMPORAL DA REANÁLISE ERA-INTERIM

A seguir são apresentados os resultados obtidos do índice de ressurgência calculado a partir dos dados de Reanálise do projeto ERA-Interim. A principal vantagem desta série é compreender um período extenso (1979 até os dias atuais), o que possibilitou a elaboração de uma climatologia do índice de ressurgência.

Para manter a metodologia utilizada com os dados provenientes da boia meteo-oceanográfica, foi calculado o índice Q de três formas diferentes: somatório diário (Q_{E1}), somatório de dois dias (Q_{E2}) e somatório de três dias (Q_{E3}).

Analisando o período de 1979 a 1992 verificou-se que a série com o somatório de dois dias foi a que melhor representou os casos de ressurgência, assim como observado nos dados da boia meteo-oceanográfica. Em 97% dos dias que obtiveram uma TSM média diária inferior ou igual a 18°C , Q_{E2y} era negativo. De maneira análoga ao tratamento de dados feito com a série Q_{B2y} , foi elaborada uma análise probabilística da ressurgência com o índice Q_{E2y} e TSM da Álcalis.

As figuras 5.9 e 5.10 mostram as distribuições de frequências relativas de Q_{E2y} de 1979 a 1992, para todo o período e para os dias de TSM menor que 18°C respectivamente. Nota-se que ambas as distribuições possuem uma predominância de valores negativos, entre tanto a série referente aos dias com ressurgência possui uma moda menor do que a série completa. O resultado do teste do Chi-quadrado foi de $p\text{-chi}=1,7*10^{-7}$ para 16 graus de liberdade, o que refuta a hipótese de as séries serem iguais.

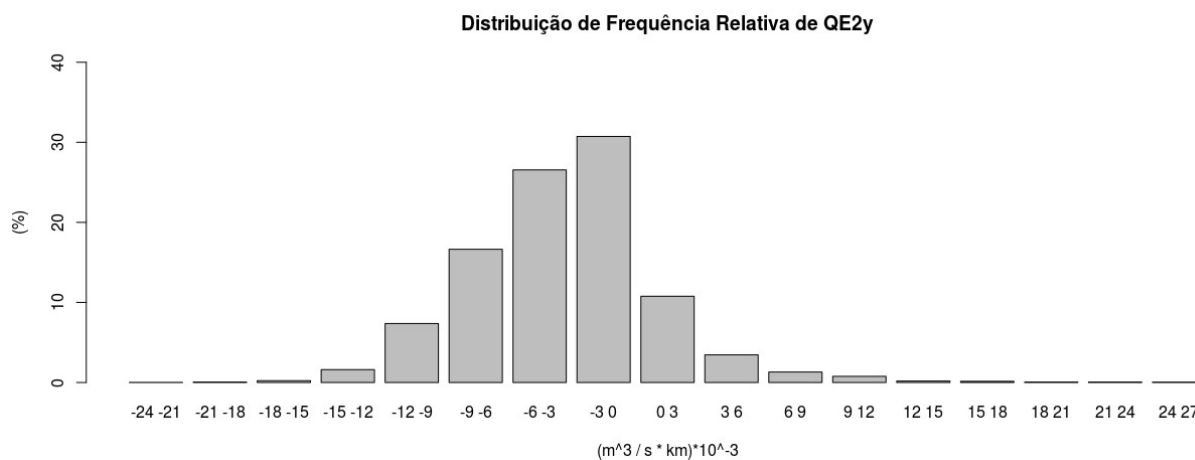


Figura 5.9. Frequência Relativa de QE2y, separada por classes a partir de $-24 \cdot 10^3$ até $27 \cdot 10^3$, em intervalos de $3 \cdot 10^3$.

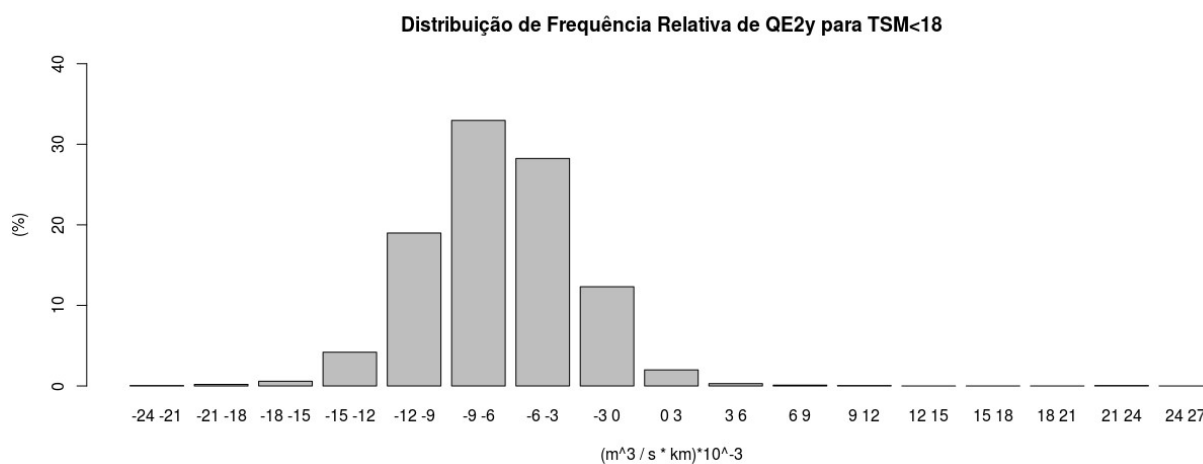


Figura 5.10. Frequência Relativa de QE2y para ocorrência de TSM<18°C, separada por classes a partir de $-24 \cdot 10^3$ até $27 \cdot 10^3$, em intervalos de $3 \cdot 10^3$.

A tabela 5.4 mostra uma análise probabilística da ocorrência de ressurgência em função da intensidade de QE2y negativo. A primeira coluna é referente ao valor de corte de QE2y, ou seja, na linha -1 foram utilizadas todas as observações de QB2y menor que $-1 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Km}$, assim sucessivamente. Mais uma vez o teste Chi-quadrado foi utilizado para diferenciar a frequência observada em função de Q da frequência natural de ressurgência (32%). Para valores menores de $-6 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{Km}$ existe uma probabilidade de ocorrência de ressurgência próxima de 70%.

Tabela 5.4 Tabela de Probabilidade de Ocorrência de Ressurgência pela intensidade de Q_{E2y} , onde as colunas são: o valor da intensidade de Q_{E2y} , coluna probabilidade de ocorrer ressurgência, número de ocorrências de ressurgência, número total de dias onde foram observados índices abaixo de Q, valor calculado do Chi-quadrado e valor calculado do p-chi.

Q_{E2Y} ($m^3/S \cdot Km \cdot 10^3$)	PROB (%)	OCO	OBS	χ^2	P χ^2
0	36,4	2003	5490	0,682743	0,408644
-1	39,9	1953	4892	2,43242	0,118849
-2	44,8	1879	4194	6,762891	0,009307
-3	50,5	1750	3462	14,64151	0,00013
-4	56,4	1590	2815	25,93158	3,54E-07
-5	63,2	1417	2241	42,66273	6,50E-11
-6	68,4	1170	1710	58,35213	2,19E-14
-7	73,9	936	1266	77,70038	1,20E-18
-8	77,6	676	871	92,14887	8,04E-22
-9	80,5	493	612	104,5985	1,50E-24
-10	82,5	327	396	113,599	1,60E-26
-11	80,5	182	226	104,4913	1,58E-24
-12	81,7	103	126	109,8574	1,05E-25
-13	81,5	53	65	108,9312	1,68E-25
-14	83,3	30	36	117,0699	2,77E-27
-15	85	17	20	124,8898	5,38E-29
-16	90,9	10	11	154,652	1,67E-35
-17	87,5	7	8	137,0937	1,15E-31
-18	100	5	5	206,645	7,41E-47
-19	100	4	4	206,645	7,41E-47

É importante destacar que os valores de Q obtidos pela reanálise são menores que os da boia meteo-oceanográfica devido à frequência dos dados. A reanálise possui 4 valores diários enquanto a boia possui 24.

Utilizando o índice ressurgência (Q) calculado a partir da reanálise ERA-Interim, juntamente com a TSM da Álcalis, foi possível realizar uma análise da variação interanual e da sazonalidade.

A figura 5.11 ilustra a média mensal da componente meridional negativa do índice de ressurgência no período de 1979 a 2017, para série Q_{E2} . A linha vermelha representa a média total de Q_{E2y} negativo. Destaque para os meses de abril, maio e junho que ficaram abaixo da média mesmo considerando a variância. VALENTIN (1987) indica que a ressurgência do Cabo Frio possui duas fases distintas, uma onde o fenômeno ocorre

de forma mais acentuada (primavera e verão), outra menos regular (outono e inverno), associando esse fato a uma maior frequência de passagens de frente frias.

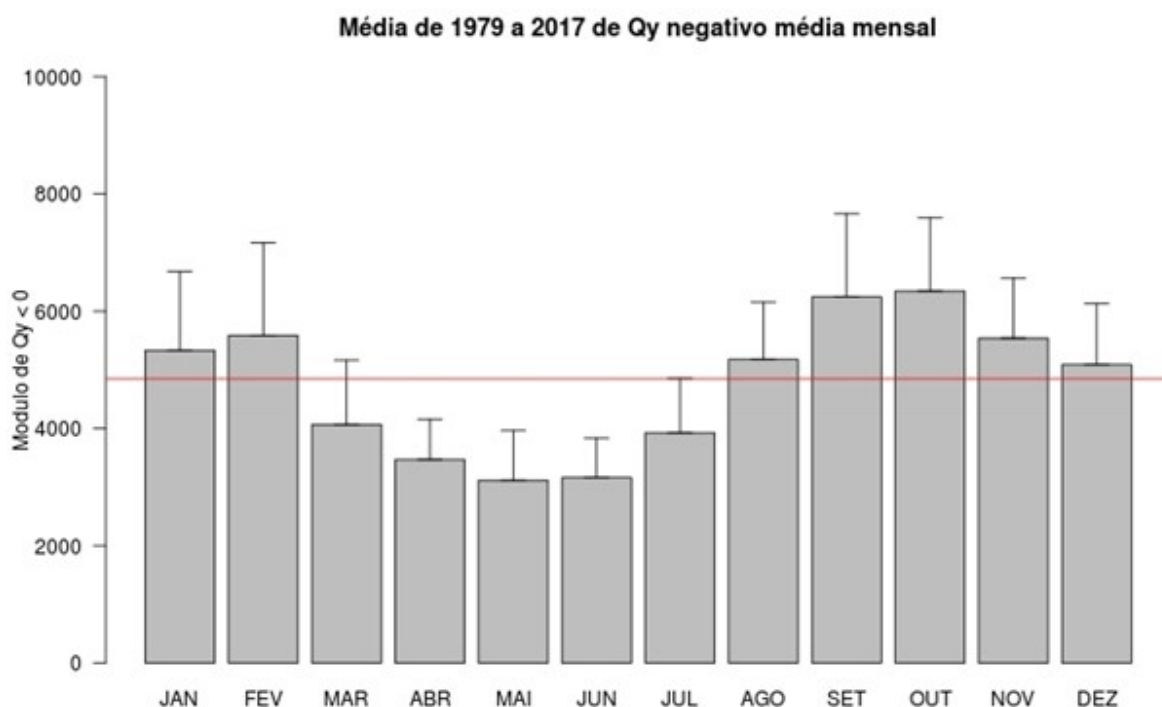


Figura 5.11. Média mensal do módulo da componente meridional negativa do índice de ressurgência para o período de 1 janeiro de 1979 a 31 dezembro de 2017 para série Q_{E2} , linha vermelha representa a média de todo o período.

Outro fator atmosférico importante é o posicionamento da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que climatologicamente fica centralizada perto de 32°S e 5°W com um valor um pouco maior que 1021 hPa (PETERSON e STRAMMA, 1991) durante o verão no Hemisfério Sul (HS). Este posicionamento da ASAS, e a presença da Baixa Pressão Continental, formam um gradiente de pressão que intensifica os ventos na região de estudo. Durante inverno no hemisfério Sul, o centro intensifica (1025 hPa) e desloca-se para noroeste, para aproximadamente 27°S e 10°W . Este deslocamento da ASAS, e a ausência da Baixa Pressão Continental, reduz a intensidade dos ventos mantendo a predominância do vento NE.

Os ventos mais amenos refletem no índice abaixo da média anual nos meses de março a julho, época do ano com menor ocorrência de ressurgência como é mostrado a seguir pela figura 5.12.

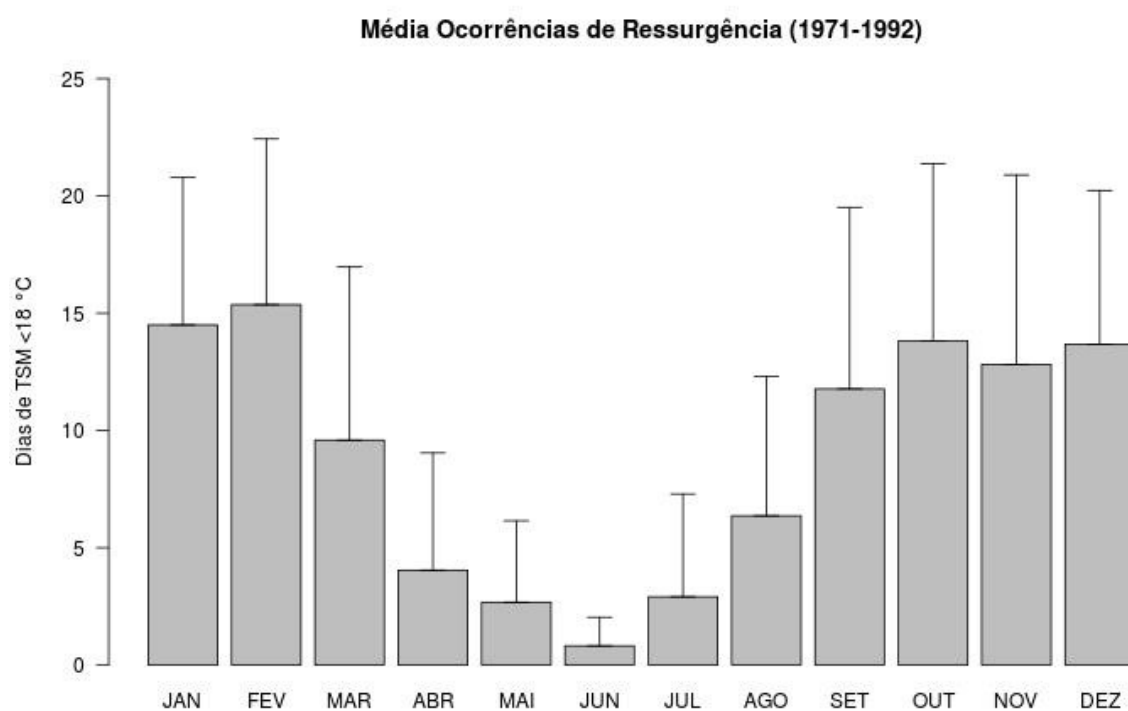


Figura 5.12. Média mensal do número de dias com ocorrência de ressurgência ($TSM < 18^{\circ}C$) no período de 1 janeiro de 1971 a 31 dezembro de 1992, para os dados medidos pela Álcalis.

Um fator que não pode ser desconsiderado para justificar uma menor ocorrência de ressurgência no período do inverno HS é a profundidade da ACAS. CANDELLA (1999) verificou que a profundidade da ACAS tem considerável variação sazonal sobre a plataforma continental, influenciando diretamente a ressurgência do Cabo Frio. O período do verão HS são os meses em que essa massa d'água pode ser encontrada em menores profundidades, coincidindo com o período de maior incidência do fenômeno.

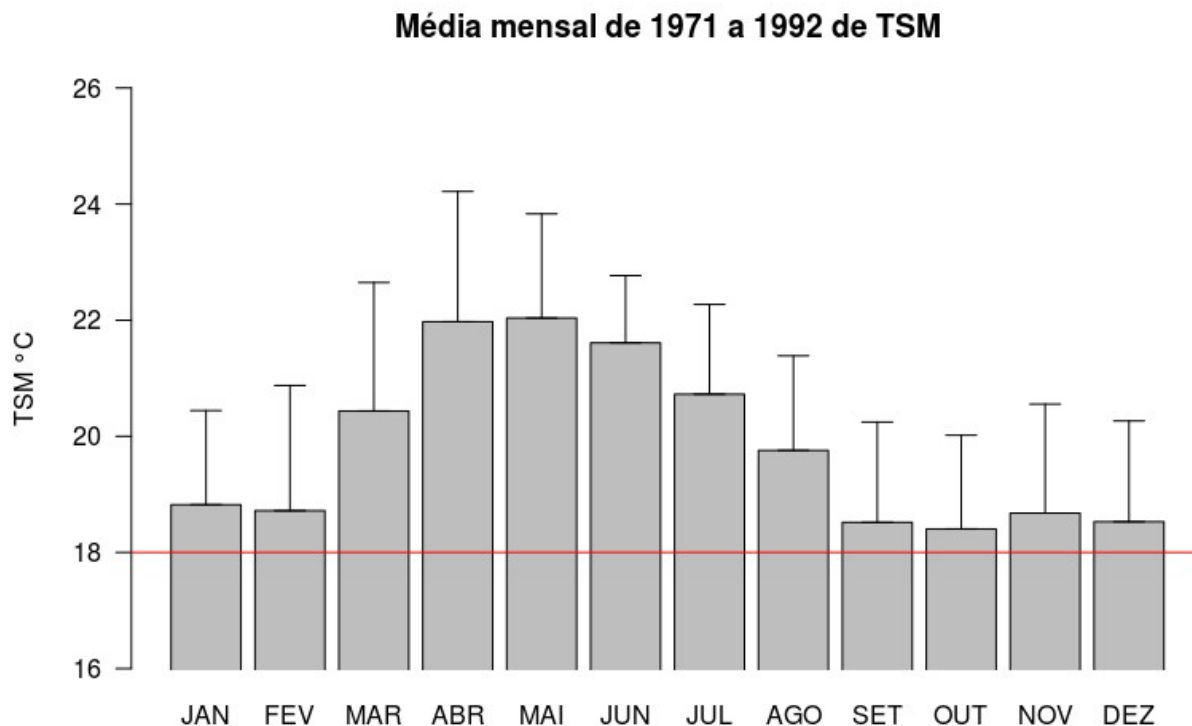


Figura 5.13. Gráfico em barra com a média mensal da temperatura da superfície do mar medidos pela Álcalis, para o período de 1 janeiro de 1971 a 31 dezembro de 1992, a linha vermelha representa a isoterma de 18°C.

A figura 5.13 ilustra a média mensal da temperatura da superfície do mar medidos pela Álcalis, para o período 1971 a 1992. Neste período a temperatura média diária mínima foi de 9,8°C, máxima de 28,7°C e a média de toda a série foi de 19,8°C. Neste gráfico é verificado que os meses com as maiores médias são os mesmo que possuem menor número de ocorrências de ressurgência, abril, maio, junho e julho. A climatologia hidrográfica entre São Sebastião e Cabo de São Tomé indica que os volumes mínimos de ACAS e máximos volumes de água tropical ocorrem no outono, nesta época do ano a temperatura do fundo da plataforma continental é 1°C mais quente que nas outras estações (CERDA e CASTRO, 2013).

A partir das médias de TSM e do índice Q, foram calculadas as anomalias (média de todo o período menos média do ano), para observar as variações interanuais. A figura 5.14 (a) mostra as anomalias mensais do módulo de Q e a figura 5.14 (b) as anomalias mensais de TSM, ambas para o ano de 1989. Neste tipo de análise espera-se que uma

anomalia positiva de Q, ou seja, um transporte mais forte, gere uma anomalia negativa da temperatura e *vice versa*.

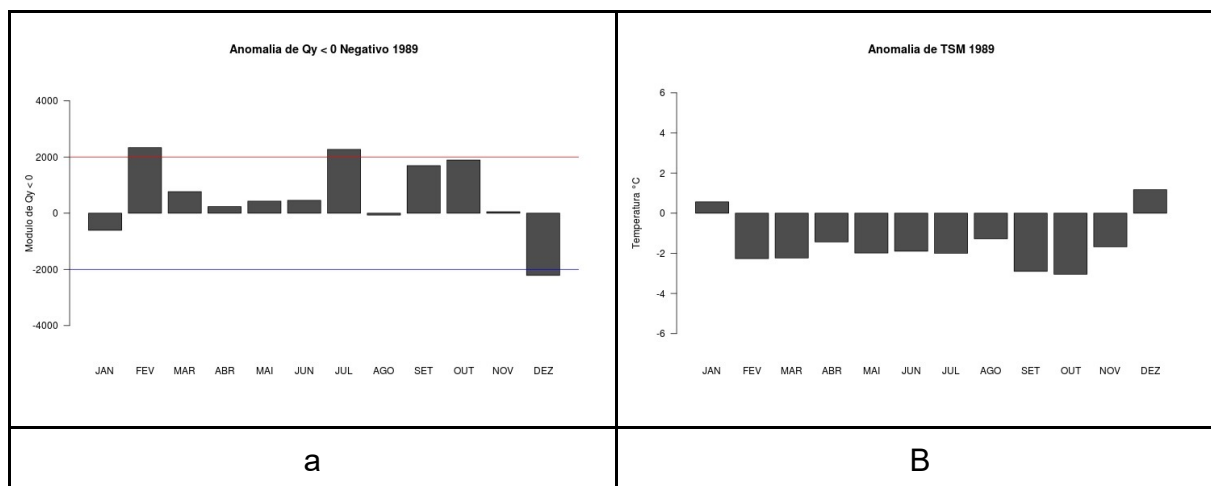


Figura 5.14. Gráfico em barras das anomalias de 1989: (a) anomalia mensal do módulo de Q_y , (b) anomalia mensal de TSM.

Durante a análise das anomalias foi observado que quando ocorriam anomalias de Q maiores que $2000 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{km}$, na maioria das vezes, havia uma anomalia negativa de temperatura. De modo similar, uma anomalia de Q menor que $-2000 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{km}$ está relacionada a anomalia positiva de temperatura. O ano de 1989 foi escolhido para ilustrar este fato, onde nos meses de fevereiro e julho houve anomalias de Q maiores que $2000 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{km}$ e anomalias de TSM de aproximadamente -2°C , no mês de dezembro a anomalia de Q foi menor que $-2000 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{km}$ e a de TSM foi aproximadamente 1°C . O Anexo A contém as figuras de anomalias de Q_{E2} e TSM no período de 1979 até 1992.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CONCLUSÕES

O índice de ressurgência incorpora os ventos transformando em uma grandeza física marinha, indicando o volume de água transportado por secção de costa em função da tensão do vento sobre a superfície do oceano. Desta forma, o índice surge como uma ferramenta útil a ser incorporada como um fator abiótico em estudo de populações no ambiente da ressurgência do Cabo Frio.

A melhor ferramenta para o monitoramento da ressurgência costeira é uma boia-meteoceanográfica. No entanto, sua manutenção demanda uma logística complexa e dispendiosa. Por esses fatores é difícil encontrar no Brasil uma longa série de dados obtida por esse tipo de equipamento. Por outro lado, dados de vento possuem uma maior abundância e são relativamente mais baratos e fáceis de coletar, possibilitando o cálculo do índice de ressurgência.

O somatório de dois dias da componente meridional do índice foi o que melhor representou o fenômeno da ressurgência costeira. Ressalta-se que em mais de 97%, das ocorrências de TSM menor de 18°C o Q_y era negativo, conforme o esperado segundo a Teoria do Transporte de Ekman.

Ao contrário do que foi descrito por outros autores o final da ressurgência (TSM maior que 18°C) não necessariamente precisa da entrada do vento sudoeste. Como foi descrito no CASO I (Figura 5.2), a redução da intensidade do Q_y negativo pode ser o suficiente para finalizar um período de afloramento.

O estudo probabilístico do Índice de Ressurgência mostrou que quanto menor (numericamente) é o índice, maior é a probabilidade de ocorrência do afloramento ou redução da profundidade da ACAS.

O estudo também mostrou a aplicabilidade do índice para caso de subsidência, onde 57% dos casos que o somatório de um dia da componente meridional do índice foi positivo causaram um aumento da profundidade da isoterma de 18°C, indicando uma baixa probabilidade de ocorrência da ressurgência, CASO III (Figura 5.4).

O uso de dados de reanálise do Projeto ERA-Interim possibilitou o estudo sazonal do índice de ressurgência, onde verificou-se que nos meses de abril, maio, junho, julho

e agosto, o índice apresenta menor intensidade e uma menor probabilidade da ocorrência de ressurgência.

A análise interanual mostrou que anomalias maiores que $2 \cdot 10^3 \text{m/s} \cdot \text{km}^3$ estão relacionadas com anomalias negativas de TSM. O inverso também foi observado: anomalias de Q inferiores a $-2000 \text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}$ estão correlacionadas com anomalias positivas de TSM.

6.2. PERSPECTIVAS

Outros modelos de previsão do tempo operacionais também podem ser utilizados para o cálculo do índice de ressurgência. Um índice previsto pode auxiliar no planejamento de trabalho de campo ou prever períodos favoráveis para atividades pesqueiras.

Finalmente, a ferramenta foi desenvolvida para aplicação biotecnológica em estudos ecossistêmicos, mas é notório seu potencial uso em outras áreas de conhecimento, como acústica submarina, busca e salvamento marítimo (SAR), oceanografia, meteorologia e climatologia.

7. REFERÊNCIAS

BAKUN A.. **Coastal upwelling indexes, west coast of north America, 1946–71.**

Relatório técnico do National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA, Monterey, California, EUA, v. 671 , p. 103, 1973.

BAKUN A.. **Daily and Weekly Upwelling Indices, West Coast of North America,**

1967-73. Relatório técnico do National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA, Monterey, California, EUA, p. 108, 1975.

BAKUN, A.. **Global Climate Change and Intensification of Coastal Ocean**

Upwelling. Science, v. 247(4939), p. 198–201, doi:10.1126/science.247.4939.198, 1990.

BLANTON, J. O., TENORE, K. R., CASTILLEJO, F., ATKINSON, L. P., SCHWING, F. B., E LAVIN, A. **The relationship of upwelling to mussel production in the rias on the western coast of Spain.**

Journal of Marine Research, v. 45 , p. 497–511. doi:10.1357/002224087788401115, 1987.

BRASILEIRO P. S., YONESHIGUE-VALENTIN Y., BAHAR. G., REIS R. P. E AMADO FILHO G. M.. **Algas marinhas bentônicas da Região de Cabo Frio e arredores: Síntese do conhecimento.** Rodriguésia, v. 60, n. 1, p. 39-66, 2009.

CABANAS J. M., ALVAREZ I.. **Ekman transport patterns in the area close to the**

Galician coast (NW, Spain). Journal of Atmospheric & Ocean Science, v. 10(4), p. 325–341, 2005.

CALADO L.. **Dinâmica da interação da atividade de meso-escala da Corrente do Brasil com o fenômeno da ressurgência costeira ao largo de Cabo Frio e Cabo de São Tomé, RJ.**

Tese apresentada ao Instituto Oceanográfico da USP, São Paulo, p. 184, 2006.

CALIL L.. **Variabilidade interanual da ressurgência de Cabo Frio**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 110, 2009.

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

CANDELLA R. N.. **Correlação Temperatura X Salinidade e Variação Sazonal da Água Central do Atlântico Sul no Quadrado de Marsden 376**. Pesquisa Naval, v. 12, p. 13, 1999.

CARBONEL C.. **Modelling of upwelling in the coastal area of Cabo Frio (Rio de Janeiro- Brazil)**. Revista Brasileira de Oceanografia, v. 46, p. 1-17, 1998.

CARVALHO G. A., CABRAL A. P., FERNANDEZ M. A. S.. **Correlação entre o campo de vento médio e um índice que define a intensidade da ressurgência na região do Cabo Frio (23°S / 42°W) através da análise de dados orbitais (QUIKSCAT / AVHRR)**. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, p. 1509 – 1514, 2003.

CASTELÃO R. M., BARTH J. A.. **Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl**. Geophysical Research Letters, v. 33, p. 4, doi: 10.1029/2005GL025182, 2006.

CERDA C., CASTRO B. M.. **Hydrographic climatology of South Brazil Bight shelf waters between São Sebastião (24°S) and Cabo São Tomé (22°S)**. Continental Shelf Research, 2013.

COE H. H. G., CARVALHO C. N., SOUZA L. O. F., SOARES A.. **Peculiaridades ecológicas da região de Cabo Frio, RJ**. Revista Tamoios, v. 3, n. 2, DOI: <https://doi.org/10.12957/tamoios.2007.626>, 2007.

COELHO-SOUZA S. A., LÓPEZ M. S., GUIMARÃES J. R. D., COUTINHO R., CANDELLA R. N.. **Biophysical interactions in the Cabo Frio upwelling system**,

southeastern Brazil. Brazilian Journal of Oceanography, São Paulo, v. 60, no. 3, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1679-87592012000300008>, 2012.

CURY P. e ROY C.. **Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas.** Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, v. 46, p. 670-680, <https://doi.org/10.1139/f89-086>, 1989.

DEE, et al. **The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.v. 137,p. 553–597, 2011.

DEMARCO H. e FAURE V.. **Coastal upwelling and associated retention indices derived from satellite SST. Application to Octopus vulgaris recruitment.** Oceanologica Acta, v. 23, p. 391–408, 2000.

DRAGAUD. **A influência da temperatura da superfície do mar na simulação computacional da circulação atmosférica na Região costeira do estado do rio de janeiro.** Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil , COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 99, 2014.

EKMAN, W.K., **On the influence of earth's rotation on ocean currents.** Arkiv för Matematik, Astronomi Och Fysik, p. 53, 1905.

FRANCHITO S. H., ODA T. O., RAO V. B., KAYANO M.T.. **Interaction between coastal upwelling and local winds at Cabo Frio, Brazil: an observational study.** Journal of Applied Meteorology and Climatology, v. 47, p. 1590-1598, 2008.

GARCIA-REYES M., LARGIERA J. L., SYDEMANAB W. J.. **Synoptic-scale upwelling indices and predictions of phytoplankton and zooplankton populations.** Progress in Oceanography, v. 120, p. 177-188, doi: 10.1016/j.pocean.2013.08.004, January 2014.

GONZALEZ-NUEVO G., GAGO J. E CABANAS J. M.. **Upwelling index: a powerful tool for marine research in the NW Iberian upwelling system.** Journal of Operational Oceanography, 7:1, 47-57,DOI:10.1080/1755876X.2014.11020152, 2014.

LEMOS FILHO, G. R., et al. **Assimilação, controle de qualidade e análise de dados meteorológicos apoiados por proveniência.** In: Anais do XXXIII CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO, Anais eletrônicos... 2013. Disponível em: < <http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/escience/2013/005.pdf> > Acesso em: 2 mai. 2019.

MASON J. E., BAKUN A.. **Upwelling index update, United States, West coast, 33N-48N latitude.** National Oceanic and Atmospheric Administration technical memorandum National Marine Fisheries Service. Monterey, California, EUA, p. 85, 1986.

MIRANDA L. B.. **Forma da correlação T-S de massas de água das regiões costeira e oceânica entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP), Brasil.** Boletim do Instituto Oceanográfico, v. 33, n. 2, p. 105-119, doi: 10.1590/S1679-87591985000200002, 1985.

MOLNAR G. W.. **Survival of hypothermia by men immersed in the ocean.** Journal of the American Medical Association, v. 131, n. 13, p. 1046-1050, doi:10.1001/jama.1946.02870300014004, 1946.

NARAYAN N., PAUL A., MULITZA S. e SCHULZ M.. **Trends in coastal upwelling intensity during the late 20th century.** Ocean Science, v. 6, p. 815–823, 2010.

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Biology Processing Group. **Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) Ocean Color Data**, NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. http://doi.org/10.5067/ORBVIEW-2/SEAWIFS_OC.2014.0, 2014. Acessado em 24/06/2019.

NYKJAER L., CAMP L. V.. **Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along northwest Africa and Portugal from 1981 to 1991.** Journal of Geophysical Research, v. 99, p. 14197-14207, doi:10.1029/94JC00814, 1994.

ODA T. O.. **Influência da ressurgência costeira sobre a circulação local em Cabo Frio (RJ): estudo observacional e numérico.** Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE, São José dos Campos, p. 108, 1997.

PADRO, et al. **Evolution of upwelling systems coupled to the long-term variability in sea surface temperature and Ekman transport.** *Climate research*, v. 48, p. 231–246, 2011.

PEREIRA W. L. C. M.. **História e Região: Inovação e industrialização na economia salinera fluminense.** *Revista História Regional*, v. 15, p. 184-210, 2010.

PÉREZ-BRUNIUS P., LÓPEZ M., PINEDA J. e PARÉS-SIERRA A.. **Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources.** *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, v. 48, p. 204-214, 2007.

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

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: < <https://www.R-project.org/> >, acesso em dezembro de 2018.

RODRIGUES R. F.. **Upwelling at Cabo Frio (Brasil).** Dissertação (Mestrado) Naval Post-graduate School. Monterey, p. 89, 1973.

SCHWING, F. B., BOND N. A., BOGRAD S. J., MITCHELL T., ALEXANDER M. A. e MANTUA N.. **Delayed coastal upwelling along the U.S. West Coast in 2005: a historical perspective.** *Geophysical Research Letters*, v. 33, p. 1-5 (L22S01), doi:10.1029/2006GL026911, 2006.

SILVA G. L., DOURADO M. S. e CANDELLA R. N.. **Estudo preliminar da climatologia da ressurgência na região de Arraial Do Cabo, RJ.** XI Encontro Nacional dos Grupos PET , Florianópolis, p. 11, 2006.

SIMMONS, et al. **Low-frequency variations in surface atmospheric humidity, temperature, and precipitation: Inferences from reanalyses and monthly gridded observational data sets.** Journal of geophysical research, v. 155, p. 21, 2010.

SMITH R. L.. **Upwelling.** Oceanography and Marine Biology Annual Review, v. 6, p. 11-46, 1968.

SVERDRUP, H. U.; JOHNSON, M.W. e FLEMING, R. H.. **The Oceans, Their Physics, Chemistry, and General Biology.** Prentice-Hall, Nova York, p. 1087, 1942. Disponível em: < <http://ark.cdlib.org/ark:/13030/kt167nb66r/> >, acesso em janeiro de 2019.

TORRES JÚNIOR A. R.. **Resposta da ressurgência costeira de Cabo Frio a forçantes locais.** Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 132, 1995.

VALENTIN J. L., ANDRÉ D. L., JACOB S. A.. **Hydrobiology in the Cabo Frio (Brazil) upwelling: two-dimensional structure and variability during a wind cycle.** Continental Shelf Research, v.7, p. 77-88, 1987.

VALENTIN J. L.. **The Cabo Frio upwelling system, Brazil.** Ecological Studies, v. 144, p. 97-105, 2001.

8. ANEXO A - Figuras de anomalia de Q e TSM de 1979 a 1992

