

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS MACHADO FLORES

MODELAGEM FÍSICO-BIOLÓGICA DA DINÂMICA PLANCTÔNICA DURANTE UM
EVENTO DE RESSURGÊNCIA COSTEIRA NA REGIÃO DE CABO FRIO, RJ

PONTAL DO PARANÁ
2016

2

LUCAS MACHADO FLORES

MODELAGEM FÍSICO-BIOLÓGICA DA DINÂMICA PLANCTÔNICA DURANTE UM
EVENTO DE RESSURGÊNCIA COSTEIRA NA REGIÃO DE CABO FRIO, RJ

Monografia apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de bacharel em
Oceanografia, do Curso de Oceanografia, Setor
de Ciências da Terra da Universidade Federal
do Paraná.

Orientador: Prof.º Dr. Luiz Laurenô Mafra Jr.
Co-orientador: Dr. Rafael Guarino Soutelino

PONTAL DO PARANÁ

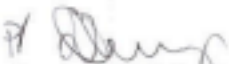
2016

TERMO DE APROVAÇÃO


Lucas Machado Flores

“Modelagem físico-biológica da dinâmica planetônica durante um evento de ressurgência costeira na região de Cabo Frio, RJ”

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:


Prof. Dr. Luciano Felício Fernandes - UFPR


Prof. Dr. Marcelo Sandin Dourado - CEM/UFPR


Prof. Dr. Luiz Laurenô Mafra Júnior
Presidente

Pontal do Paraná, 14 de dezembro de 2016

RESUMO

A compreensão da dinâmica relação entre os componentes físicos e biológicos da água, portanto, é de grande importância para se conhecer os ciclos de produção biológica. Com isso, no presente estudo, investigamos como o processo de ressurgência costeira (RC) que ocorre em Cabo Frio influencia no crescimento e distribuição do fitoplâncton marinho, através de um modelo hidrodinâmico (ROMS) acoplado a um modelo biológico (NPZD_POWELL). Os resultados da simulação foram comparados com dados *in situ* e imagens de satélite, afim de verificar padrões de distribuição similar ao do modelo do presente estudo. Os resultados mostraram que a isoterma de 20 °C (ACAS) atingiu 15 m de profundidade próximo a costa de Saquarema (a oeste de Cabo Frio), e apesar da ACAS não ter sido observada aflorada em superfície, águas com temperatura muito próxima dos 20 °C indicaram uma forte influência do processo de RC que ocorria em subsuperfície. As águas relativamente mais frias ressurgidas próximo à costa se dispersaram para oeste/sudoeste como uma pluma, devido à ação de ventos NE, e atingiu regiões próximas ao município do Rio de Janeiro. Uma floração ou *bloom* de fitoplâncton (P) visível na camada superficial do modelo a partir do dia 42 até o dia 48 da simulação, com valores acima de 2,1 mmol N/m³ próximo a costa de Cabo Frio. Em subsuperfície, o *bloom* de P gerou abundâncias acima de 6,4 mmol-N/m³ desde próximo à costa e por boa parte da plataforma continental, entre 20 e 60 m de profundidade. As maiores abundâncias de P na superfície e subsuperfície ocorreram em Saquarema em relação a Arraial do Cabo. Após 25 km de distância da costa, uma camada de mistura espessa (da superfície até 50 m) com temperaturas acima de 21 °C e baixas concentrações de nutrientes foi responsável por manter as maiores abundâncias de fitoplâncton próximo a 50-75 m de profundidade. A dispersão da pluma de águas frias e do fitoplâncton foi uma resposta direta a ação dos ventos incidentes durante a simulação numérica. No geral, o modelo do presente estudo conseguiu simular a dispersão tridimensional do fitoplâncton marinho em condições de RC na região de Cabo Frio, quando comparado com dados *in situ* e imagens de satélite.

Palavras-chave: ressurgência costeira, fitoplâncton, modelagem, NPZD.

ABSTRACT

The knowledge of the complex dynamics between physical and biological components of water is a key factor to understand the biological production cycles in earth's oceans. In the present study, we used a hydrodynamic model (ROMS) coupled with a biological model (NPZD_POWELL) to investigate the influence of coastal upwelling in the growth and distribution of marine phytoplankton in the Cabo Frio region. In order to detect patterns of temperature and phytoplankton distribution, the simulation results were compared with *in situ* data and satellite images. Results showed that SACW (20 °C isotherm) reached 15 m depth near the coast of Saquarema (located to the west of Cabo Frio). Although SACW did not reach the most superficial layer of the model, superficial waters with temperatures near 20 °C indicated a strong influence of upwelled waters near the surface. The superficial colder waters dispersed like a plume to the west/southwest of Arraial do Cabo and reached regions near the city of Rio de Janeiro, due to the constant influence of northeast winds along the region. A phytoplankton (P) bloom with values above 2.1 mmol-N/m³ occurred, and it was visible in the model's surface layer from the 42th to the 48th day of simulation. Subsurface waters showed values above 6.4 mmol-N/m³ that spreaded along the coast and over the adjacent continental shelf, between 20-60 m depth. Maximum surface and subsurface P abundances occurred near Saquarema in relation to Arraial do Cabo. 25 km distant from the coast, a thick mixture layer with temperature above 21 °C and low concentrations of nutrients was found spreading from the surface to 50 m depth, and kept P higher abundances around 50-75 m depth. The dispersion of both cold water plume and P were a direct response to the influence of different wind directions throughout the simulation. Finally, the present study model was capable to simulate the dispersion of marine phytoplankton abundances under the influence of coastal upwelling in the Cabo Frio region, when compared to *in situ* data and satellite images.

Keywords: coastal upwelling, phytoplankton, modeling, NPZD.

LISTA DE ABREVIATURAS

RC – ressurgência costeira
CF – Cabo Frio
L – leste
NE – nordeste
CB – Corrente do Brasil
ACAS – Água Central do Atlântico Sul
AC – Água Costeira
°C – graus celsius
AC – Água Costeira
S – Sul
SO – sudoeste
NO₃⁻ - nitrato
ScCal – Sistema de correntes da Califórnia
ScCan – Sistema de correntes das Canárias
ROMS – Regional Oceanic Modeling System
O – oeste
CA – Contornos Abertos
EXP1 – experimento 1
EXP2 – experimento 2
Chl – clorofila
C – carbono
m - metro
km – quilômetro
T1 – transecto 1
T2 – transecto 2

7

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagem da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) evidenciando o processo de ressurgência costeira na região de Cabo Frio, RJ..... 15

Figura 2. Figura ilustrativa da ocorrência do processo de RC na região de Cabo Frio,

RJ.	16
Figura 3. Desenho esquemático dos controles top-down e bottom-up.	20
Figura 4. Fórmulas utilizadas pelo modelo de POWELL et al. (2006), para calcular as interações entre os processos físicos e biológicos. Representam a variação da concentração de nitrato, fitoplâncton, zooplâncton e detritos, no tempo em função da advecção e do transporte vertical. Adaptado de POWELL et al.(2006).	28
Figura 5. Fórmulas para a correção das equações principais. Representam a taxa de correção da pastagem de fitoplâncton por zooplâncton (G), da irradiação (I) e a taxa de correção da absorção de nutrientes e crescimento do fitoplâncton (U).	30
Figura 6. Desenho esquemático das interações dos componentes do modelo NPZD descrito por POWELL et al (2006). Os componentes estão descritos nos retângulos, sendo eles fitoplâncton, zooplâncton, nitratos e detritos. As setas indicam a direção da relação entre os componentes bem como os processos envolvidos nesta relação.....	32
Figura 7. Malha da grade que foi utilizada nos experimentos numéricos composta pelos pontos zonais e meridionais, evidenciando os limites geográficos do domínio computacional.....	33
Figura 8. Batimetria do ETOPO-REMO interpolada na grade dos experimentos numéricos, com profundidades que variam de 0 a 2500 m.....	34
Figura 9. Camada esponja utilizada nos limites da grade computacional, para as velocidades baroclínicas e barotrópicas, com os coeficientes de viscosidade expressos em $m^2 s^{-1}$	38
Figura 10. Camada esponja utilizada nos limites da grade computacional, para os traçadores, com os coeficientes de difusão expressos em $m^2 s^{-1}$	39
Figura 11. Distribuição horizontal e vertical da climatologia tridimensional de temperatura, do EXP1. O campo horizontal representa a temperatura na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial, e limita-se à profundidade de 200m.....	40
Figura 12. Distribuição horizontal e vertical da climatologia tridimensional de salinidade, do EXP1. O campo horizontal representa a salinidade na superfície. O campo vertical	8
representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial, e limita-se à profundidade de 200 m.	41
Figura 13. Distribuição horizontal e vertical da temperatura correspondente ao dia 270 do experimento 1, usado como campo inicial do experimento 2.....	42

Figura 14. Distribuição horizontal e vertical da salinidade correspondente ao dia 270 e ao campo inicial do EXP2. O campo horizontal representa a salinidade na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial e limita-se à profundidade de 200 m..... 43

Figura 15. Distribuição horizontal e vertical do campo inicial da concentração de nitrato em mmol-N/m^3 , do EXP2. O campo horizontal representa a concentração de nitrato na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial, e limita-se à profundidade de 200 m..... 44

Figura 16. Distribuição horizontal e vertical do campo inicial da concentração de fitoplâncton em mmol-N/m^3 , do EXP2. O campo horizontal representa a concentração de fitoplâncton na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial, e limita-se à profundidade de 200 m. 46

Figura 17. Distribuição horizontal e vertical do campo inicial da concentração de zooplâncton em mmol-N/m^3 , do EXP2. O campo horizontal representa a concentração de zooplâncton na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial, e limita-se à profundidade de 200 m. 47

Figura 18. Distribuição horizontal e vertical de detritos em mmol-N/m^3 correspondente ao dia 270 e ao campo inicial do EXP2. O campo horizontal representa a concentração de detritos na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial, e limita-se à profundidade de 200 m. 48

Figura 19. Rosa dos ventos dos meses de janeiro e fevereiro do campo de forçante de vento inicial. Evidencia-se a predominância de ventos provenientes de NE, os quais são favoráveis à ocorrência de RC. As cores correspondem à intensidade do vento em m/s e os valores à frequência de ocorrência destas intensidades em porcentagem..... 49

Figura 20. Distribuição ao longo do domínio computacional, da intensidade do vento em m/s, durante o EXP2..... 50

Figura 21. Locais de amostragens realizadas no cruzeiro INCT-01. Os locais onde os dados foram obtidos com o equipamento Conductivity Temperature Depth (CTD) estão representados pelos triângulos vermelhos..... 51

Figura 22. Perfis verticais de temperatura e fluorescência correspondentes a seção 2 do cruzeiro INCT01. As linhas pretas representam o dado real e as vermelhas os dados após a aplicação do método de janela móvel..... 52

9

Figura 23: Evolução temporal da energia cinética média ao longo do domínio computacional durante os experimentos 1 e 2..... 53

Figura 24. Campos horizontais de temperatura e velocidade das correntes superficiais para os dias escolhidos no EXP2. As isolinhas representam as isóbatas de 200 e 1000

m, respectivamente.	56
Figura 25. Campos horizontais de fitoplâncton ao longo do domínio. As isolinhas em preto representam as isóbatas de 200 e 1000 m, respectivamente.....	58
Figura 26. Transectos traçados ao longo da região de Cabo Frio. O transecto 1 (T1), em vermelho, foi posicionado em Arraial do Cabo, e o transecto 2 (T2), em preto, nas proximidades de Saquarema. As isolinhas em preto representam as isóbatas de 200 e 1000 m, respectivamente.	59
Figura 27. Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades de corrente ao longo dos dias 34 até 38 da simulação, no transecto 1 (Arraial do Cabo). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.	60
Figura 28. Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades de corrente ao longo dos dias 40 até 44 da simulação, no transecto 1 (Arraial do Cabo). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.	61
Figura 29. Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades de corrente ao longo dos dias 46 até 50 da simulação, no transecto 1 (Arraial do Cabo). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.	62
Figura 30. Seções verticais de temperatura, nitrato e fitoplâncton ao longo dos dias 34 até 38, no transecto 1 (Arraial do Cabo). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.....	64
Figura 31. Seções verticais de temperatura, nitrato e fitoplâncton ao longo dos dias 40 até 44, no transecto 1 (Arraial do Cabo). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.....	65
Figura 32. Seções verticais de temperatura, nitrato e fitoplâncton ao longo dos dias 46 até 50, no transecto 1 (Arraial do Cabo). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.....	66
Figura 33. Seções verticais de fitoplâncton, zooplâncton e detritos ao longo dos dias 34 até 38, no transecto 1 (Arraial do Cabo).....	67
Figura 34. Seções verticais de fitoplâncton, zooplâncton e detritos ao longo dos dias 40 até 44, no transecto 1 (Arraial do Cabo).....	68
Figura 35. Seções verticais de fitoplâncton, zooplâncton e detritos ao longo dos dias 46 até 50, no transecto 1 (Arraial do Cabo).....	69
	10
Figura 36. Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades de corrente ao longo dos dias 34 até 38 da simulação, no transecto 2 (Saquarema). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.	71

Figura 37. Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades de corrente ao longo dos dias 40 até 44 da simulação, no transecto 2 (Saquarema). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.	72
Figura 38. Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades de corrente ao longo dos dias 46 até 50 da simulação, no transecto 2 (Saquarema). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.	73
Figura 39. Seções verticais de temperatura, nitrato e fitoplâncton ao longo dos dias 34 até 38 da simulação, no transecto 2 (Saquarema). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.....	75
Figura 40. Seções verticais de temperatura, nitrato e fitoplâncton ao longo dos dias 40 até 44 da simulação, no transecto 2 (Saquarema). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.....	77
Figura 41. Seções verticais de temperatura, nitrato e fitoplâncton ao longo dos dias 46 até 50 da simulação, no transecto 2 (Saquarema). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.....	78
Figura 42. Seções verticais de fitoplâncton, zooplâncton e detritos ao longo dos dias 34 até 38 da simulação, no transecto 2 (Saquarema).....	79
Figura 43. Seções verticais de fitoplâncton, zooplâncton e detritos ao longo dos dias 34 até 38 da simulação, no transecto 2 (Saquarema).....	80
Figura 44. Seções verticais de fitoplâncton, zooplâncton e detritos ao longo dos dias 46 até 50 da simulação, no transecto 2 (Saquarema).....	82
Figura 45. Imagens de satélite com campos horizontais de: 1) Ventos na superfície do mar; 2) TSM; 3) concentração de clorofila.....	92
Figura 46. Direção e intensidade dos ventos ao longo do cruzeiro INCT – 01, realizado entre os dias 9 e 12 de abril/2014. Os dados foram coletados pela bóia oceanográfica do projeto SIODOC da Marinha do Brasil.....	93
Figura 47. Distribuição vertical da temperatura ao longo do transecto realizado pelo cruzeiro INCT – 01. A isolinha de 20 °C, em preto, representa a posição da ACAS.	94
Figura 48. Distribuição vertical da fluorescência ao longo do transecto realizado durante o cruzeiro INCT – 01.....	95

TABELA 1. Parâmetros utilizados no modelo, e seus respectivos símbolos, valores e dimensões. Adaptada de POWELL et al. (2006).30

12

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	
14 1.2 CARACTERÍSTICAS DO FITOPLÂNCTON	
17 1.3 CARACTERÍSTICAS DO FITOPLÂNCTON DA REGIÃO DE CABO FRIO	
20 1.4 MODELOS FÍSICO-BIOGEOQUÍMICOS	23
2 OBJETIVOS	
26 2.1 OBJETIVO GERAL	
26	
3 MATERIAIS E MÉTODOS	
27 3.1 MODELO BIOLÓGICO	
27 3.2 DEFINIÇÃO DA GRADE	32
3.3 BATIMETRIA	33
3.4 FORÇANTES EXTERNAS	34
3.5 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS PARA INICIALIZAÇÃO DO MODELO	35
3.5.1 Condições de Contorno	35
3.6 EXPERIMENTOS NUMÉRICOS	39
Padrão de vento	48
3.7 COMPARAÇÃO DOS DADOS <i>IN SITU</i> COM AS SIMULAÇÕES DO MODELO ..	50
3.8 ESTABILIDADE DOS MODELOS	52
4 RESULTADOS	54
4.1 CAMPOS HORIZONTAIS – TEMPERATURA, DIREÇÃO E VELOCIDADE DE CORRENTE	54

4.2 CAMPOS HORIZONTAIS DE FITOPLÂNCTON (P).....	56	4.3
SEÇÕES VERTICAIS DE TEMPERATURA, SALINIDADE, VELOCIDADE DE CORRENTE, NITRATO (N), FITOPLÂNCTON (P), ZOOPLÂNCTON (Z) E DETRITOS (D).....	58	

13

4.3.1 Seção vertical de temperatura, salinidade e velocidade de corrente ao longo do EXP2 – Transecto 1 (Arraial do Cabo)	59	
4.3.2 Seções verticais de N, P, Z e D ao longo do EXP2 – Transecto 1 (Arraial do Cabo).....	63	
4.3.3 Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidade de corrente ao longo do EXP2 – Transecto 2 (Saquarema).....	70	4.3.4
Seção vertical de N, P, Z e D ao longo do EXP2 – Transecto 2 (Saquarema)	74	

5 DISCUSSÃO

83

5.1 PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DURANTE OS PROCESSOS DE RESSURGÊNCIA E SUBSIDÊNCIA COSTEIRA	83
--	----

5.2 INTERAÇÕES ENTRE OS COMPONENTES FÍSICOS E BIOLÓGICOS.....	85
---	----

5.3 COMPARAÇÃO DO MODELO COM DADOS <i>IN SITU</i> E DE SATÉLITE.....	91
--	----

6 CONCLUSÕES

97 7 REFERÊNCIAS.....

100

14

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROCESSO DE RESSURGÊNCIA COSTEIRA

A ressurgência costeira (RC) é um fenômeno de mesoescala que induz a ascensão de águas profundas e ricas em nutrientes para a superfície do mar. Este processo ocorre em função da combinação entre a imposição de ventos fluindo paralelamente à costa e a dinâmica de Ekman (EKMAN, 1905). As águas superficiais costeiras são transportadas para mar aberto, e em resposta a esta perda de volume de água na costa, ocorre uma intrusão de águas profundas – frias e ricas em nutrientes – através do bombeamento de Ekman. Estas águas se distribuem ao longo da costa, formando uma pluma de águas relativamente mais frias do que no seu entorno. A RC ocorre com mais frequência e intensidade nas bordas leste dos oceanos, sendo as de maior destaque encontradas na costa do Perú, na América do Sul; na Califórnia, na América do Norte; e o sistema de Benguela, no Oeste da África, onde ventos favoráveis ao afloramento de águas frias e ricas em nutrientes atuam durante o ano inteiro, causando uma RC quase permanente (SCHIMDT, 2016).

No Brasil, a região de Cabo Frio – RJ (23°S), é reconhecida pela ocorrência de um importante sistema de RC (Figura 1) (CASTRO & MIRANDA, 1998; CASTELÃO *et al.*, 2004; CARBONEL & VALENTIN, 1999; BELÉM *et al.*, 2013). A RC em Cabo Frio (CF) é o resultado da combinação entre a configuração geográfica da costa, o estreitamento da plataforma continental e a persistência de fortes ventos de leste (L) e nordeste (NE), principalmente durante os meses de primavera e verão. Ainda, alguns estudos (CAMPOS *et al.*, 2000; CALADO *et al.*, 2010) sugerem que vórtices ciclônicos ao longo da Corrente do Brasil (CB) podem aumentar a eficiência da ressurgência costeira na região de CF, disponibilizando maior volume da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) para a quebra de plataforma e, conseqüentemente, para as regiões mais rasas. Em resumo, vários processos agem em conjunto no controle da variabilidade da temperatura da superfície e subsuperfície do oceano, próximo a quebra de plataforma e plataforma interna, bem como para a ocorrência do processo de RC na região de Cabo Frio (BELÉM *et al.*, 2013).

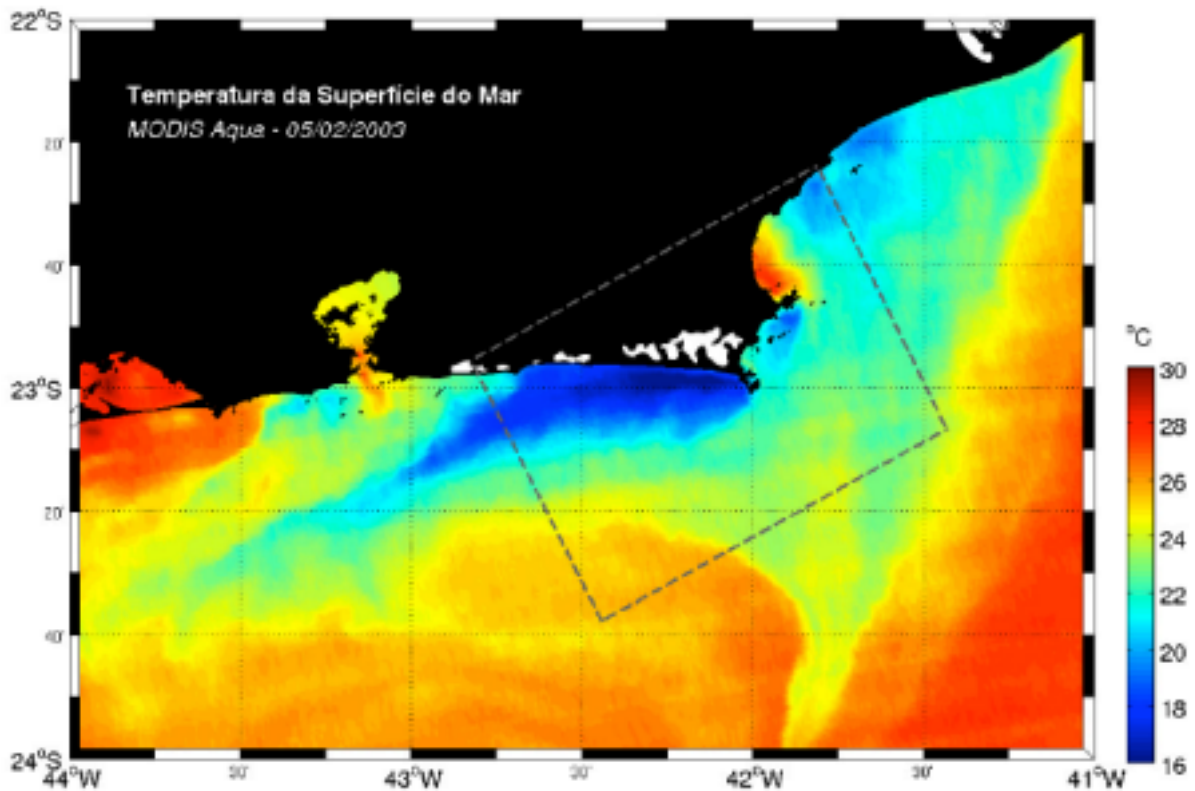


Figura 1. Imagem da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) evidenciando o processo de ressurgência costeira na região de Cabo Frio, RJ.

Ao fluir por vários dias consecutivos paralelamente à costa, os ventos de quadrante L/NE afastam a Água Costeira (AC) – com temperatura superior a 20 graus celsius (°C) e salinidade abaixo de 36 (MIRANDA, 1982) – em direção ao oceano aberto, através da dinâmica de Ekman. O afastamento da AC induz a ressurgência da ACAS, com temperaturas tipicamente abaixo de 20 °C e salinidades abaixo de 36.2 (MIRANDA, 1985). A RC resulta em gradientes termohalinos, posicionados em profundidades variadas, de acordo com a intensidade e direção dos ventos (VALENTIN *et al.*, 1987), que impactam diretamente a estratificação da coluna d’água.

Sob a influência de ventos de quadrante sul (S) e sudoeste (SO), relacionados comumente às frentes frias de outono e inverno, a RC (Figura 2) da ACAS é inibida. Isto ocorre em resposta ao empilhamento da AC na costa e a regressão da ACAS para isóbatas mais profundas, caracterizando o processo de subsidência costeira.

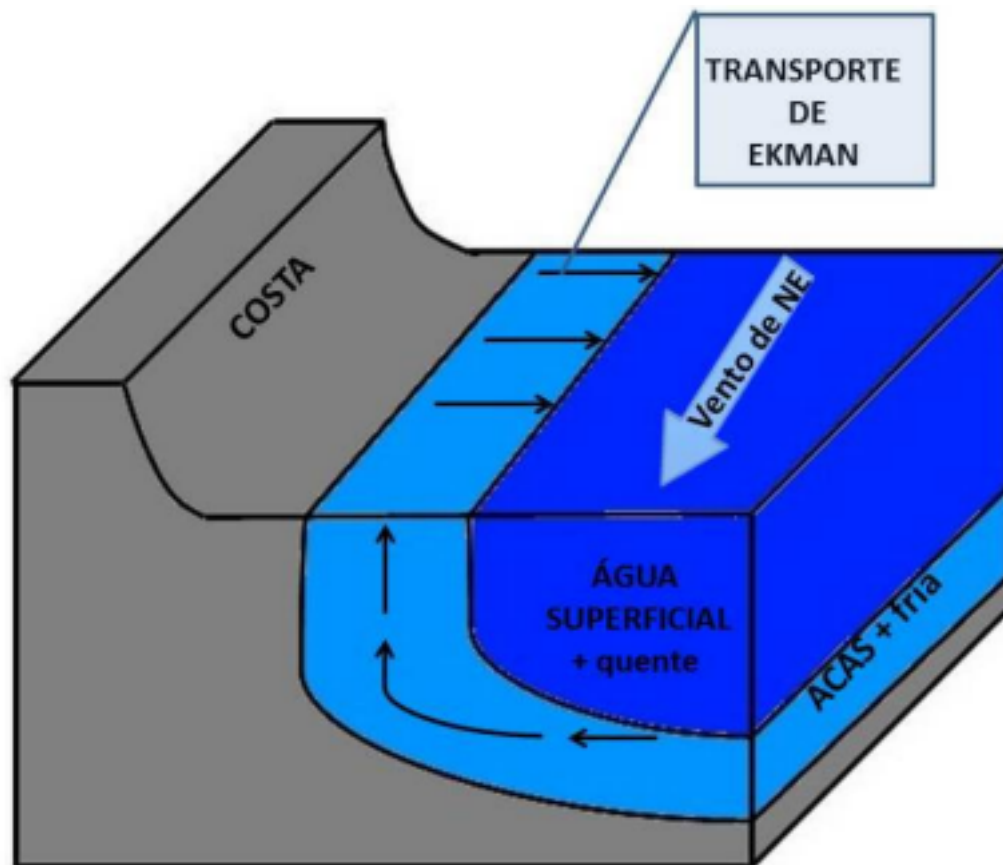


Figura 2. Figura ilustrativa da ocorrência do processo de RC na região de Cabo Frio, RJ.

Diversos estudos na região de Cabo Frio já relataram variações na estrutura termohalina devido aos processos de ressurgência e subsidência costeiras. TANAKA (1986), a partir de uma série de dados históricos da região, relacionou as variações na temperatura da água com os padrões sazonais de ventos e interações oceano atmosfera. SILVEIRA *et al.* (2002), por meio de amostragens com CTD, durante o inverno e o verão, caracterizaram a estrutura termohalina seccional da região em condições climáticas distintas. Os autores relataram a presença de uma pronunciada termoclina durante o verão, devido à intrusão da ACAS na plataforma interna, caracterizando a ocorrência de RC. No inverno, por sua vez, a predominância de ventos de quadrante S/SO, refletiu em permanência de AC na superfície nas proximidades da costa, e conseqüentemente em temperaturas superficiais mais elevadas na região de Cabo Frio, em relação àquelas observadas no verão.

A região de CF é caracterizada como oligotrófica, ou seja, contém baixas concentrações de nutrientes dissolvidos. A ocorrência do processo de RC, através do afloramento da ACAS, é responsável pela advecção de nutrientes “novos” para a superfície, os quais são energeticamente mais eficientes para o crescimento do fitoplâncton do que os nutrientes regenerados (predominantemente amônia e uréia), encontrados na região costeira (METZLER *et al.*, 1997). Este *input* favorece o aumento do aporte energético que é transferido para os níveis tróficos superiores da cadeia alimentar, uma vez que estimula a multiplicação do fitoplâncton, organismos base desta cadeia. A eficiência com que a energia é transferida até os consumidores de topo é também incrementada durante o processo de RC, visto que microalgas planctônicas com taxas de crescimento mais rápidas e requerimento nutricional mais elevado, como as diatomáceas, são geralmente favorecidas nestas situações. Com seu maior biovolume, diatomáceas servem de alimento a consumidores primários de maior tamanho (i.e., metazooplâncton), reduzindo assim o número de níveis tróficos e a perda energética associada a sucessivas transferências entre os diferentes níveis. Desta forma, a influência da hidrodinâmica nos processos ecológicos torna a região de Cabo Frio de grande importância para estudos físico-biológicos.

1.2 CARACTERÍSTICAS DO FITOPLÂNCTON

O fitoplâncton é o conjunto de organismos fotossintetizantes e autotróficos existente em alta diversidade nos oceanos – entre 4.000 e 5.000 espécies (SOURNIA *et al.*, 1991). São considerados os principais produtores primários de carbono no oceano aberto e em áreas costeiras (REYNOLDS, 2006). A biomassa fitoplanctônica libera grandes quantidades de oxigênio gasoso (O_2) ao usar a molécula da água como doador de elétrons durante o processo de fotossíntese, sendo responsável por grande parte da produção de O_2 no globo. Além disto, são um dos principais componentes da bomba biológica, pois fixam o carbono em águas superficiais e o exportam para águas profundas. Este eficiente processo é responsável por cerca de 3/4 do transporte de todo o carbono para o mar profundo (RIEBESSELL *et al.*, 2007).

Quando existe uma grande oferta de nutrientes novos nos primeiros 200 metros

de coluna d'água (i.e., zona eufótica), como no caso da RC, pode ocorrer um grande aumento na biomassa fitoplanctônica, caracterizando os *blooms* ou florações, os quais geralmente são benéficos para a produção biológica nos oceanos. Os *blooms* normalmente favorecem a dominância de células fitoplanctônicas maiores, estimuladas pela oferta de novos nutrientes (DUCKLOW *et al.*, 2001). Com isso, este fenômeno disponibiliza grande quantidade de alimento para os consumidores primários e consequentemente para o resto da cadeia trófica.

Na região de Cabo Frio os *blooms* de fitoplâncton normalmente ocorrem na primavera e no verão, que ocorrem em resposta ao *input* de nutrientes para a zona eufótica associado ao processo de ressurgência.

O aumento da abundância de microalgas planctônicas no ambiente marinho está relacionado com três principais variáveis: luz, nutrientes e pastagem zooplanctônica. As microalgas que compõem o fitoplâncton são organismos fotossintetizantes, que necessitam de luz solar para o seu crescimento. O limite da zona eufótica nos oceanos pode ser alterado de acordo com a transparência da água, que é influenciada pela presença de matéria orgânica e sedimentos em suspensão. Além disto, a própria comunidade fitoplanctônica pode interferir na penetração da luz e seus diferentes espectros na coluna d'água, ocasionando um processo conhecido como autosombreamento, como por exemplo, em situações de *bloom* de microalgas, em que a grande densidade de organismos que se encontra mais próxima da superfície pode causar um efeito de sombra para o fitoplâncton situado em maiores profundidades (LEWANDOWSKA, 2015).

Diferentes nutrientes são utilizados pelo fitoplâncton para realizar suas funções fotossintéticas e de crescimento celular, sendo o fosfato e o nitrogênio (N) – principalmente sob a forma de nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) – essenciais macronutrientes que podem ser limitantes para produção primária (TURNER, 2015). Além destes, o silicato (SiO_2^-) é utilizado em grandes quantidades pelas diatomáceas para síntese de seu exo-esqueleto, podendo assim limitar o crescimento deste importante grupo fitoplanctônico, que é dominante em situações de RC (ABRANTES, 2016). O fosfato é essencial para a realização da fotossíntese e composição da membrana celular, enquanto o nitrogênio é um dos principais nutrientes utilizados para

formar a estrutura das células fitoplanctônicas. Alguns micronutrientes, como ferro (Fe) e manganês (Mn) também podem ser essenciais para o crescimento de microalgas, pois são assimilados e utilizados a nível molecular pelo fitoplâncton (MOREL, 2003).

Entretanto, as águas superficiais da maior parte do oceano são consideradas oligotróficas, ou seja, possuem baixas concentrações dos nutrientes necessários para a realização dos processos metabólicos do fitoplâncton (WILKERSON & DUGDALE, 2008). Mesmo com esta limitação, a maior parte da produção primária no ambiente marinho ocorre na zona eufótica por meio da fotossíntese, devido à presença de luz suficiente e a oferta, mesmo que escassa, de nutrientes novos e/ou regenerados. A matéria orgânica resultante de toda esta produção é utilizada por meio da respiração autotrófica e heterotrófica, ou remineralizada dentro ou logo abaixo da zona eufótica pelos microorganismos que compõem a alça microbiana (GRUBER, 2008). Além disto, a matéria que não passa por nenhum destes processos segue para águas mais profundas onde é consumida por organismos de ambiente profundo, ou remineralizada novamente para sua forma inorgânica (GRUBER, 2008). Apesar de existir esta alta disponibilidade de nutrientes em regiões abaixo da zona eufótica, a produção primária é quase inexistente nessas regiões devido à limitação de incidência luminosa. Quando ocorre mistura vertical na coluna d'água, induzida pela imposição de ventos sob a superfície ou por processos de RC, nutrientes de camadas mais profundas do oceano podem ser disponibilizados para regiões de subsuperfície, induzindo a um aumento da produção primária. Portanto a produção fitoplanctônica nos oceanos se distribui em resposta a variações na profundidade da termoclina e, conseqüentemente, da nutriclina, obedecendo a um controle *bottom-up* (Figura 3) (VALENTIN, 1987; VALENTIN, 2001; COELHO-SOUZA, 2012; BAUM & WORM, 2009).

Outro fator que influencia a abundância de fitoplâncton e de bactérioplâncton é a pastagem destes organismos por espécies zooplanctônicas (controle *top-down*) (Figura 3) (BANSE, 1995; BAUM & WORM, 2009). Segundo JACKSON (1980), principalmente em áreas oligotróficas, a pastagem pelo zooplâncton é a principal fonte de mortalidade do fitoplâncton. RICHMAN *et al.* (1977), analisando a pastagem de copépodes em Chesapeake Bay, EUA, sugeriram que estes se alimentam

primeiramente das grandes células e, posteriormente, trocam sua alimentação para o fitoplâncton de menor tamanho. LANDRY & HASSETT (1982), em estudo realizado na costa de Washington, EUA, também identificaram copépodes como os responsáveis por 17 a 52% da mortalidade diária de fitoplâncton.

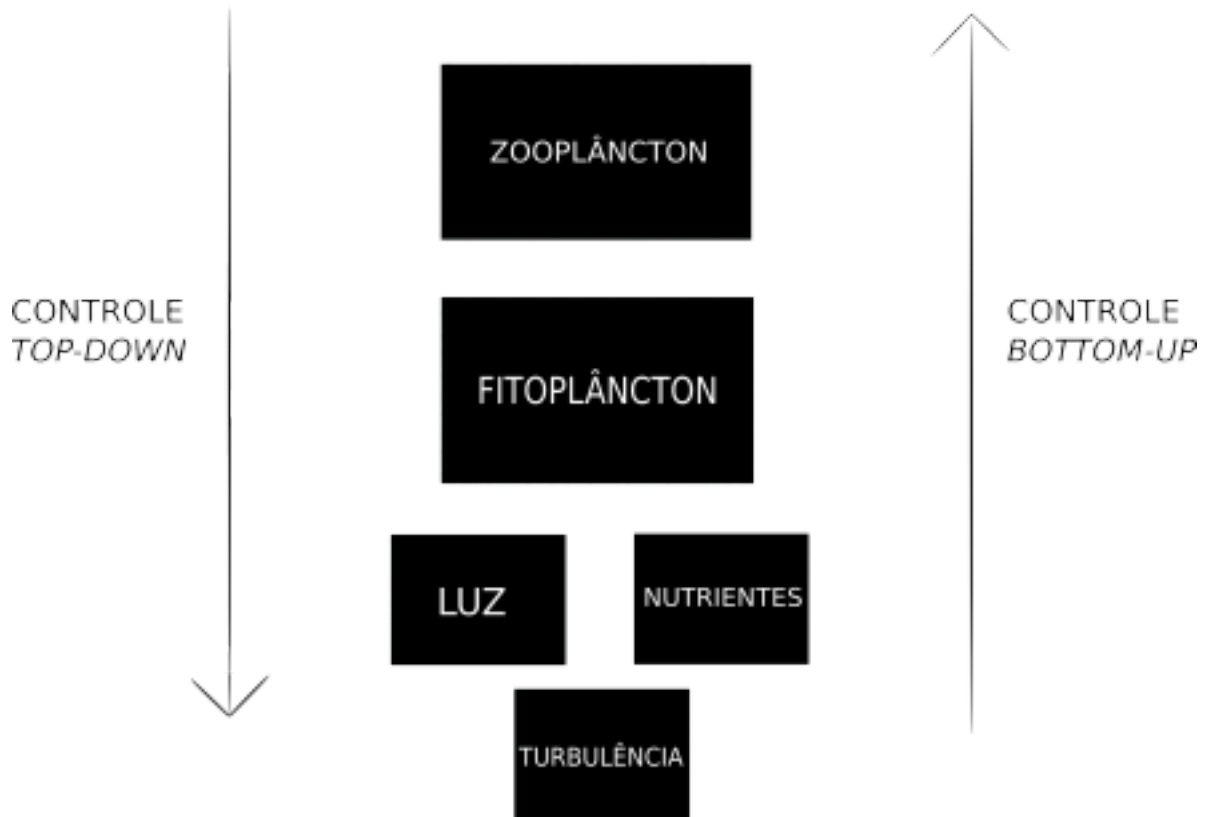


Figura 3. Desenho esquemático dos controles top-down e bottom-up.

Na região de CF, intermitentemente sujeita aos efeitos da RC, VALENTIN (1980), detectou a presença de espécies herbívoras de zooplâncton, destacando a dominância de *Ctenocalanus vanus*, *Penilia avirostris* e *Calanoides carinatus*, além de uma grande diversidade de copépodes carnívoros e onívoros.

1.3 CARACTERÍSTICAS DO FITOPLÂNCTON DA REGIÃO DE CABO FRIO

Apesar de existirem poucas áreas de RC ao redor do mundo, estas são reconhecidas pela sua alta produção biológica e são responsáveis por mais de 20% da

captura de pescado nos oceanos (PAULY & CHRISTENSEN, 1995). Esta produção de pescado ocorre em grande parte pela alta produtividade primária nas áreas de RC, onde nutrientes são ofertados em altas concentrações a diferentes espécies de fitoplâncton.

Por meio da RC, o nitrogênio injetado nas camadas superficiais do oceano aumenta significativamente a produtividade do local (DUGDALE & GOERING, 1967). O NO_3^- , principalmente em áreas de RC, é o principal nutriente utilizado para o crescimento do fitoplâncton. Através de amostragens realizadas no sistema de ressurgência de Benguela, PROBYN (1985), constatou que 71% do total de nitrogênio assimilado pelo fitoplâncton estava disponível sob a forma de NO_3^- .

De acordo com BODE *et al.* (1997), as diatomáceas são o grupo dominante quando uma nova fonte de nitrogênio é adveçada para a zona eufótica. Os gêneros *Chaetoceros*, *Thalassiosira*, *Rhizosolenia* e *Nitzschia* são os mais dominantes em regiões de RC e são muito bem adaptados às altas concentrações de nutrientes encontrados na água recém ressurgida, favorecendo sua ocorrência em elevadas densidades celulares (MARGALEF, 1978).

O sistema de ressurgência de Cabo Frio sofre menor efeito do transporte de Ekman e apresenta menor biomassa primária, concentração de nutrientes e produtividade em relação a outros sistemas de ressurgência ao redor do mundo, como o de Benguela (COELHO-SOUZA, 2012). A baixa eficiência energética do processo de RC na região de Cabo Frio, de acordo com GONZALEZ-RODRIGUEZ *et al.* (1992), pode estar relacionada a dois fatores principais: (1) dispersão da biomassa fitoplanctônica devido à intensidade das correntes, ou seja, correntes fortes podem facilmente controlar a disponibilidade da ACAS para regiões superficiais e influenciar a densidade do fitoplâncton; e (2) às perdas por herbivoria, uma vez que na região de Cabo Frio a pressão por pastagem pode ser estimada em 50%.

Mesmo que este sistema resulte em menor transferência de energia ao longo dos níveis tróficos, comparado a outros sistemas de RC, a RC de Cabo Frio possui importante papel ecológico local, impactando diretamente a composição das espécies e a estrutura trófica na região (VALENTIN, 2001).

Durante a RC, ocorre um aumento da produtividade primária na região de Cabo Frio, dominada principalmente por diatomáceas (GONZALEZ-RODRIGUEZ et al., 1992, GUENTHER et al., 2008). LINS DA SILVA et al. (1988) concluíram que a estratificação da coluna d'água na região de Cabo Frio, em resposta à RC, é um dos principais fatores que influenciam na variação do fitoplâncton na região. De acordo com estes autores, em condições de máxima ressurgência, as concentrações de nutrientes são elevadas e ocorre a dominância de *Thalassiosira* spp., diatomácea de célula grande e característica de ressurgência recente (TREGUER & LE CORRE, 1979). Por outro lado, quando as condições são desfavoráveis à RC, seja pela mudança no regime de ventos ou por alguma injeção de águas superficiais quentes e oligotróficas, a termoclina se posiciona em uma profundidade entre 15 e 30 metros. Nestas condições, ocorre o crescimento de pequenas diatomáceas do gênero *Nitzschia* abaixo da termoclina, enquanto as águas superficiais são dominadas por dinoflagelados.

GUENTHER et al. (2008), em estudo na região de Cabo Frio, concluíram que há uma alternância no tamanho das células fitoplânctônicas durante processos de ressurgência e subsidência costeira. De acordo com estes autores, em resposta ao afloramento da ACAS, ocorre o predomínio de organismos microplânctônicos autotróficos. Por outro lado, durante a subsidência costeira, predominam células menores, componentes do pico e nanofitoplâncton, devido a diminuição da disponibilidade de nutrientes.

Deste modo, alterações nas propriedades físico-químicas da água podem refletir em modificações nos parâmetros de crescimento e na estrutura e distribuição das comunidades fitoplânctônicas e, concomitantemente, dos níveis tróficos superiores. Com isso, fazem-se necessárias abordagens multidisciplinares a fim de identificar a magnitude e intensidade da influência destas modificações no funcionamento do ecossistema marinho. Uma das ferramentas utilizadas para se avaliar a interação entre os processos físicos e biológicos do oceano, em diferentes escalas temporais e espaciais, é o uso de modelos hidrodinâmicos acoplados a modelos biológicos (e.g. CARBONEL & VALENTIN, 1999; OSCHLIES *et al.*, 2000; BIDIGARE *et al.*, 2009; LACHKAR & GRUBER, 2011).

1.4 MODELOS FÍSICO-BIOGEOQUÍMICOS

Como elucidado nos tópicos anteriores, os parâmetros físicos, químicos e biológicos de cada região exercem uma forte influência sobre a comunidade fitoplanctônica. Para compreender os processos que atuam no crescimento e na dispersão do fitoplâncton marinho, diversos pesquisadores utilizam a modelagem numérica como ferramenta principal. Nestes modelos, estão presentes equações que irão determinar a interação entre as variáveis (físicas, químicas e biológicas), resultando em uma representação virtual do que acontece nos oceanos em diferentes escalas.

Em uma escala espacial de uma bacia oceânica, BIDIGARE *et al.* (2009), baseados em dados observacionais de 14 anos, realizaram simulações para o Oceano Pacífico Norte com um modelo físico-biogeoquímico, e encontraram variações na produção biológica em resposta às variações climáticas. Fenômenos de menor escala espacial e temporal, como a RC, também são particularmente estudados pela modelagem físico-biogeoquímica. LACHKAR & GRUBER (2011), compararam dois sistemas onde ocorre RC: o sistema de correntes da Califórnia (SCCal), no oeste dos Estados Unidos; e o sistema de correntes das Canárias (SCCan), no noroeste da África, ambos localizados na borda leste do oceano Pacífico e do Atlântico, respectivamente. Os autores encontraram diferenças significativas na produtividade primária líquida (PPL), a qual é o resultado da produtividade total menos os gastos metabólicos com respiração pelos organismos, nos dois sistemas. A PPL foi 50% maior no SCCan, mesmo que uma maior disponibilidade de nutrientes tenha sido encontrada no SCCal. Esta diferença, segundo os autores, pode ser resultado de tempo de residência mais longo da água ressurgida no noroeste africano, devido a sua plataforma continental mais extensa em comparação com o oeste dos Estados Unidos. Este fato permite que a comunidade fitoplanctônica do SCCan tenha mais tempo para assimilar os nutrientes disponíveis.

ROCHA (2011), a partir de comparações entre imagens de satélite e saídas de modelo, criou um modelo físico-biogeoquímico para a costa da Península Ibérica. Este estudo obteve sucesso em simular *blooms* de primavera e ainda permitiu uma avaliação satisfatória da variação anual dos parâmetros biogeoquímicos da região.

Na região de Cabo Frio, VALENTIN & COUTINHO (1990) realizaram um estudo

preliminar com o objetivo de criar um modelo para a RC local. A partir de simulações numéricas, foi possível simular o pico de clorofila-*a* (chl-*a*) durante um evento de RC. Complementando o estudo desenvolvido por estes autores, CARBONEL & VALENTIN (1999), desenvolveram um modelo físico-biogeoquímico para representar um *bloom* superficial de fitoplâncton causado pela RC, com três componentes principais: nutrientes, fitoplâncton e zooplâncton. Os resultados indicaram um *bloom* de menores proporções em comparação com outras regiões de ressurgência do mundo, com abundâncias de fitoplâncton relativamente baixas. O *bloom* começou a ocorrer um dia após os nutrientes atingirem a concentração máxima em superfície. Os maiores valores de densidade celular do fitoplâncton foram registrados nas proximidades do município de Saquarema, três dias após a máxima concentração de nutrientes encontrada. No entanto, esta região é relativamente distante do município de Arraial do Cabo, um dos primeiros locais onde a ACAS ressurgente surge na superfície. Este resultado indicou um atraso na assimilação dos nutrientes pela comunidade fitoplânctônica, uma vez que não foram encontradas altas densidades de fitoplâncton nas águas recém ressurgidas. Em resumo, os autores concluíram que a duração do vento atuante, a quantidade de nutrientes disponibilizados para a zona eufótica, a dispersão e a taxa de assimilação destes nutrientes pelo fitoplâncton, bem como a taxa máxima de pastagem de fitoplâncton pelo zooplâncton, são os principais fatores que influenciam na duração e distribuição da floração.

Apesar dos estudos pioneiros citados anteriormente, a dinâmica físico biogeoquímica da região de Cabo Frio ainda não é completamente compreendida. A variação nos parâmetros físico-químicos da água na região é uma resposta aos distintos padrões de vento que originam processos hidrodinâmicos complexos, como a ressurgência costeira e a subsidência.

Para um melhor entendimento desta questão, modelos físico-biogeoquímicos de alta resolução, mais modernos, complexos e com novos componentes podem ser ferramentas úteis para se compreender os padrões de dispersão e o crescimento do fitoplâncton durante as florações. Além disto, tais modelos podem auxiliar na compreensão da influência do tempo de resposta da assimilação de nutrientes pelo

fitoplâncton a transferência de energia ao longo dos níveis tróficos, durante a ocorrência

25

de processos de ressurgência e subsidência costeira. A resposta à hidrodinâmica por parte da comunidade fitoplanctônica tem consequências não só para a produção primária, que é extremamente importante para a produção biológica local, mas também para a gestão e manejo dos recursos marinhos da região de Cabo Frio.

26

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho visa investigar a influência do padrão de ventos, da hidrodinâmica e das características físico-químicas da água na abundância e distribuição espacial e temporal do fitoplâncton, nitrato, zooplâncton e detritos durante um evento de ressurgência costeira na região de Cabo Frio, a partir de um modelo físico acoplado a um modelo biológico.

27

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MODELO BIOLÓGICO

Neste trabalho será utilizado o módulo biogeoquímico descrito por POWELL *et al.* (2006), que está presente no modelo hidrodinâmico *Regional Oceanic Modeling System* (ROMS). Este módulo foi escolhido pois consegue reproduzir/representar de forma eficaz a relação entre feições oceânicas, tais como filamentos, jatos costeiros, eventos de ressurgência costeira e de mesoescala de superfície, e os processos biológicos (POWELL *et al.* 2006).

Este módulo é um modelo NPZD simples, baseado no nitrogênio, e composto por quatro componentes principais: concentração de nitrato (NO_3^-); biomassa de

fitoplâncton (P); biomassa de zooplâncton (Z); e quantidade de detritos (D). O nitrogênio total é, portanto, particionado em nitrogênio dissolvido (NO_3^-) e nitrogênio particulado (D).

A seguir segue um resumo das equações e dos parâmetros utilizados no modelo de POWELL *et al.* (2006), para os cálculos das interações entre os componentes físicos e biológicos. O modelo é composto por quatro equações dinâmicas principais para N, P, Z e D, (1)-(4) (Figura 4), que possuem a mesma fórmula geral. À esquerda, as equações contêm dois termos: a derivada das variáveis no tempo local (e.g.: $\partial N/\partial t$) e o transporte vertical das variáveis (e.g.: $\mathbf{u} \cdot \nabla N$). À direita, as equações são compostas por diversos termos, mas todas elas possuem a fórmula (e.g.: $\partial/\partial z(k_v \partial N/\partial z)$) que é referente aos termos de difusão ou mistura vertical. O restante dos termos que se localizam ao lado direito da equação, com a exceção dos termos de mistura vertical, representam a dinâmica biológica, incluindo o termo de deposição ($w_d \partial D/\partial z$) na equação (4).

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{\partial N}{\partial t} \right] + \left[\mathbf{u} \cdot \nabla N \right] = \overset{\text{Remineralização do D}}{\uparrow} \delta D + \underset{\substack{\text{Eficiência} \\ \text{fisiológica do Z}}}{\downarrow} \gamma_n GZ - \underset{\substack{\text{Absorção de N} \\ \text{pelo P}}}{\downarrow} UP + \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial N}{\partial z} \right) \right], \quad (1) \\
 & \left[\frac{\partial P}{\partial t} \right] + \left[\mathbf{u} \cdot \nabla P \right] = \overset{\substack{\text{Absorção de N} \\ \text{pelo P}}}{\uparrow} UP - \underset{\substack{\text{Pastagem do P pelo Z}}}{\downarrow} GZ - \overset{\text{Mortalidade do P}}{\uparrow} \sigma_d P + \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial P}{\partial z} \right) \right], \quad (2) \\
 & \left[\frac{\partial Z}{\partial t} \right] + \left[\mathbf{u} \cdot \nabla Z \right] = \overset{\substack{\text{Pastagem de Z corrigida pela} \\ \text{eficiência de excreção}}}{\uparrow} (1 - \gamma_n) GZ - \underset{\substack{\text{Mortalidade do Z}}}{\downarrow} \zeta_d Z + \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial Z}{\partial z} \right) \right], \quad (3) \\
 & \left[\frac{\partial D}{\partial t} \right] + \left[\mathbf{u} \cdot \nabla D \right] = \overset{\text{Mortalidade do P}}{\uparrow} \sigma_d P + \underset{\substack{\text{Mortalidade do Z}}}{\downarrow} \zeta_d Z - \overset{\text{Remineralização do D}}{\uparrow} \delta D + \underset{\substack{\text{Taxa de sedimentação}}}{\downarrow} w_d \frac{\partial D}{\partial z} + \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(k_v \frac{\partial D}{\partial z} \right) \right], \quad (4)
 \end{aligned}$$

 Derivada do tempo local	N = Nitrito
 Transporte ou Mistura vertical	P = Fitoplâncton
 Difusão vertical	Z = Zooplâncton
	D = Detrito

Figura 4. Fórmulas utilizadas pelo modelo de POWELL et al. (2006), para calcular as interações entre os processos físicos e biológicos. Representam a variação da concentração de nitrato, fitoplâncton, zooplâncton e detritos, no tempo em função da advecção e do transporte vertical. Adaptado de POWELL et al.(2006).

Além das equações governantes, existem mais três equações: (5), (6), (7) (Figura 5) referentes, respectivamente, à pastagem de fitoplâncton pelo zooplâncton, à

irradiação da luz e ao crescimento fotossintético e absorção de nutriente pelo fitoplâncton, sendo que todas representam correções para os valores utilizados nas equações principais. Nessas equações, os principais processos incluídos são o crescimento fotossintético e a absorção de nutriente pelo fitoplâncton (U), a pastagem de fitoplâncton pelo zooplâncton (G), a mortalidade tanto de fitoplâncton (\diamond_1) quanto de zooplâncton (ζ_1), sedimentação (\diamond_1) e remineralização (\diamond).

Os níveis de luz de superfície são assumidos como constantes horizontais, ou seja, sem variação latitudinal. A disponibilidade de luz de acordo com a profundidade é calculada levando em consideração o efeito da atenuação exponencial da luz na água do mar (\diamond_1) (quanto maior a profundidade, maior a atenuação), e do autosombreamento pelo fitoplâncton (\diamond_1), quanto maior a concentração de fitoplâncton na superfície, maior a atenuação da luz e menor é a quantidade de luz disponível, uma vez que grande parte já foi absorvida.

A curva *Michaelis-Menten* é usada para descrever a mudança na cinética de absorção de nitratos como uma função da concentração de nitratos (U). A pastagem de fitoplâncton pelo zooplâncton é parametrizada utilizando a função Ivlev (G), com certa proporção (\diamond_1) de fitoplâncton consumido sendo perdido diretamente para processos metabólicos e para o *sloppy feeding*.

O *sloppy feeding* consiste na ineficiência na pastagem feita pelo zooplâncton frente a células fitoplanctônicas muito grandes ou a excesso de alimento. Sob estas condições, o zooplâncton não armazena toda a energia transferida pela célula fitoplânctônica, uma vez que parte dela é perdida devido a partículas não digeridas, o que diminui a eficiência de assimilação nutricional pelo zooplâncton (HARRIS *et al.*, 2000).

Os termos de mortalidade e remineralização são funções lineares de concentração, ou seja, o fitoplâncton que morre torna-se detrito (\diamond_1 , ζ_1), enquanto o detrito é remineralizado e torna a ser disponibilizado na forma de nitrogênio dissolvido (\diamond). Uma questão importante é que nenhum dos processos biológicos no modelo desenvolvido por POWELL *et al.* (2006) são dependentes da temperatura.

$$G = R_m (1 - e^{-AP}), \quad (5)$$

$$I = I_0 \exp \left(k_z + k_p \int_0^z P(z') dz' \right), \quad (6)$$

$$U = \frac{V_m N}{k_N + N} \frac{\alpha I}{\sqrt{V_m^2 + \alpha^2 I^2}} \quad (7)$$

Figura 5. Fórmulas para a correção das equações principais. Representam a taxa de correção da pastagem de fitoplâncton por zooplâncton (G), da irradiação (I) e a taxa de correção da absorção de nutrientes e crescimento do fitoplâncton (U).

A Tabela 1 contém os parâmetros utilizados do módulo biológico *NPZD_POWELL*, modelo baseado em nitrogênio desenvolvido por POWELL et. al (2006), e que está contido no ROMS.

31

Tabela 1. Parâmetros utilizados no modelo, e seus respectivos símbolos, valores e dimensões. Adaptada de POWELL et al. (2006).

	Parâmetro Símbolo Valor Dimensão
Coeficiente de extinção da luz	◆ ₁ 0,067 m ⁻¹
Coeficiente de autosombreamento	◆ ₁ 0,0095 m ² mmol-N ⁻¹

Inclinação inicial da curva P-I $\diamond 0,025 \text{ m}^2\text{W}^{-1}$	
Irradiância de superfície $\diamond 158,075 \text{ W m}^2$	
Taxa de absorção de Nitrato $\diamond 1,5 \text{ d}^{-1}$	
Coeficiente de meia saturação	$\diamond 1,0 \text{ mmol-N m}^3$
Mortalidade do Fitoplâncton $\diamond 0,1 \text{ d}^{-1}$	
Taxa de pastagem do Zooplâncton	$\diamond 0,52 \text{ d}^{-1}$
	Constante de Ivlev $\Lambda 0,06 \text{ m}^3\text{mmol-N}^{-1}$
Eficiência de excreção $\diamond 0,3$	
Mortalidade do Zooplâncton $\zeta 0,145 \text{ d}^{-1}$	
Remineralização $\delta 1,03 \text{ d}^{-1}$	
Taxa de sedimentação do detrito	$\diamond 8,0 \text{ m d}^{-1}$

Em resumo, as equações do modelo ((1), (2), (3), (4), (5), (6), (7)) representam basicamente a variação e advecção dos componentes N, P, Z, D no tempo em função dos parâmetros biológicos e do transporte vertical. O esquema de funcionamento do modelo foi sintetizado na Figura 6.

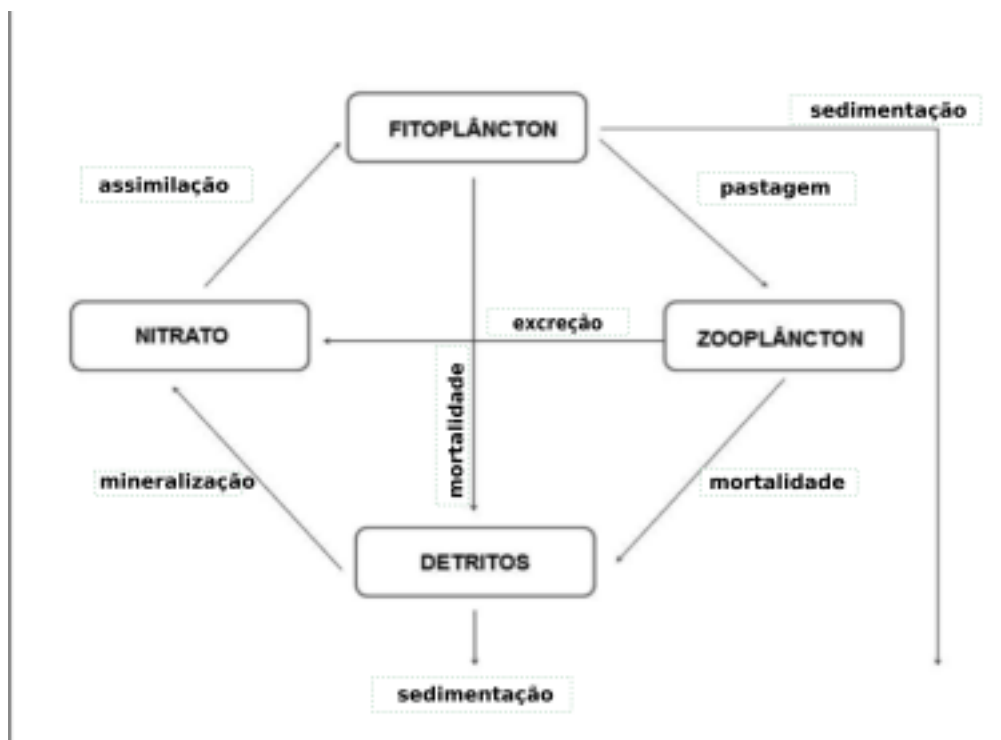


Figura 6. Desenho esquemático das interações dos componentes do modelo NPZD descrito por POWELL et al (2006). Os componentes estão descritos nos retângulos, sendo eles fitoplâncton, zooplâncton, nitratos e detritos. As setas indicam a direção da relação entre os componentes bem como os processos envolvidos nesta relação.

3.2 DEFINIÇÃO DA GRADE

Os experimentos numéricos no ROMS, para testes da metodologia, foram conduzidos em uma grade regular com 283 pontos na direção meridional e 335 pontos na direção zonal (Figura 7). A grade possui resolução horizontal de aproximadamente 3,3 km ($0,03^\circ$) e uma inclinação de aproximadamente 45° , seguindo a orientação da linha de costa. Na vertical a malha possui 40 níveis S (sigma), de forma que o espaçamento entre eles varia de acordo com a topografia e profundidade. Deste modo, a grade foi adensada com maior quantidade possível de níveis verticais próximos à superfície, com o intuito de resolver em maiores detalhes as camadas de Ekman de superfície. O domínio da grade abrange a região limitada por 19°S , 28°S , 37°O , 49°O , representando a região de atividade de mesoescala da CB, tendo como foco a região de ocorrência do sistema Vórtice-Ressurgência de Cabo Frio.

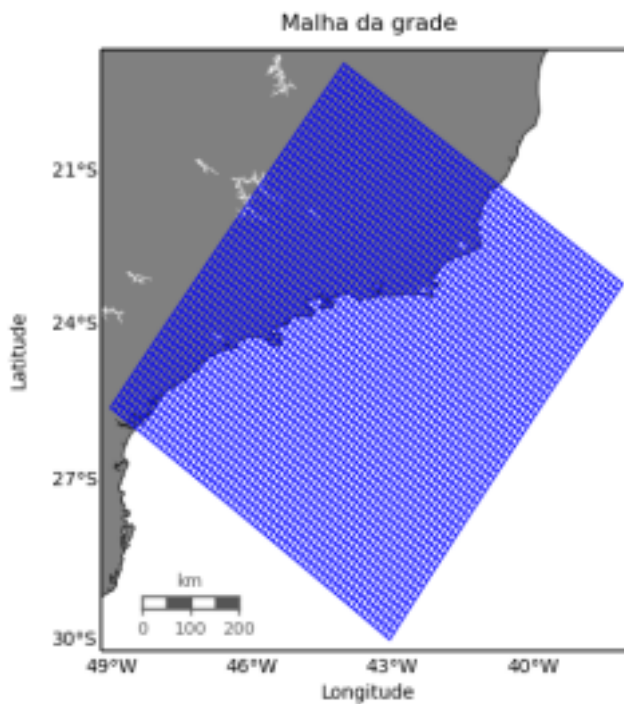


Figura 7. Malha da grade que foi utilizada nos experimentos numéricos composta pelos pontos zonais e meridionais, evidenciando os limites geográficos do domínio computacional.

3.3 BATIMETRIA

O domínio do modelo foi construído utilizando uma topografia submarina realística. A batimetria oceânica foi extraída do banco de dados batimétricos ETOPO REMO (Figura 8). Este banco é elaborado a partir da mescla de dados extraídos de cartas náuticas e folhas de bordo, com batimetria de base extraída do conjunto de dados do ETOPO-1. O ETOPO-1 é um modelo de relevo global de 1 arco-minuto (aproximadamente 2km) de resolução, desenvolvido pelo *National Geophysical Data Center* (NGDC), pertencente ao *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Este banco é gerado a partir do conjunto de diversos bancos de dados digitais com cobertura regional e global (AMANTE e EAKINS, 2009).

No âmbito do ETOPO-REMO, os dados de cartas náuticas e folhas de bordo abrangem as regiões de quebra de plataforma e plataforma continental. O ETOPO1 é responsável pela topografia do oceano profundo.

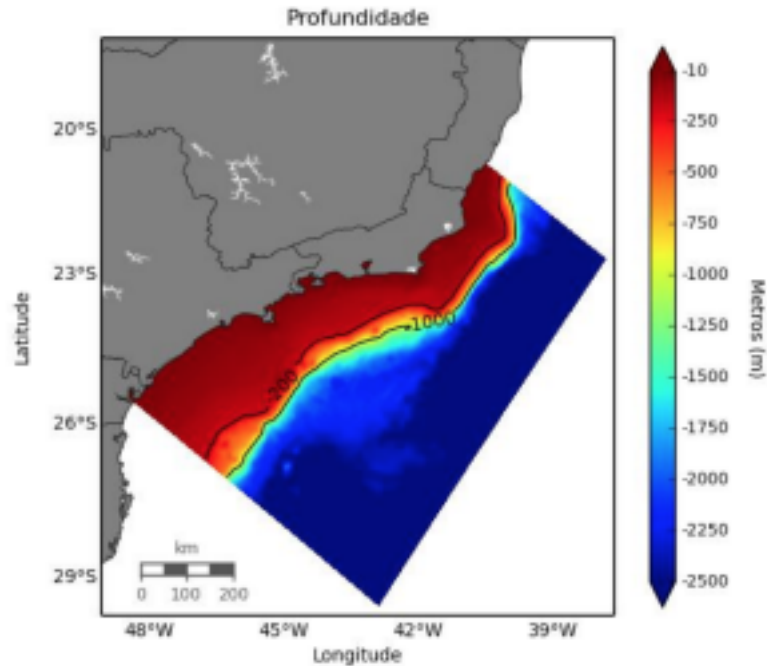


Figura 8. Batimetria do ETOPO-REMO interpolada na grade dos experimentos numéricos, com profundidades que variam de 0 a 2500 m.

3.4 FORÇANTES EXTERNAS

A ação dos ventos, na região de domínio do estudo, exerce papel fundamental como forçante da circulação local. Os dados de vento foram obtidos do projeto *Reanalysis* desenvolvido através de cooperação entre o *National Center of Environmental Predictions* (NCEP) e o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), instituições sediadas nos Estados Unidos da América.

Para a geração da condição inicial da forçante de vento utilizada nos experimentos numéricos, foram empregados dados vetoriais de vento a 10 m da superfície do oceano, provenientes de medições diárias do ano de 2014. Os dados vetoriais são disponibilizados nas suas componentes zonais e meridionais, com resolução espacial de aproximadamente 210 km e temporal de um dia para cobertura global.

O ROMS calcula suas equações internas a partir da transferência de *momentum* do campo atmosférico para o campo de massa oceânico. Com isso, é

necessário transformar os dados vetoriais de vento em “tensão de cisalhamento do vento sobre a superfície”. Para tal, o conjunto de dados do NCEP foi interpolado para a grade computacional do modelo e as componentes de velocidade do vento foram convertidas em tensão de cisalhamento (τ_{10}), utilizando a fórmula empírica:

$$\tau_{10} = \rho_a \cdot C_D \cdot V^3, \quad (8)$$

onde, ρ_a é a densidade do ar = $1,22 \text{ kgm}^{-3}$, C_D é o coeficiente de arrasto = 0.0013, e V é a velocidade do vento.

3.5 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS PARA INICIALIZAÇÃO DO MODELO

Os processos turbulentos na superfície livre, os quais incluem a difusão vertical turbulenta de *momentum* e dos traçadores – temperatura, salinidade, nitratos, fitoplâncton, zooplâncton e detritos – foram parametrizados pelo modelo de turbulência MY25, de MELLOR e YAMADA (1982). O modelo é composto por duas equações, sendo uma para a energia cinética turbulenta e outra para macro-escala de comprimento (SOUZA *et al.*, 2011). Permite o cálculo da energia turbulenta e dos fluxos verticais, abrangendo coeficientes de viscosidade turbulenta variáveis espaço temporalmente, sendo comumente utilizado em modelagens regionais de plataforma e quebra de plataformas continentais (DURSKI *et al.*, 2004).

Além disso, foi estabelecida uma variação diária para a radiação solar, com máximos de intensidade ao meio dia e mínimos de intensidade durante a noite.

3.5.1 Condições de Contorno

Como já citado anteriormente, os processos e feições oceânicas ocorrem em múltiplas escalas, tanto na região costeira quanto na região oceânica. Com isso, devido a limitações computacionais, é inviável a construção de grades computacionais suficientemente grandes para resolver com eficácia esta dinâmica complexa e suas interações (MARCHESIELLO *et al.*, 2001). Somado a isto, há a necessidade de levar

em consideração a influência de informações dinâmicas externas à área de domínio da grade que exercem impacto no processo a ser estudado. Assim, faz-se necessária a imposição de dados observacionais do oceano adjacente nas bordas (contornos) da grade computacional. Estes dados são relevantes para a resolução interna do modelo, e permitem uma melhor compreensão da relação entre as forçantes externas, a área modelada e o oceano limítrofe.

Com o intuito de evitar a contaminação da solução interna por erros oriundos à entrada destes “novos” dados, ou seja, diminuir as descontinuidades entre os dados de entrada e os dados que já estão no modelo, utiliza-se na modelagem numérica um artefato matemático denominado Contornos Abertos (CA). A determinação de que tipo de CA utilizar, no entanto, pode ter impacto crucial sobre a solução do domínio interno, pois é impossível se definir um conjunto de condições de contorno que garanta a existência de uma solução estável única. Sendo assim, a escolha de qual opção de contorno utilizar permanece como um dos maiores desafios para as técnicas atuais de modelagem numérica (MARCHESIELLO *et al.*, 2001).

De acordo com MARSALEIX *et al.* (2006), os CA tem dupla função: são necessários para forçar a solução interior do modelo com campos externos (obtidos de climatologias ou outros modelos), e ao mesmo tempo devem permitir que as ondas saiam pelos contornos sem quaisquer reflexões espúrias. Portanto, deve permitir que as perturbações geradas dentro do domínio computacional não ocasionem uma deterioração da solução interna do modelo, uma vez que as perturbações interiores que se aproximam do limite do domínio computacional devem se propagar através dele em forma de onda (MARCHESIELLO *et al.*, 2001). Em resumo, as condições de contorno aberto permitem que as ondas geradas no interior do modelo sejam propagadas para fora, com o mínimo de reflexão na borda (CALADO, 2006).

No presente estudo, optou-se por contornos fechados a O, devido à presença de linha de costa, e por contornos abertos no N, L e S do domínio da grade. As condições de contorno da superfície livre foram determinadas pela opção Chapman (CHAPMAN, 1985) e para *2D momentum* foi utilizada a Flather, que irradia os valores exteriores para a velocidade das ondas de gravidade internas.

Para condições de contorno de *3D momentum*, foi utilizada a condição de

radiação proposta por ORLANSKI (1976), na qual os fluidos externos e internos são tratados separadamente. Quando o limite é ativo, as soluções do contorno determinam a solução interior do modelo. Por sua vez, quando o limite é passivo, a solução do contorno é determinada pela solução interna do modelo. No entanto, este método é mais apropriado como condição de contorno passivo, com intenção de excluir ruídos, ou seja, ele possibilita a saída das soluções internas e dos distúrbios da área modelada de interesse, sem que estes se propaguem de uma forma muito reflexiva, o que diminui a probabilidade de contaminação das soluções internas.

Parte destas ondas que saem do domínio computacional pode acabar sofrendo ainda algum tipo de reflexão. Para filtrar eventuais ondas que ainda possam ser refletidas na borda, em conjunto com a condição radiacional de contorno, foi estabelecido o uso de uma camada de esponja. Esta camada consiste na criação de uma região próxima aos limites da grade, capaz de absorver e minimizar ainda mais os distúrbios e ruídos associados às condições radicacionais (MARCHESIELLO *et al.*, 2001).

Assim, uma região de atenuação (“esponja”), foi criada para as velocidades baroclínica e barotrópica. A camada esponja possui elevada viscosidade horizontal e é localizada perto dos limites do domínio computacional, sendo que essa viscosidade aumenta em direção a borda. A esponja foi criada nos 20 pontos de grade mais próximos do contorno da grade, com valores que variaram de 10 a 100 $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ (Figura 9). A escolha destes valores foi baseada no trabalho de PALÓCZY (2015).

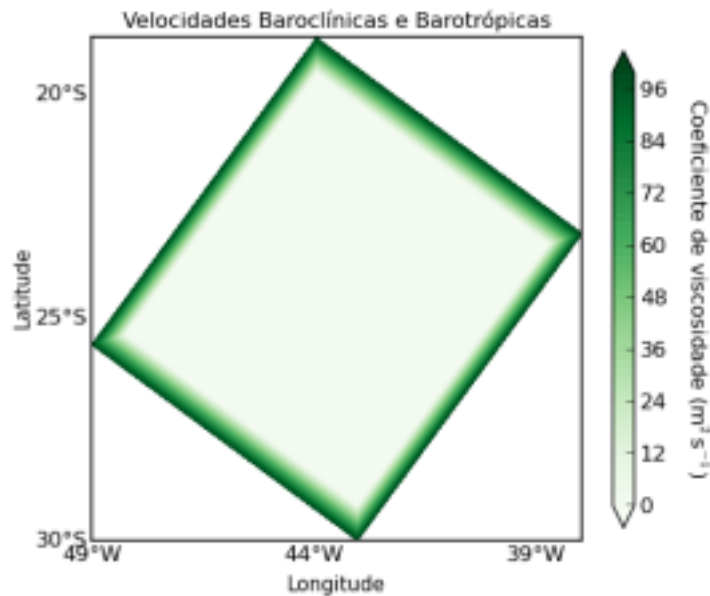


Figura 9. Camada esponja utilizada nos limites da grade computacional, para as velocidades baroclínicas e barotrópicas, com os coeficientes de viscosidade expressos em $m^2 s^{-1}$.

Para os traçadores – temperatura, salinidade, nitrato, fitoplâncton, zooplâncton e detrito –, para os quais os contornos ativos são alimentados continuamente por dados iguais aos utilizados para a criação dos campos iniciais, foi implementada a condição de contorno que soma o método radicional (Rad) com o relaxamento ou *nudging* (Nud), descrito por MARCHESIELLO *et al.*, (2001). Este último tem por finalidade minimizar os erros, quando os problemas internos requerem soluções externas.

Os contornos Rad/Nud objetivam a suavização da diferença entre as soluções internas do modelo, próximas ao contorno, e os dados externos que entram no modelo, diminuindo a descontinuidade nas proximidades da borda do domínio. Isso minimiza as chances do modelo resolver as equações diferenciais de forma inadequada, e de que soluções internas do modelo se afastem muito das condições reais do oceano. Além disso, para os traçadores, foi implementada uma esponja com aumento linear de difusão, contendo 20 pontos de grade ao longo do contorno, com os mesmos valores descritos acima para as velocidades baroclínicas e barotrópicas (Figura 10).

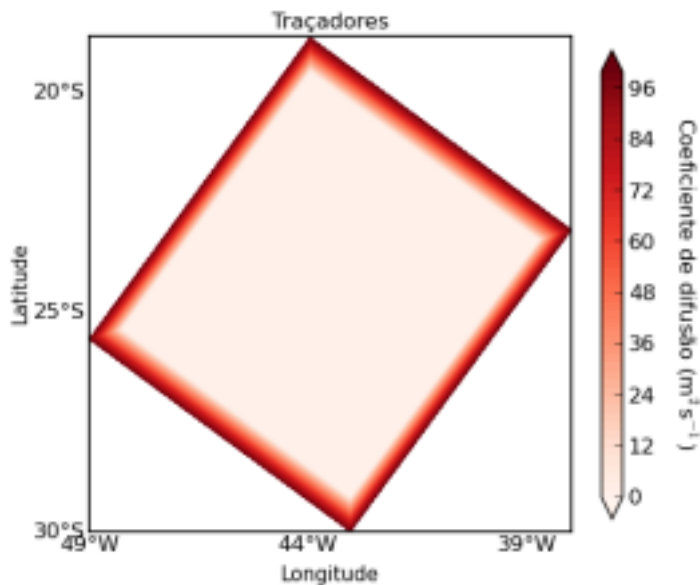


Figura 10. Camada esponja utilizada nos limites da grade computacional, para os traçadores, com os coeficientes de difusão expressos em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

A falta de conservação de volume em CA pode ser responsável também por introduzir e acumular erros dinâmicos. Desta forma, para prevenir problemas com esta questão, foi utilizado um método descrito por MARCHESIELLO *et al.* (2001), que consiste em calcular o transporte total de volume através dos contornos abertos e ajustá-lo para que ocorra uma entrada uniforme do fluxo barotrópico, de forma a equilibrar corretamente o transporte total do volume no domínio computacional.

3.6 EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

Com o intuito de representar de forma mais precisa a hidrodinâmica na região de Cabo Frio, campos iniciais tridimensionais de temperatura (Figura 11) e salinidade (Figura 12) foram gerados a partir de climatologia termohalina do *World Ocean Atlas* 2009 (WOA 2009).

O WOA 2009 é um conjunto de dados oceanográficos, produzido pelo *National Oceanographic Data Center* (NODC) pertencente ao *Nacional Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), que vem sendo utilizado como condição inicial e/ou de contorno em modelos numérico de circulação (LOCARNINI *et al.*, 2013). Este

conjunto consiste em climatologias globais das propriedades do oceano (e.g.: temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, dentre outras), abrangidas da superfície até a profundidade de 5550 m. As climatologias de temperatura e salinidade são médias de cinco climatologias decadais compreendidas ente 1955 e 2006. Os campos médios climatológicos são calculados em escalas temporais, anuais e sazonais a partir de análise objetiva e possuem resolução espacial de aproximadamente $0,25^\circ$.

No experimento 1 (EXP1), o modelo evolui sem a imposição de um campo inicial de velocidade e com variação diária dos ventos, durante 360 dias, com a finalidade de se representar a dinâmica da região e encontrar a estabilidade do modelo. Posteriormente, a partir deste experimento, foi determinado um passo de tempo da simulação onde a energia cinética média estivesse estabilizada, a fim de se simular um evento de ressurgência e uma posterior subsidência costeira, a partir da variação do padrão de ventos na região de CF.

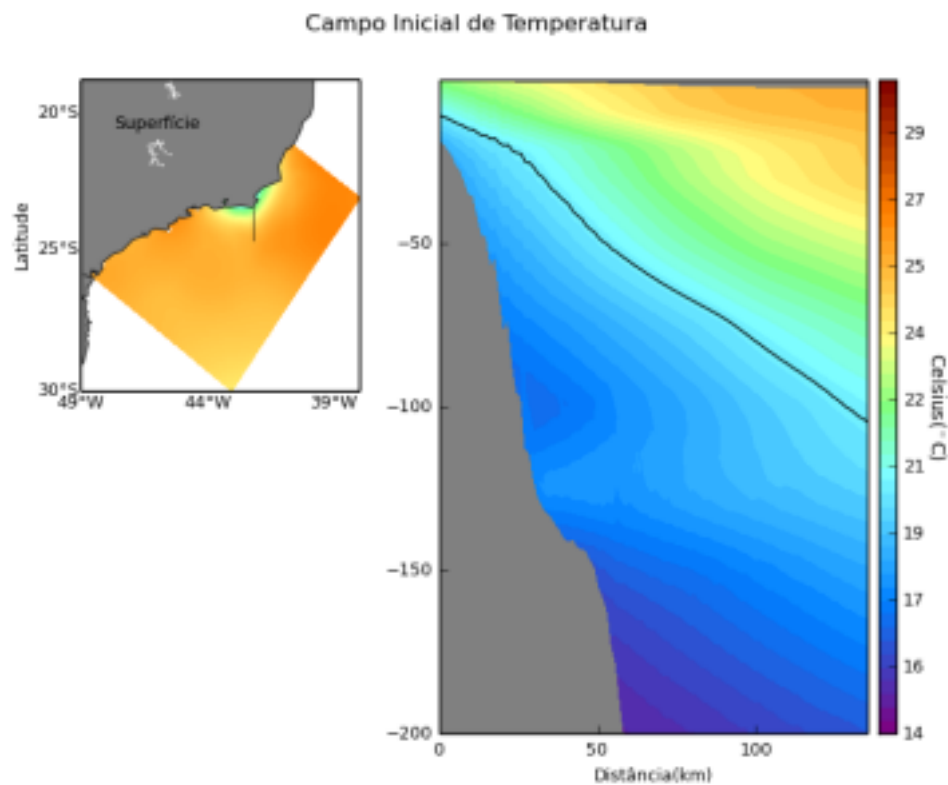


Figura 11. Distribuição horizontal e vertical da climatologia tridimensional de temperatura, do EXP1. O campo horizontal representa a temperatura na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial, e limita-se à profundidade de 200m.

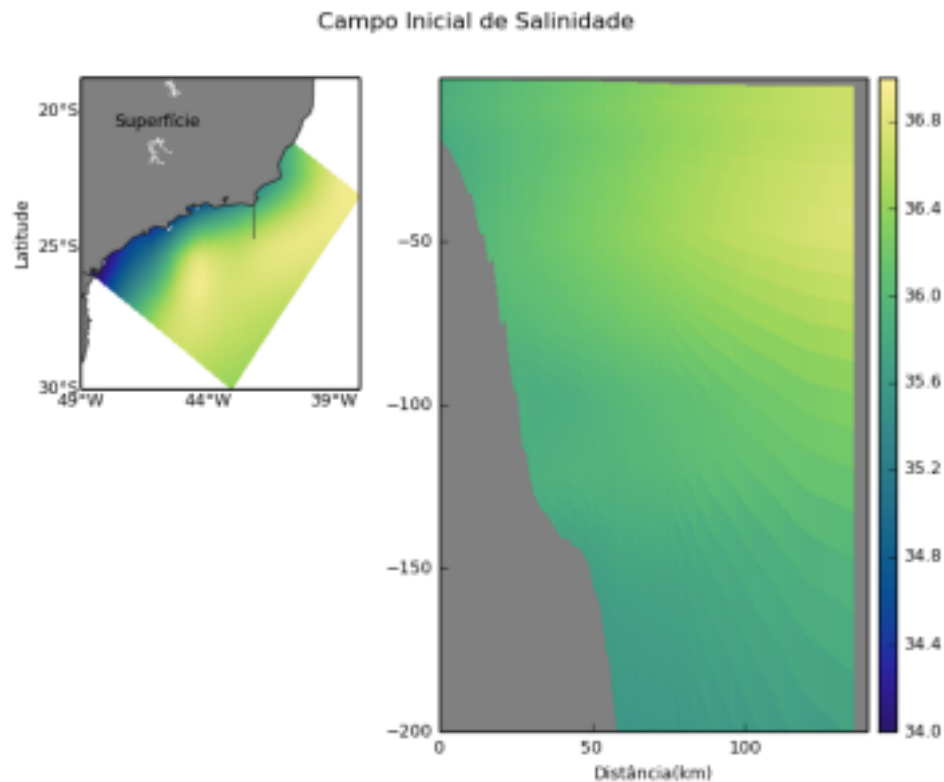


Figura 12. Distribuição horizontal e vertical da climatologia tridimensional de salinidade, do EXP1. O campo horizontal representa a salinidade na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial, e limita-se à profundidade de 200 m.

O campo inicial de temperatura superficial do experimento 2 (EXP2) foi caracterizado por valores entre 20 e 24 °C, próximo a costa e sobre a plataforma interna, e entre 24 e 27 °C. A temperatura superficial e a direção das correntes, evidenciaram a presença de um vórtice ciclônico de mesoescala após a quebra de plataforma na região de CF. O vórtice apresentou um núcleo de águas de 22 °C rodeado por águas relativamente mais quentes de até 26 °C (Figura 13). O campo inicial de velocidade das correntes apresentou velocidades máximas de 0,6 m/s após a quebra de plataforma e foi possível observar uma corrente com fluxo rumo a sul/sudoeste, indicando uma direção de escoamento similar ao da CB. A isoterma de 20 °C, que neste trabalho será utilizada como traçador da ACAS, estava posicionada entre 20 e 30 m de profundidade próximo a costa, e entre 50 e 110 m após 25 km de distância da costa.

Campo Inicial de Temperatura

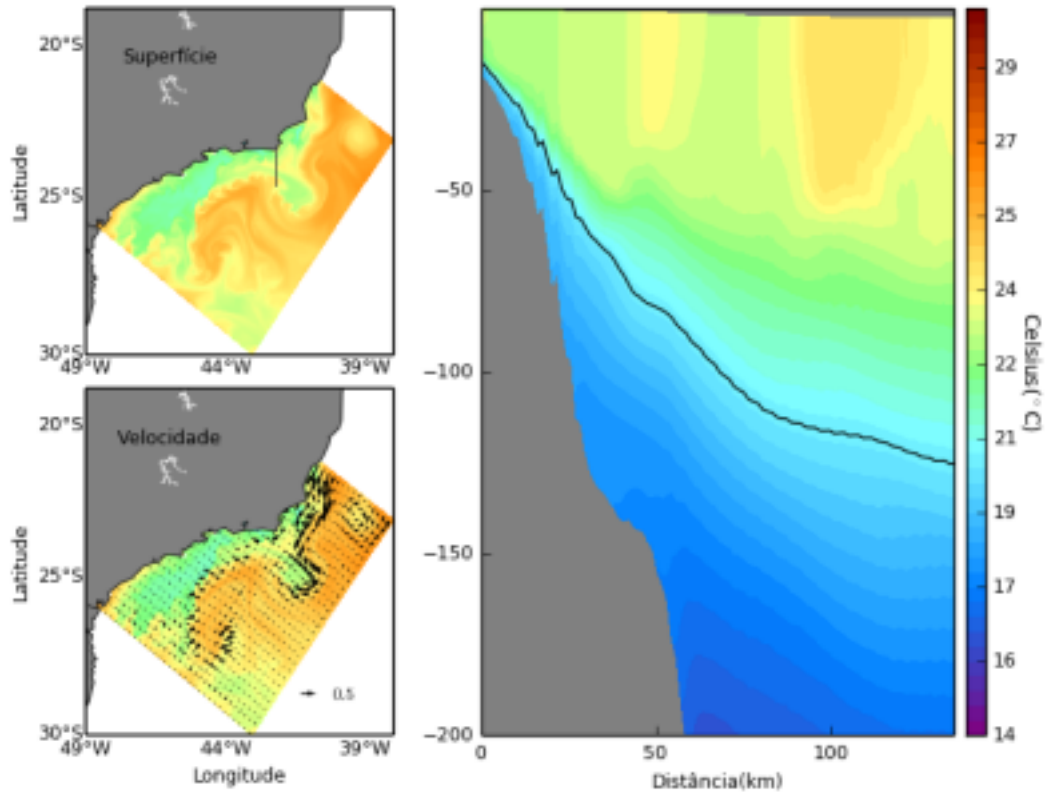


Figura 13. Distribuição horizontal e vertical da temperatura correspondente ao dia 270 do experimento 1, usado como campo inicial do experimento 2.

Os valores de salinidade na superfície, no campo inicial do EXP2, variaram de 33,7 a 36,5 (Figura 14). Verticalmente, os valores mais elevados de salinidade se concentraram acima da profundidade de 100 m.

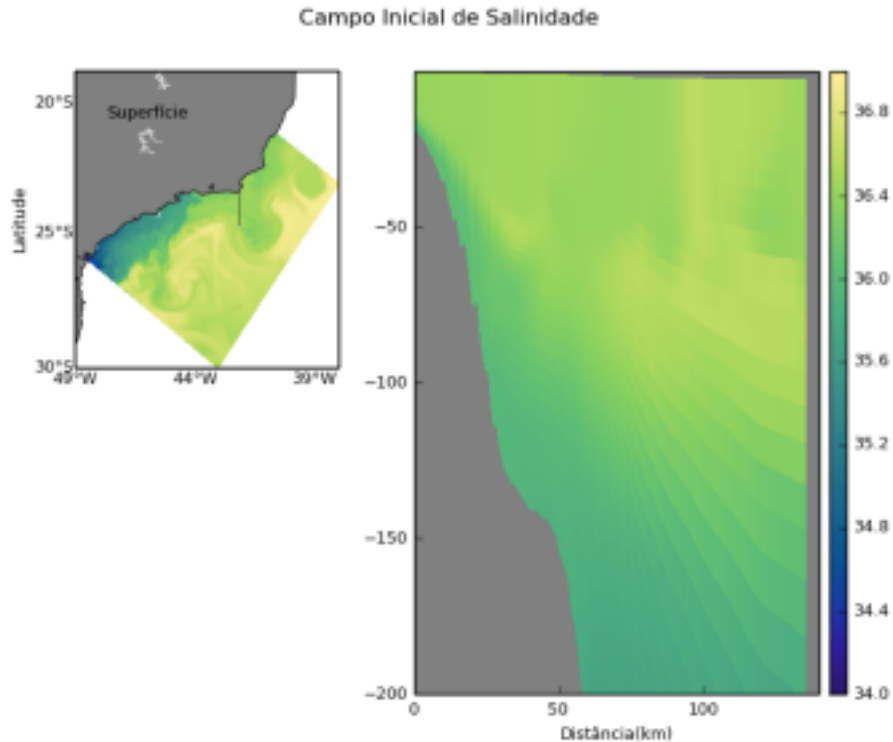


Figura 14. Distribuição horizontal e vertical da salinidade correspondente ao dia 270 e ao campo inicial do EXP2. O campo horizontal representa a salinidade na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial e limita-se à profundidade de 200 m.

O acoplamento dos modelos biológico e físico é direto. O passo de tempo do modelo físico é mais do que suficiente para resolver os processos biológicos e os traçadores biológicos são advectados e difundidos em sincronia com os campos de temperatura e salinidade, por algoritmos idênticos (POWELL, *et al.*, 2006).

Os campos iniciais das variáveis do modelo biogeoquímico, como por exemplo a abundância inicial do fitoplâncton e a concentração inicial de nitrato, a taxa de pastagem zooplancônica e a quantidade de detritos, foram determinados a partir da literatura disponível sobre a região de Cabo Frio (VALENTIN e COUTINHO, 1990; VALENTIN, 2001; CIOTTI *et al.*, 2007), sendo todos os campos biológicos construídos a partir de intervalos de temperatura provenientes dos resultados de saída do modelo de circulação.

O campo para concentração de nitrato foi computado de acordo com intervalos de temperatura e concentrações de nitrato, encontrados no trabalho de VALENTIN e COUTINHO (1990). Os intervalos de temperatura utilizados foram: menor ou igual a 14

°C; maior que 14 °C e menor e igual a 16 °C; maior que 16 °C e menor ou igual a 18 °C; maior que 18 °C e menor ou igual a 20 °C; e maior que 20 °C, sendo as concentrações de nitrato distribuídas nesta ordem de intervalos iguais a 12 mmol-N/m³, 10 mmol-N/m³, 5 mmol-N/m³, 4,5 mmol-N/m³ e 0,48 mmol-N/m³. Com isso, a concentração de nitrato em superfície, do campo inicial do EXP2, apresentou distribuição uniforme com valores máximos de 0,48 mmol-N/m³, associadas com temperaturas superficiais maiores que 20 °C. Verticalmente, as concentrações de nitrato eram de aproximadamente 0,4 mmol N/m³ até 150 m de profundidade, a partir da quebra de plataforma. Na quebra de plataforma, até 100 km do início da seção traçada, as concentrações de nitrato atingiram valores entre 2 mmol-N/m³ e 5 mmol-N/m³. Após 200 m de profundidade, as concentrações de nitrato aumentavam gradativamente em função do aumento da profundidade e da presença de águas com temperaturas entre 5 °C e 19 °C, e atingiram a concentração máxima de 12 mmol-N/m³ a 800 m de profundidade (Figura

15).

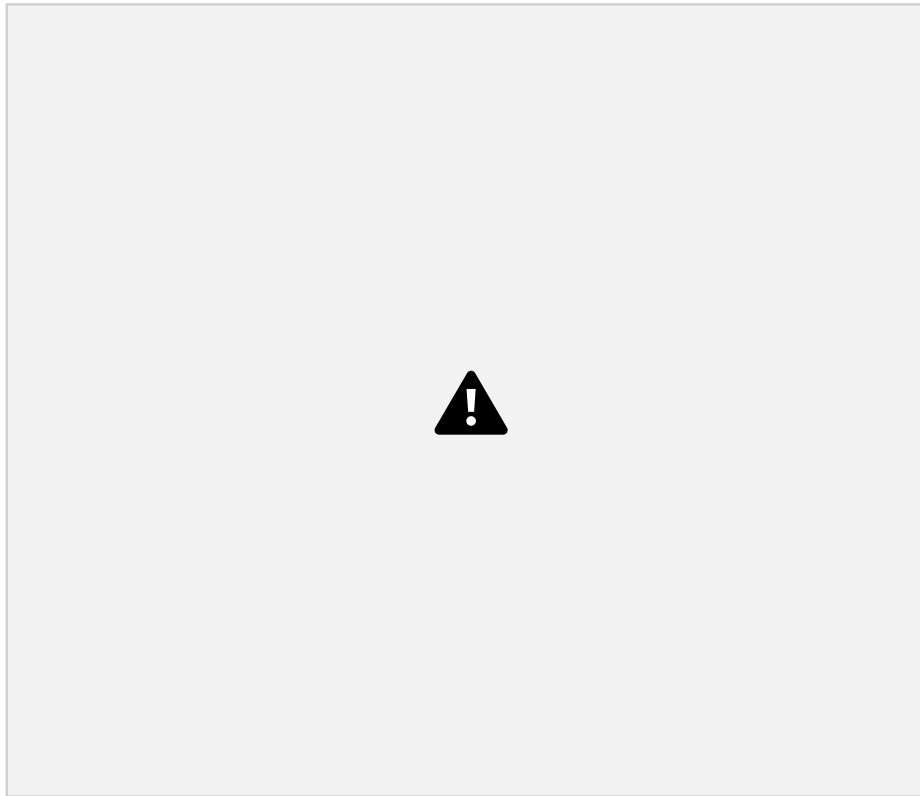


Figura 15. Distribuição horizontal e vertical do campo inicial da concentração de nitrato em mmol-N/m^3 , do EXP2. O campo horizontal representa a concentração de nitrato na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial, e limita-se à profundidade de 200 m.

45

O campo de fitoplâncton foi construído com base em valores de clorofila-*a* encontrados na literatura (VALENTIN e COUTINHO, 1990; CIOTTI *et al.*, 2007). Foi necessário usar um fator de conversão de clorofila para carbono (Chl/C) de 50, descrito por ARÍSTEGUI *et al.* (2004), em um trabalho para filamentos de ressurgência costeira no noroeste da África. Posteriormente, estes valores foram transformados de carbono para gramas de nitrogênio e, finalmente, em mmol-N/m^3 , usando a razão de Reidfield, onde C:N é igual a 6,625 (mmol-C/mmol-N). Para a criação do campo inicial de fitoplâncton também foram estabelecidos intervalos de temperatura, sendo eles: menor que 16°C , entre 16°C e 18°C , entre 18°C e 20°C e maior que 20°C , sendo as concentrações de clorofila-*a* em cada intervalo iguais a $0,04\ \mu\text{g/L}$ (CIOTTI *et al.*, 2007), $0,5\ \mu\text{g/L}$ (VALENTIN e COUTINHO, 1990), $1,51\ \mu\text{g/L}$ (CIOTTI *et al.*, 2007) e $0,5\ \mu\text{g/L}$ (VALENTIN e COUTINHO, 1990), respectivamente. Estes valores correspondem a $0,02\ \text{mmol-N/m}^3$, $0,26\ \text{mmol-N/m}^3$, $1,51\ \text{mmol-N/m}^3$ e $0,26\ \text{mmol-N/m}^3$. O campo inicial de

fitoplâncton no experimento 2 registrou valores que variaram de 0,5 mmol-N/m³ e 1,51 mmol-N/m³ entre a superfície e 150 m de profundidade. Abaixo de 150 m, ocorreram concentrações entre 0,02 e 0,26 mmol-N/m³ (Figura 16).

46

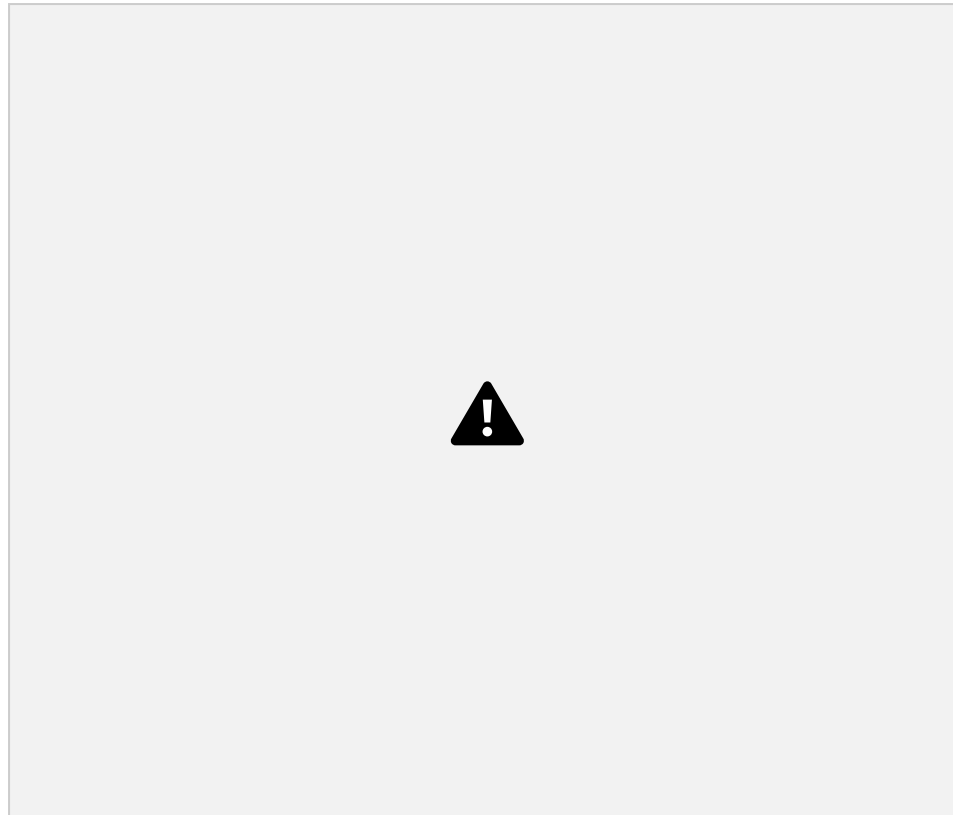


Figura 16. Distribuição horizontal e vertical do campo inicial da concentração de fitoplâncton em mmol N/m³, do EXP2. O campo horizontal representa a concentração de fitoplâncton na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial, e limita-se à profundidade de 200 m.

O campo de zooplâncton foi construído a partir de dados disponíveis para a região, sendo os intervalos de temperatura: menor do que 16 °C, entre 16 °C e 18 °C e maior que 18 °C. As abundâncias para os dois últimos intervalos de temperatura – 220 mg/m³ e 66 mg/m³ – foram retiradas de VALENTIN (2001) e precisaram ser transformadas de mg/m³ para mmol-N/m³. Para tanto, foram transformadas em miligramas de nitrogênio por um fator de conversão equivalente a 0,1, ou seja, assumindo-se que 10% da biomassa seca é composta por nitrogênio (HARRIS *et al.*, 2000). Devido à ausência de dados de abundância de zooplâncton para águas com temperaturas menores do que 16 °C, optou-se por escolher o valor de 0,01 mmol-N/m³

para representar este intervalo, sendo este uma ordem de grandeza abaixo do valor referente à abundância de zooplâncton em superfície (20 °C). Assim, os intervalos de temperatura foram preenchidos com as seguintes abundâncias de zooplâncton: 0,01

47

mmol-N/m³, 1,57 mmol-N/m³ (VALENTIN, 2001) e 0,47 mmol-N/m³ (VALENTIN, 2001), seguindo a ordem dos intervalos apresentada anteriormente.

Com a ausência de dados de quantidade de detritos, estes foram determinados usando-se os mesmos intervalos e valores de abundância escolhidos para o campo de zooplâncton, uma vez que o próprio modelo criado por (POWELL et. al, 2006) considera um mesmo valor para ambos. O campo inicial de detritos, portanto, foi criado com valores iguais ao campo de zooplâncton.

Os campos iniciais de zooplâncton (Figura 17) e detritos (Figura 18) do EXP2 apresentaram valores homogêneos na camada superficial (0,47 mmol-N/m³) a partir de 100 km, até a profundidade máxima de 150 m. Após esta profundidade, registraram valores de 1,57 mmol-N/m³ até 200 m. A partir de 200 m as concentrações foram de 0,01 mmol-N/m³.

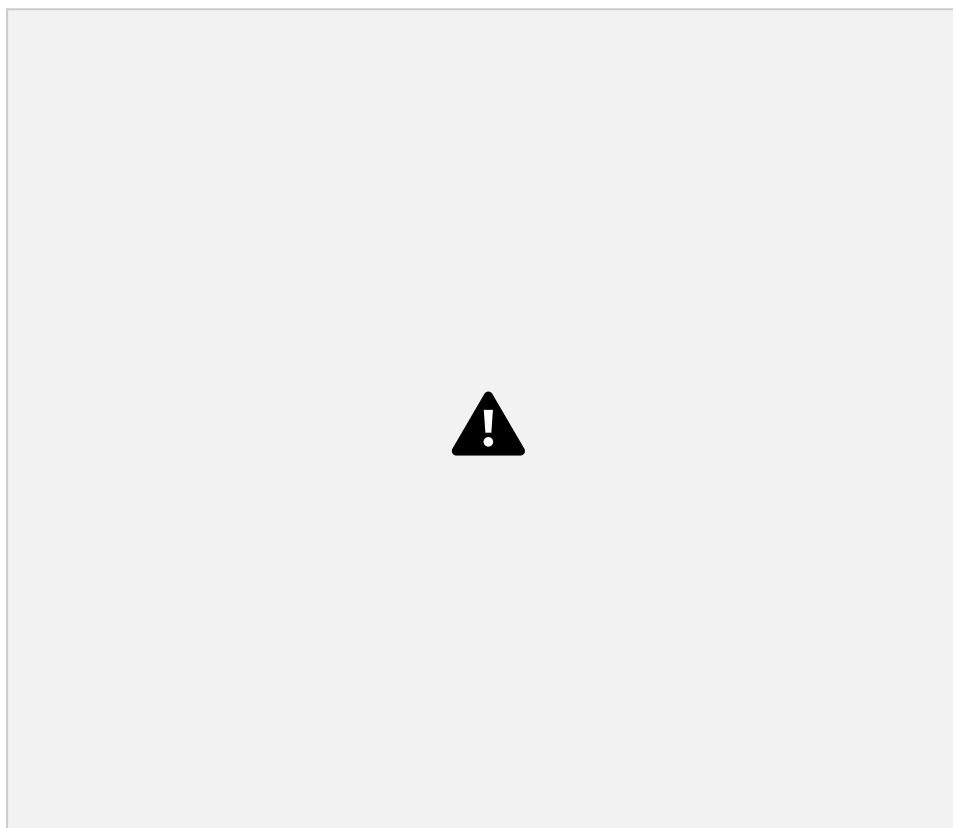


Figura 17. Distribuição horizontal e vertical do campo inicial da concentração de zooplâncton em mmol

N/m^3 , do EXP2. O campo horizontal representa a concentração de zooplâncton na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial, e limita-se à profundidade de 200 m.

48

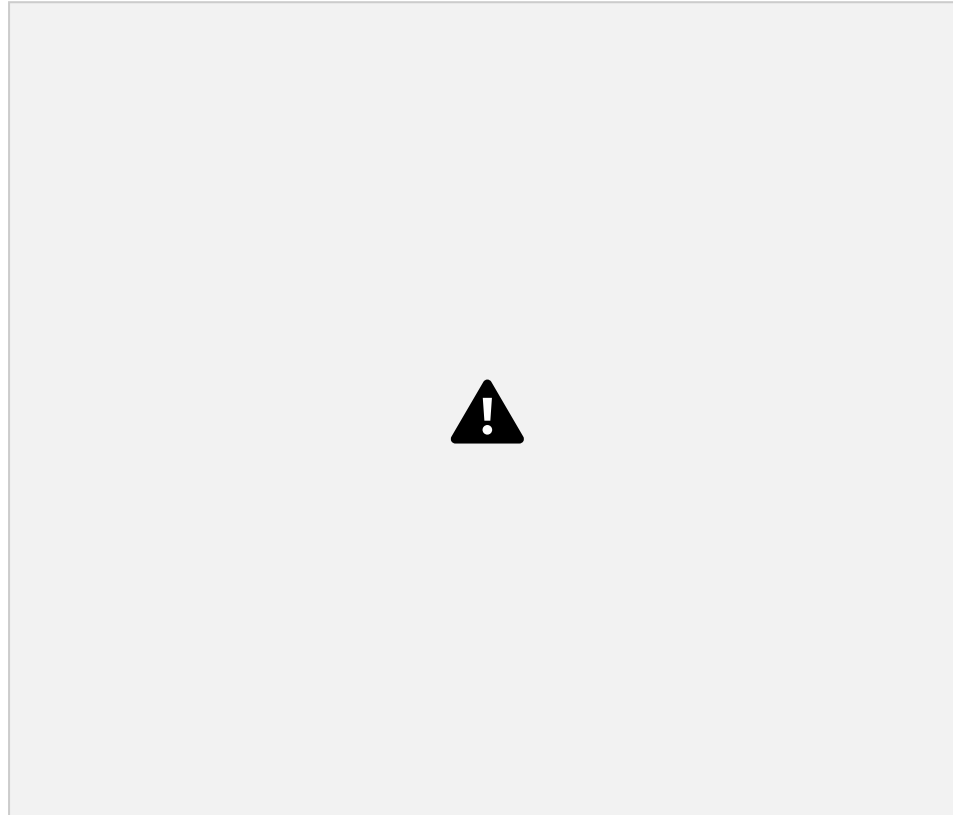


Figura 18. Distribuição horizontal e vertical de detritos em $mmol-N/m^3$ correspondente ao dia 270 e ao campo inicial do EXP2. O campo horizontal representa a concentração de detritos na superfície. O campo vertical representa a disposição da variável no recorte da grade exemplificada pela radial, e limita-se à profundidade de 200 m.

3.6.1 Padrão de vento

No EXP2, o modelo foi forçado por 60 dias com vento dos meses de janeiro e fevereiro retirados do conjunto de dados do campo de vento inicial (Figura 19). Com isso, entre os dias 34 e 45 da rodada, houve predomínio destes quadrantes de vento, com intensidades variando entre 2 m/s e 9 m/s (Figura 20). A partir do dia 46, ocorreu uma inversão do vento com a chegada de uma frente de quadrante S/SO, com intensidades de vento entre 1,5 e 6 m/s.

49

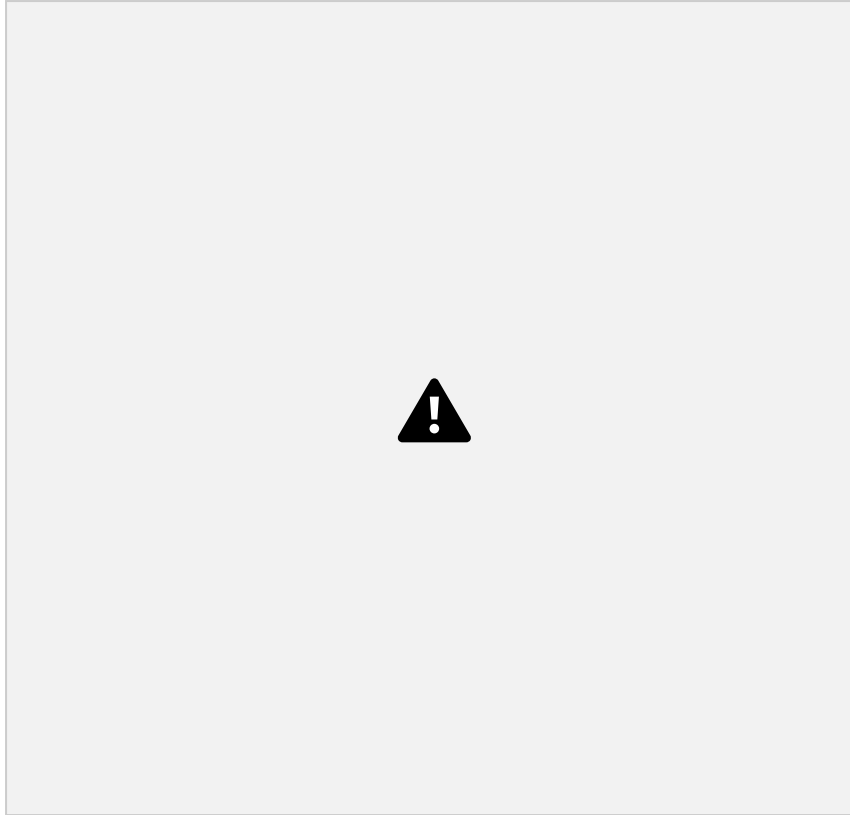


Figura 19. Rosa dos ventos dos meses de janeiro e fevereiro do campo de forçante de vento inicial. Evidencia-se a predominância de ventos provenientes de NE, os quais são favoráveis à ocorrência de RC. As cores correspondem à intensidade do vento em m/s e os valores à frequência de ocorrência destas intensidades em porcentagem.

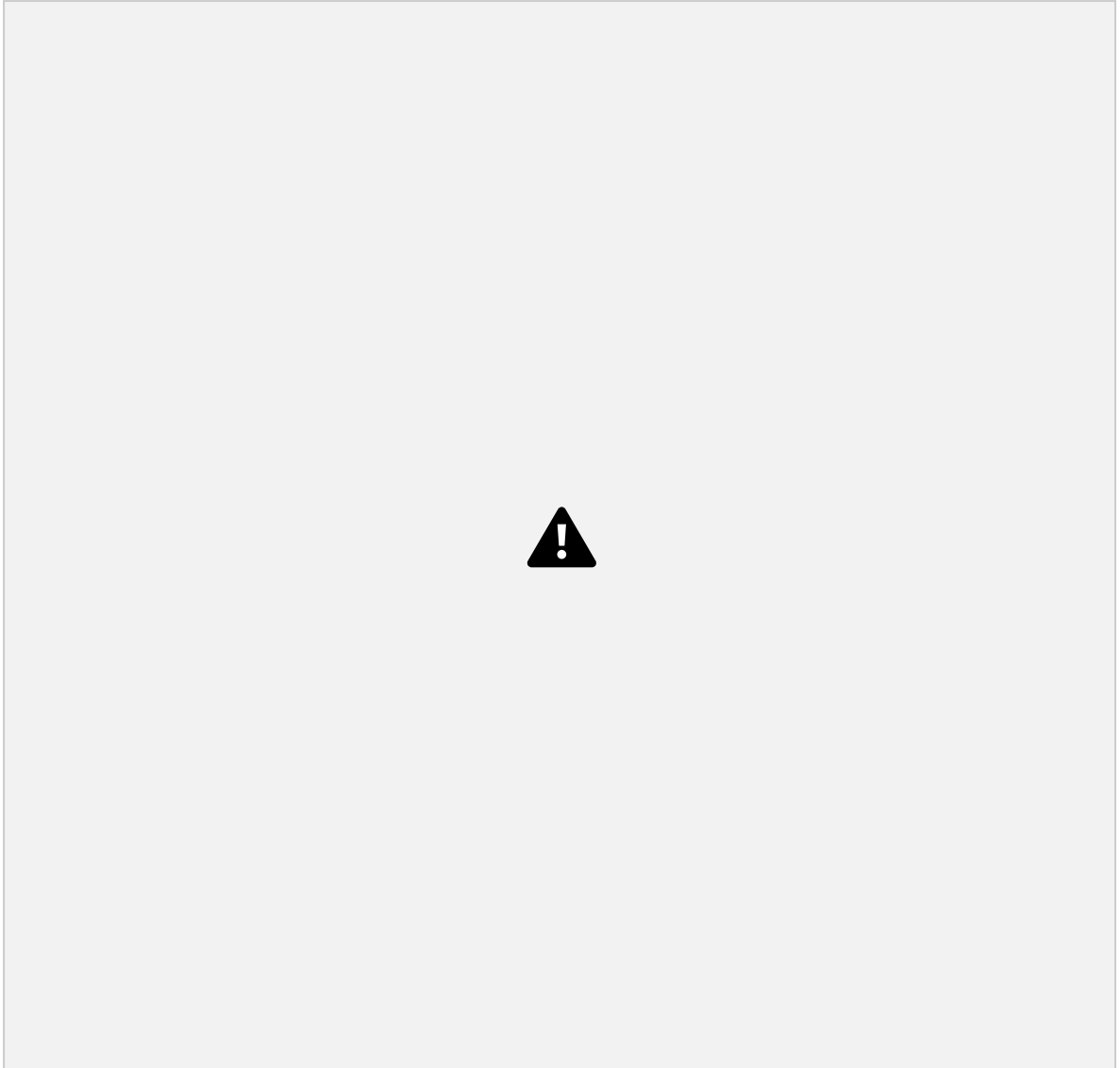


Figura 20. Distribuição ao longo do domínio computacional, da intensidade do vento em m/s, durante o EXP2.

3.7 COMPARAÇÃO DOS DADOS *IN SITU* COM AS SIMULAÇÕES DO MODELO

Os resultados das simulações numéricas do modelo foram comparados com dados de sensoriamento remoto e de medições *in situ*.

Medições *in situ* de temperatura e fluorescência foram comparadas com dados de perfil vertical de fitoplâncton e temperatura do modelo. Estas medições são provenientes do cruzeiro oceanográfico INCT-01, na região offshore de Cabo Frio, relacionados com o projeto INCT-PROOCEANO.

O primeiro cruzeiro (INCT01) foi realizado em abril de 2014 e pertencia ao EIXO TEMÁTICO 1 do referido projeto. Este eixo está relacionado com o estudo da interação entre a região costeira e oceânica da região de Cabo Frio. O cruzeiro INCT01 foi coordenado pelo Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) e realizado a bordo do Aviso de Pesquisa Aspirante Moura, da Marinha do Brasil. Foi executado ao longo de uma seção transversal à costa da região de Cabo Frio, sendo esta seção repetida 4 vezes. As estações de coleta foram distribuídas no transecto, com um espaçamento a fim de garantir uma alta resolução espacial e temporal dos dados (Figura 21).

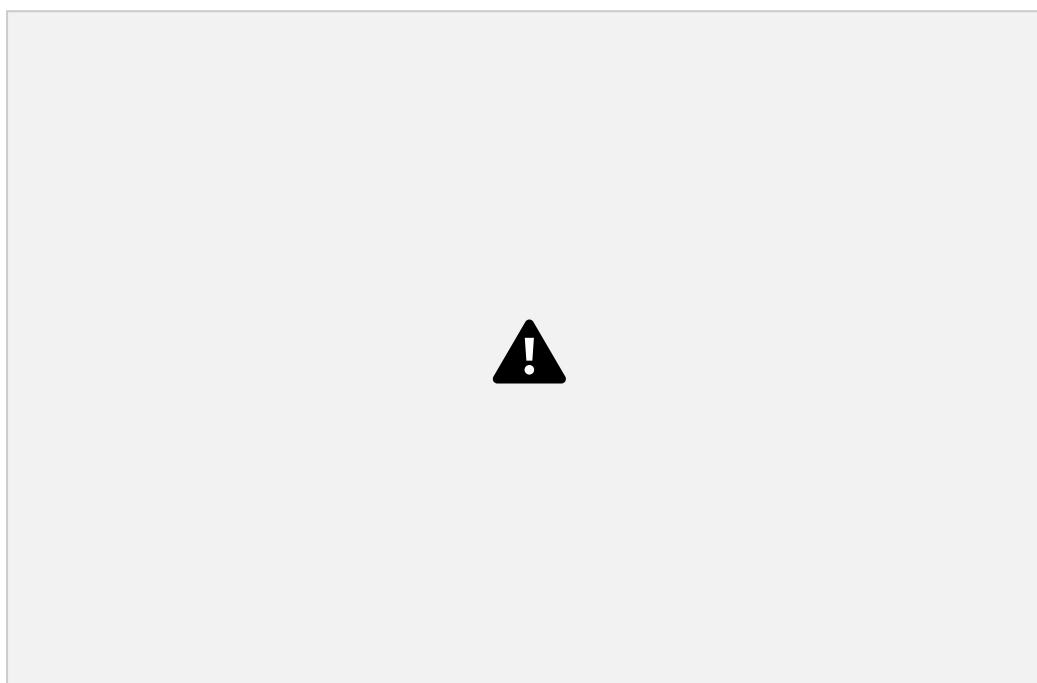


Figura 21. Locais de amostragens realizadas no cruzeiro INCT-01. Os locais onde os dados foram obtidos com o equipamento Conductivity Temperature Depth (CTD) estão representados pelos triângulos vermelhos.

Os dados de temperatura, salinidade e fluorescência foram coletados com auxílio de um Conductivity Temperature Depth (CTD), em um total de 8 pontos amostrais.

Os dados de temperatura e fluorescência obtidos no cruzeiro foram filtrados, com o intuito de minimizar os ruídos, a partir do método média móvel e o

estabelecimento de janelas. As janelas são intervalos entre medições consecutivas do instrumento utilizado para a coleta de dados. O método da média móvel calcula uma média ponderada para cada valor a partir de valores adjacentes. Os tamanhos das janelas foram determinados de acordo com a profundidade: 3 em profundidades menores que 100 m, 11 de 100 m a 500 m, e 21 em profundidades acima de 500 m (Figura 22). Esta diferença no tamanho das janelas relaciona-se com a região de interesse a ser estudada. Os dados foram interpolados, posteriormente, através do método linear para a criação de perfis verticais integrados. O intuito era o de se concentrar em regiões de subsuperfície e superfície (profundidades menores do que 100 m), as quais registram a ocorrência de fitoplâncton e são caracterizadas pela mudança rápida das propriedades verticalmente. Desta forma, não foi escolhida uma janela muito grande para esta região, para que não fosse comprometida a realidade dos dados.

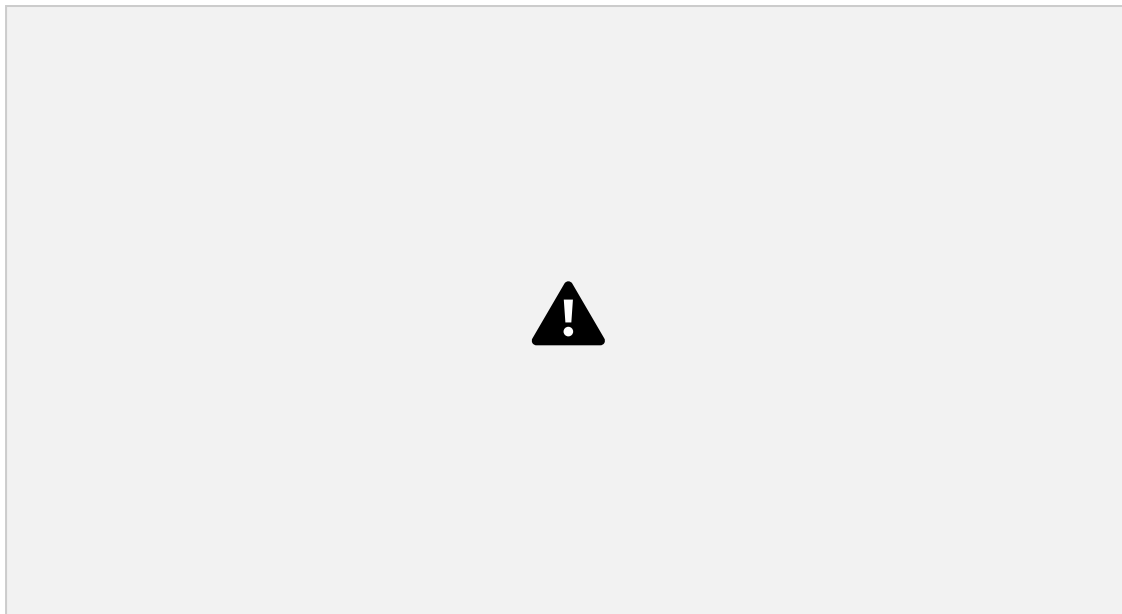


Figura 22. Perfis verticais de temperatura e fluorescência correspondentes a seção 2 do cruzeiro INCT01. As linhas pretas representam o dado real e as vermelhas os dados após a aplicação do método de janela móvel.

3.8 ESTABILIDADE DOS MODELOS

Seguindo o procedimento de estabilização da energia do modelo descrito na seção 2.3, no EXP1 com duração de 360 dias, o modelo estabilizou a partir do dia de

simulação 60 e a energia cinética média oscilou dentro de um intervalo de $1,5 \times 10^{-3} \text{ J m}^{-2}$ a $2,0 \times 10^{-3} \text{ J m}^{-2}$ (Figura 23). O EXP2, que evoluiu por 60 dias, manteve o padrão de estabilidade do EXP1, e a energia cinética permaneceu estável até o final de ambos os experimentos, com valores que se mantiveram em aproximadamente $2,0 \times 10^{-3} \text{ J m}^{-2}$.

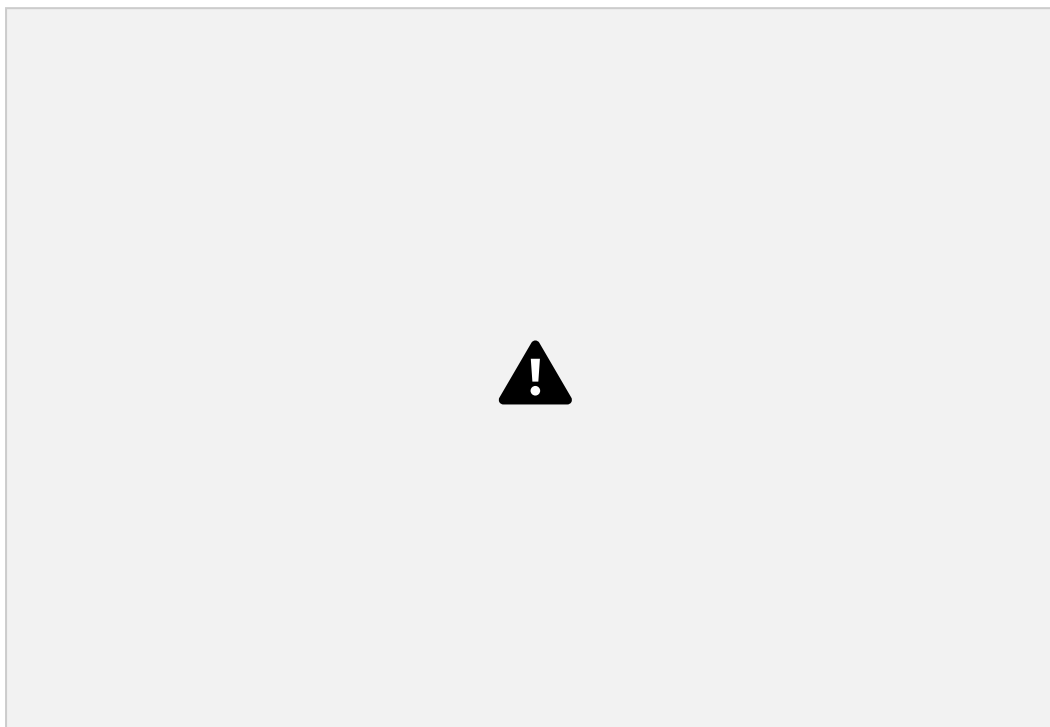


Figura 23: Evolução temporal da energia cinética média ao longo do domínio computacional durante os experimentos 1 e 2.

4 RESULTADOS

4.1 CAMPOS HORIZONTAIS – TEMPERATURA, DIREÇÃO E VELOCIDADE DE CORRENTE

No dia 34, ocorreram temperaturas entre 21 e 22 °C na costa adjacente a Cabo Frio (Figura 24). A corrente costeira, nessa mesma região seguiu um fluxo no rumo L–O, em direção a Saquarema e Rio de Janeiro. A temperatura superficial, a 50 km de distância da costa, apresentou valores de 23 °C e adjacente a quebra de plataforma, ocorreram águas com temperatura entre 25 e 27 °C. A circulação adjacente a quebra de

plataforma apresentou um fluxo rumo a sul / sudoeste. Foi possível observar um vórtice ciclônico (com rotação no sentido horário) de mesoescala após a isóbata de 1000 m, no sul da grade. A direção e intensidade do vórtice e das correntes superficiais, após a isóbata de 1000 m, permaneceu sem grandes alterações ao longo dos dias escolhidos na simulação.

Com a permanência dos ventos de NE que atuaram na região de interesse, as águas superficiais próximo a costa de Cabo Frio começaram a esfriar, a partir do dia 36 até o dia 44, e a temperatura na costa de Cabo Frio atingiu valores muito próximos dos 20 °C. A corrente costeira permaneceu fluindo na direção oeste/sudoeste, e as águas mais frias ultrapassaram Saquarema, se espalhando pela maioria da extensão da Região dos Lagos. A distribuição da temperatura superficial, após a quebra de plataforma, permaneceu sem grandes alterações durante todos os dias escolhidos da simulação.

Entre os dias 44 e 46, ocorreram as menores temperaturas superficiais próximo a costa (um pouco acima dos 20 °C) e também uma maior dispersão dessas águas relativamente mais frias ao longo da costa da Região dos Lagos. Além disso, ocorreu uma maior dispersão de águas mais frias em direção ao mar aberto, chegando próximo a altura da isóbata dos 200 m (aproximadamente 30 – 40 km da costa).

A partir do dia 46 da simulação, o campo de temperatura ainda apresentou águas relativamente frias na região costeira. A corrente costeira começou a desacelerar, e já é possível observar uma intensificação nos vetores de velocidade no oeste da grade, que seguiram um fluxo no sentido oeste.

55

No dia 48, observou-se a chegada de águas com temperatura acima de 22 °C na região de CF e uma diminuição da dispersão de águas com temperatura próxima dos 20 °C ao longo da costa e em direção ao mar aberto. Essas águas mais frias se concentraram próximas a Arraial do Cabo entre os dias 48 e 50. A corrente costeira se inverteu na região de Cabo Frio, fluindo rumo a leste. No dia 50, águas com temperaturas entre 21 e 22 °C invadem a região de interesse, com exceção de um pequeno núcleo próximo a Arraial do Cabo, e a corrente costeira rumo a leste se intensificou, cobrindo toda a região de Cabo Frio e adjacências.

56

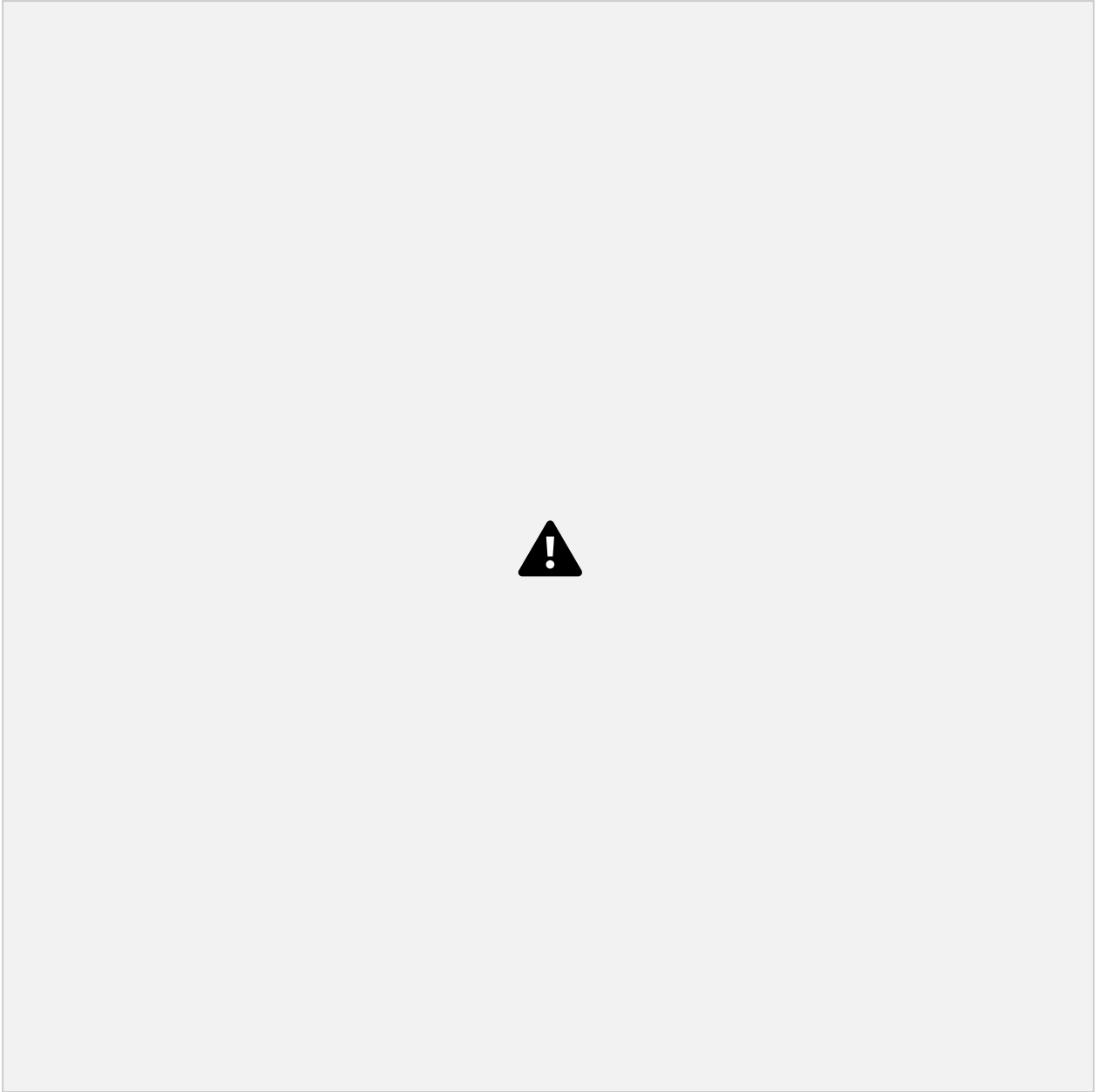


Figura 24. Campos horizontais de temperatura e velocidade das correntes superficiais para os dias escolhidos no EXP2. As isolinhas representam as isóbatas de 200 e 1000 m, respectivamente.

4.2 CAMPOS HORIZONTAIS DE FITOPLÂNCTON (P)

Os campos horizontais de concentração de fitoplâncton evidenciaram uma floração visível em superfície a partir do dia 42, com valores entre 1 e 2 mmol-N/m³, próximo a costa, na região de Cabo Frio (Figura 25). A partir do dia 44, até o dia 48, ocorreu uma maior dispersão de P, com valores de até 2 mmol-N/m³ que circundaram

um núcleo de produção mais alta ($>2,1 \text{ mmol-N/m}^3$), que se estendeu desde Arraial do Cabo até Saquarema. Acompanhando o aumento na produção próximo a costa, também ocorreu, entre os dias 40 e 48, um aumento na produção em mar aberto. Um filamento, com valores de P entre 0,8 e 1 mmol-N/m^3 , se estendeu desde a área de maior produção (área costeira) até a quebra de plataforma, a sul/sudoeste da região de CF.

A partir do dia 48 de simulação, começou a ocorrer um decréscimo nos valores de P, assim como em sua dispersão ao longo da grade de estudo. No dia 50, já não foi possível observar valores de $0,8 \text{ mmol-N/m}^3$ próximo a costa de CF, com exceção de um pequeno núcleo próximo a Arraial do Cabo. Durante todos os dias escolhidos da simulação, após a quebra de plataforma, ocorreram apenas valores de até 1 mmol N/m^3 , relacionados a área de atividade do vórtice ciclônico presente no experimento.

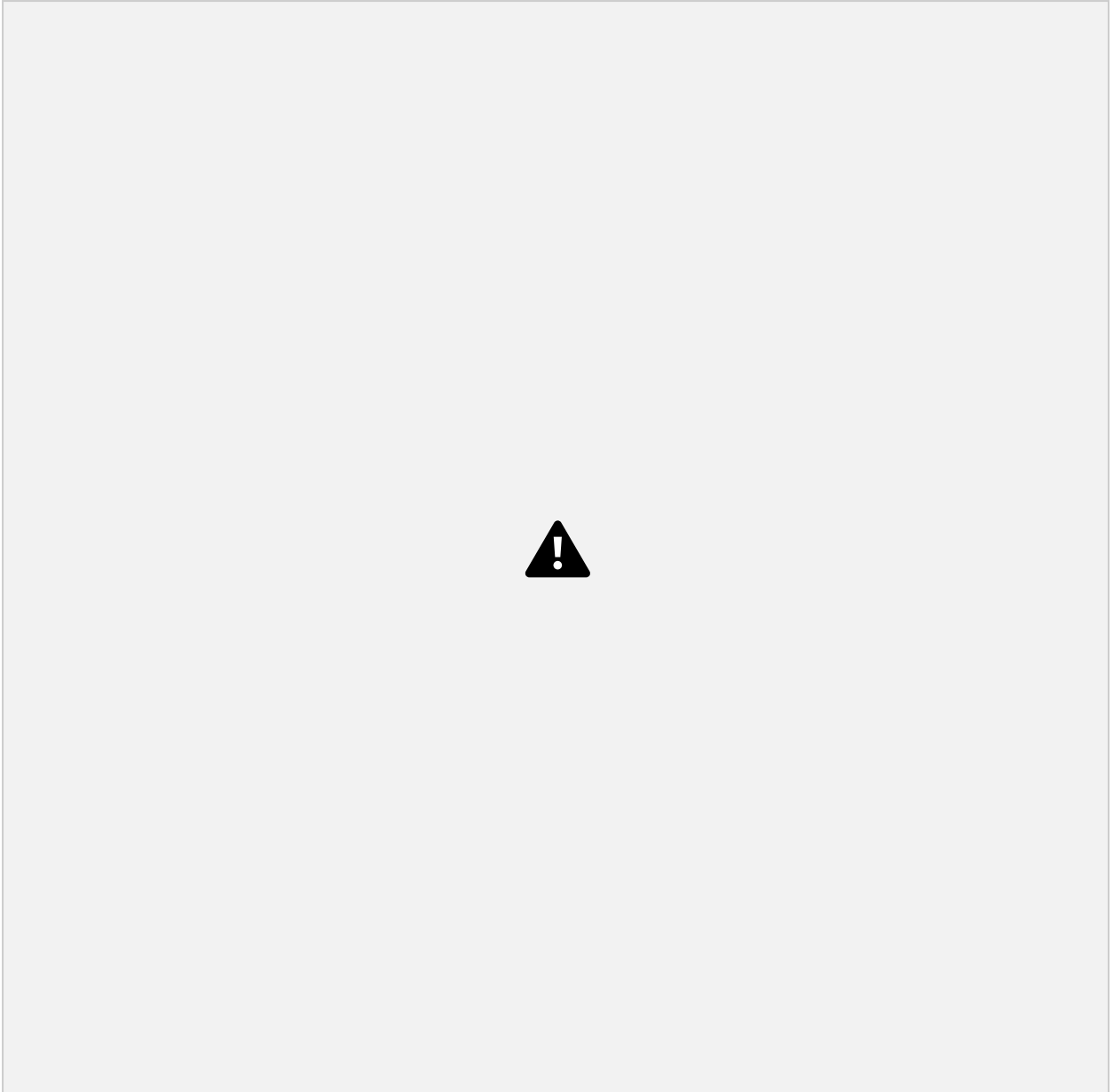


Figura 25. Campos horizontais de fitoplâncton ao longo do domínio. As isolinhas em preto representam as isóbatas de 200 e 1000 m, respectivamente.

4.3 SEÇÕES VERTICAIS DE TEMPERATURA, SALINIDADE, VELOCIDADE DE CORRENTE, NITRATO (N), FITOPLÂNCTON (P), ZOOPLÂNCTON (Z) E DETRITOS (D)

Dois transectos (Figura 26) foram traçados para avaliar a distribuição das variáveis físicas e biológicas do modelo. O transecto 1 (T1) foi traçado na região

adjacente a de Arraial do Cabo, um dos primeiros pontos onde a ACAS ressurge em superfície.

O transecto 2 (T2) foi traçado em Saquarema, local onde ocorreram os máximos de abundância de fitoplâncton observados nos campos horizontais do modelo.

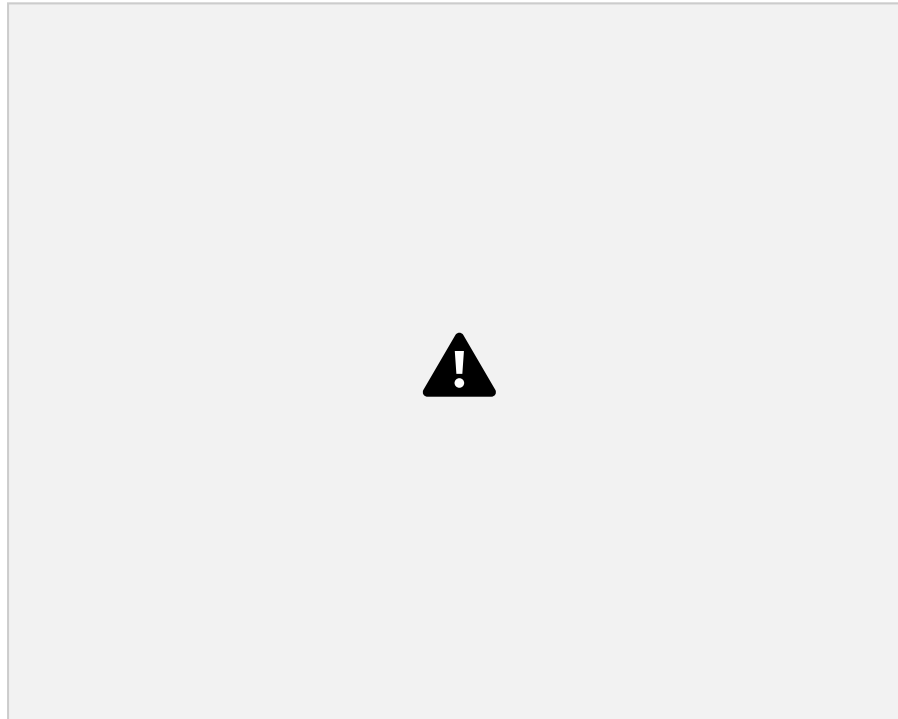


Figura 26. Transectos traçados ao longo da região de Cabo Frio. O transecto 1 (T1), em vermelho, foi posicionado em Arraial do Cabo, e o transecto 2 (T2), em preto, nas proximidades de Saquarema. As isolinhas em preto representam as isóbatas de 200 e 1000 m, respectivamente.

4.3.1 Seção vertical de temperatura, salinidade e velocidade de corrente ao longo do EXP2 – Transecto 1 (Arraial do Cabo)

Na seção vertical de temperatura do T1 (Figura 27), entre os dias 34 e 38 da simulação, a isoterma de 20 °C permaneceu em torno dos 50 m de profundidade. A temperatura na superfície ficou entre 22 e 21 °C, e a salinidade na costa permaneceu em 36,1. Em águas mais afastadas da costa, a temperatura atingiu até 24 °C e a salinidade superficial foi apresentou valores mais elevados do que na costa (36,8).

Os campos de velocidade zonal evidenciaram uma intensificação da corrente

costeira em toda a coluna d'água sobre a plataforma continental (até 50 – 60 km do início da seção), com escoamento no sentido oeste e velocidade de até 0,3 m/s desde a superfície até 50 m de profundidade, e uma contra-corrente fluindo no sentido leste, a partir de 75 km até o fim da seção.

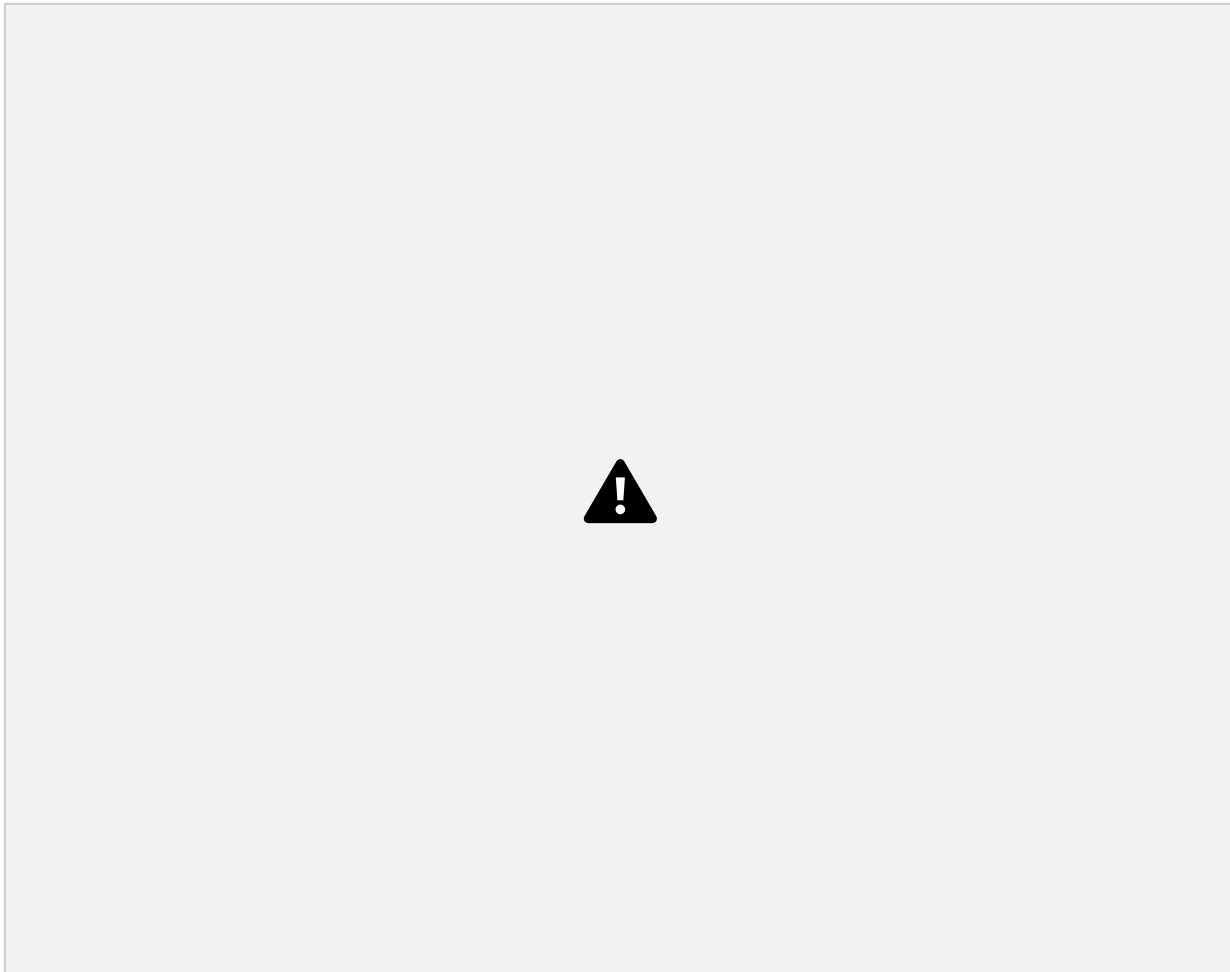


Figura 27. Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades de corrente ao longo dos dias 34 até 38 da simulação, no transecto 1 (Arraial do Cabo). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.

Do dia 40 ao dia 44, observou-se a ascensão da isoterma de referência para aproximadamente 20 – 25 metros de profundidade (Figura 28). A temperatura próxima a superfície se manteve um pouco acima dos 20 °C, e ocorre uma intrusão ainda maior da isoterma de referência na plataforma continental interna.

A salinidade na costa, até os 50 m de profundidade, permaneceu em torno de 35,8 – 36,1, e no oceano aberto ficou próxima a 36,8. Os dados de velocidade zonal

indicaram uma corrente no sentido oeste próximo a costa, e uma corrente no sentido contrário a partir dos 75 km do início da seção.

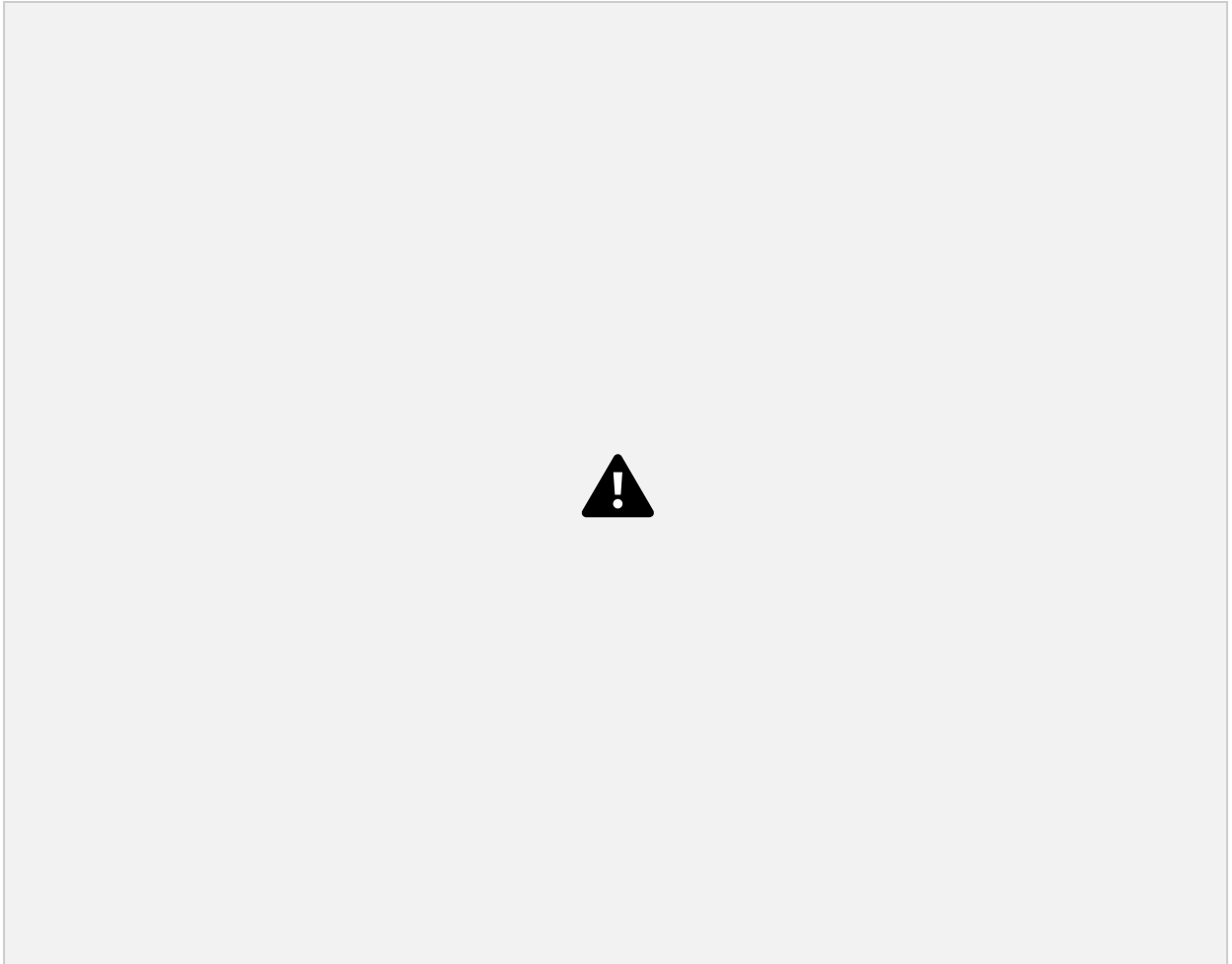


Figura 28. Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades de corrente ao longo dos dias 40 até 44 da simulação, no transecto 1 (Arraial do Cabo). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.

Com o relaxamento do vento NE, e posterior entrada dos ventos de quadrante S, a partir do dia 46 da simulação, a isoterma de referência decaiu rapidamente dos 50 m de profundidade no dia 46, para profundidades abaixo de 100 m já no dia 48, atingindo um máximo de profundidade no dia 50 da simulação (120 m).

A temperatura superficial na costa aumentou para 21 - 22 °C, da superfície até os 50 – 75 m de profundidade, com exceção de uma pequena faixa próxima a costa

onde ainda foi possível observar temperaturas próximas dos 20 °C, no dia 50. A partir dos 50 km da seção, águas com temperatura entre 22 e 24 °C ocorreram da superfície até 100 m de profundidade (Figura 29). A salinidade permaneceu entre 36,1 – 36,4 na região costeira, e próxima a 36,8 a partir de 50 km da seção, até o dia 50. Ocorreu uma inversão da circulação costeira a partir do dia 46 até o dia 50 da simulação, com um fluxo no sentido leste por praticamente toda a plataforma continental interna, até 50 km da seção. Apenas um núcleo de corrente fluindo rumo a oeste ocorre a 50 – 60 km da costa, com velocidade máxima de 0,4 m/s nos primeiros 30 m de coluna d'água.

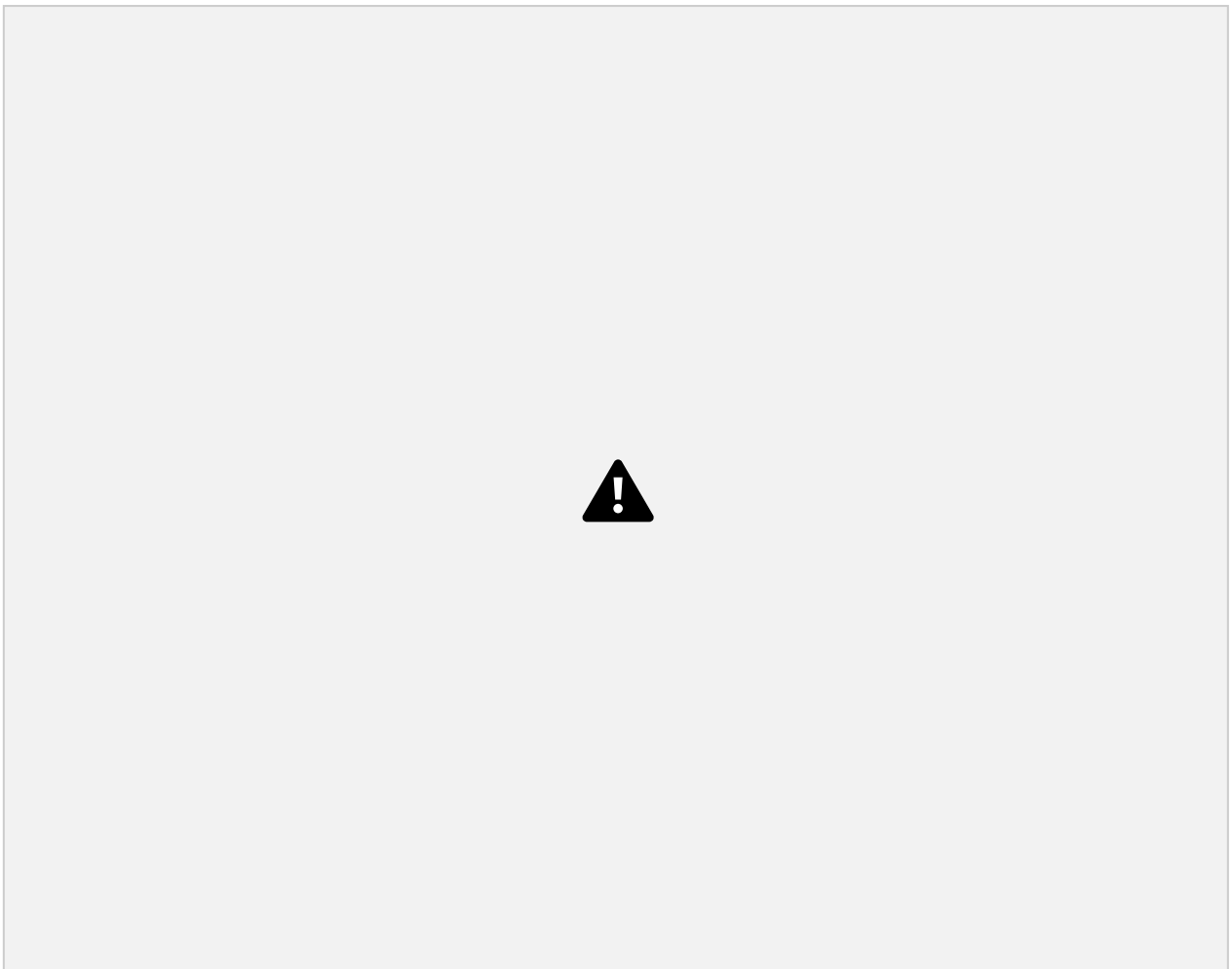


Figura 29. Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades de corrente ao longo dos dias 46 até 50 da simulação, no transecto 1 (Arraial do Cabo). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.

4.3.2 Seções verticais de N, P, Z e D ao longo do EXP2 – Transecto 1 (Arraial do Cabo)

Nos parâmetros biológicos, observou-se a nutriclina, com valores de aproximadamente 8 mmol-N/m^3 de NO_3 , posicionada um pouco abaixo dos 50 m de profundidade no dia 34 da simulação, acompanhando a isoterma de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 30). Nos dias 36 e 38, a nutriclina se posicionou um pouco acima dos 50 m de profundidade, acompanhando a subida da isoterma de referência. Abaixo desta termoclina, as concentrações de NO_3 atingiram até 11 mmol-N/m^3 próximo aos 150 – 200 m de profundidade.

No dia 34, P apresentou valores de aproximadamente $2,5 \text{ mmol-N/m}^3$, entre 50 e 100 m de profundidade, por toda extensão da seção vertical. Em águas mais superficiais, os valores atingiram apenas $0,7 \text{ mmol-N/m}^3$ ao longo de toda a seção. Entre os dias 36 e 38 da simulação, com o início da ascensão da isoterma de referência, ocorreu um aumento na abundância de P, que atingiu valores de até 5 mmol-N/m^3 e se dispersou por uma maior parcela da coluna d'água, ocorrendo entre 35 – 75 m de profundidade, próximo a costa. Esse aumento na abundância também ocorre sobre a plataforma interna, e se estende até próximo a quebra de plataforma, chegando a até 50 km de distância do início da seção. Em superfície, o fitoplâncton atinge máximos de $0,7 \text{ mmol-N/m}^3$ ao longo de toda a seção, entre os dias 36 e 38.

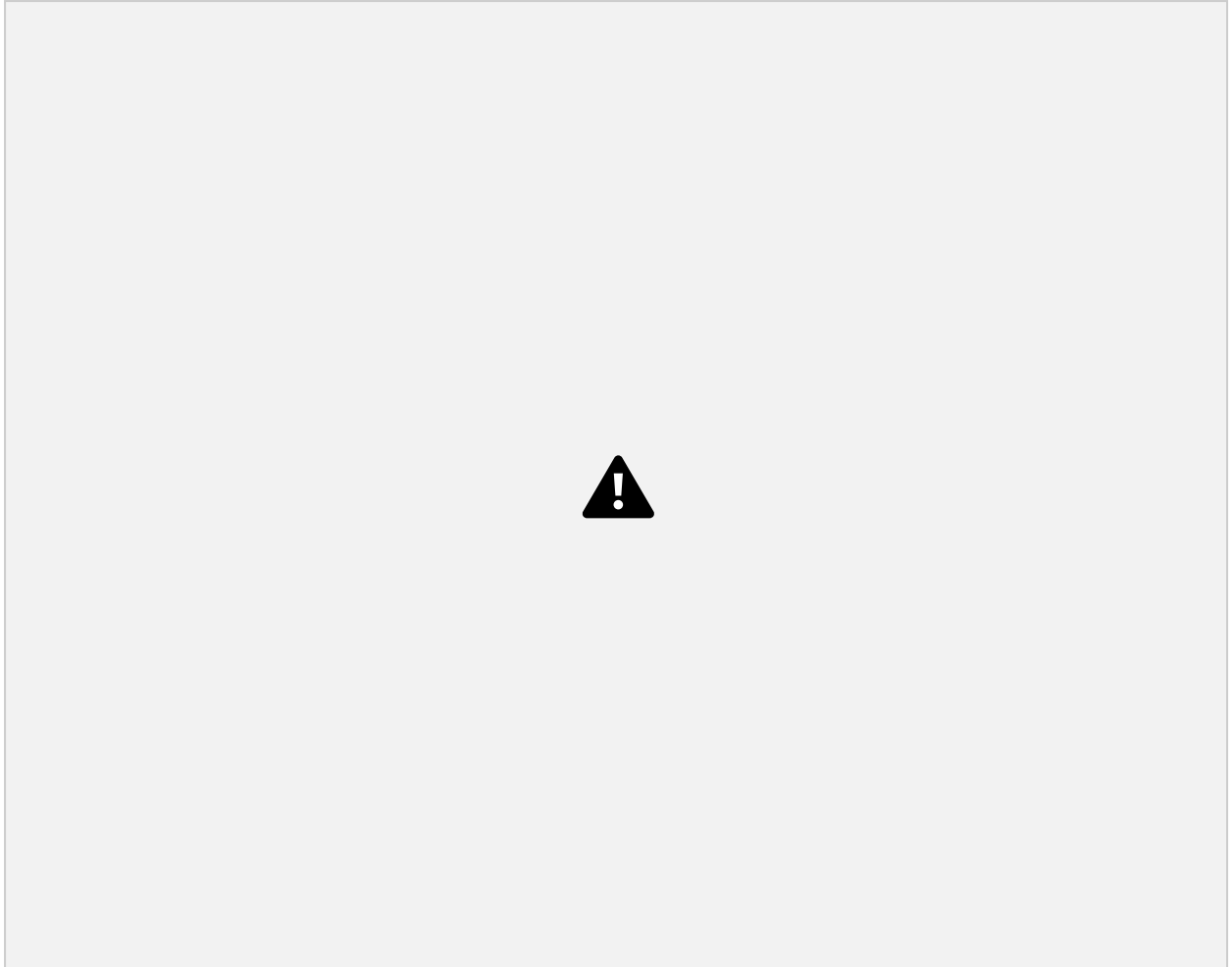


Figura 30. Seções verticais de temperatura, nitrato e fitoplâncton ao longo dos dias 34 até 38, no transecto 1 (Arraial do Cabo). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.

Com a ascensão da isoterma de referência para 20 – 25 m de profundidade, a partir do dia 40, concentrações de NO_3 de até 7 mmol-N/m^3 foram encontradas próximo aos 30 – 40 m de profundidade, até o dia 44. Entre 100 e 200 m de profundidade, ocorreram concentrações que variam de $9 - 11 \text{ mmol-N/m}^3$ ao longo de toda a seção (Figura 31).

Entre os dias 42 e 44, próximo a costa, os valores de P atingiram até $6,4 \text{ mmol N/m}^3$ em sub-superfície, e acompanharam a profundidade da isoterma de referência, entre 20 – 25 m de profundidade. A nutriclina se posiciona um pouco abaixo do máximo de P, entre 35 – 40 m de profundidade. A dispersão espacial de P se mantém a mesma ao longo dos dias 40 até 44, com núcleos de produção localizados a 25 - 30 m de

profundidade próximo a costa, e entre 50 – 75 m sobre a plataforma continental. Além da quebra de plataforma, valores de até $2,9 \text{ mmol-N/m}^3$ foram encontrados próximo aos 75 m de profundidade, acompanhando a nutriclina. Em águas costeiras superficiais, ocorreu um leve aumento da abundância de P, que chegou a atingir 1 mmol-N/m^3 .

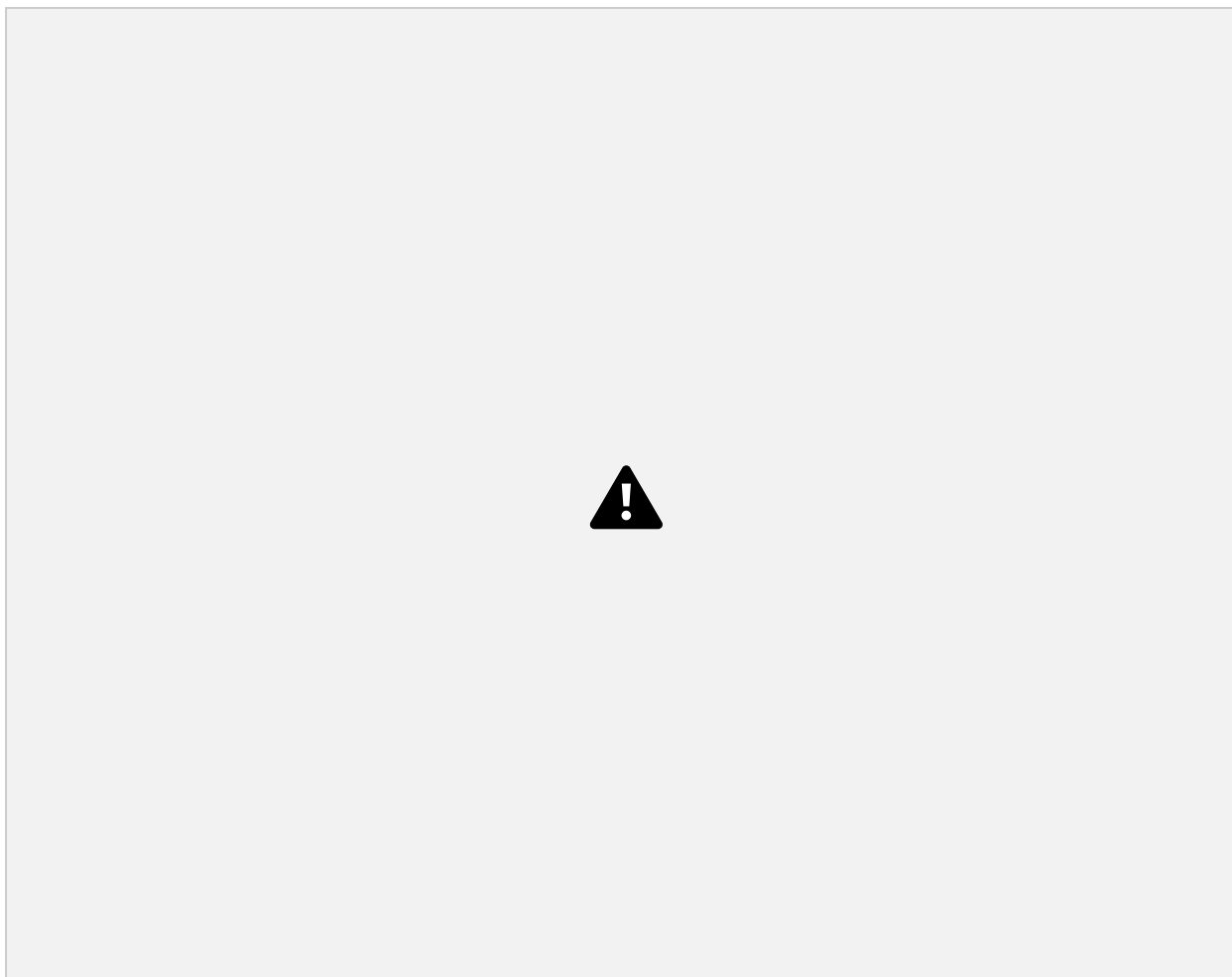


Figura 31. Seções verticais de temperatura, nitrato e fitoplâncton ao longo dos dias 40 até 44, no transecto 1 (Arraial do Cabo). A isoterma de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ é representada pela linha preta nas seções de temperatura.

No dia 46 da simulação, a isoterma de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ se posicionou acima dos 50 m de profundidade próximo a costa, no entanto, a nutriclina decaiu para 75 m de profundidade (Figura 32). A partir do dia 48, observou-se um rápido decaimento da isoterma de referência e da nutriclina para 100 m de profundidade. Da quebra de plataforma até o fim da seção vertical, ainda ocorreram concentrações de NO_3 de aproximadamente 6 mmol-N/m^3 , posicionadas a 80 m de profundidade.

A concentração de P permaneceu alta próximo a costa no dia 46, com valores acima de $6,4 \text{ mmol-N/m}^3$ entre 20 e 75 m de profundidade. Entre os dias 46 e 50 ocorreu uma dispersão do fitoplâncton para águas mais profundas (até 125 m), acompanhada de uma redução na abundância para valores de no máximo $4,3 \text{ mmol N/m}^3$. No dia 50, estes valores se encontraram em 70 m de profundidade e em águas mais afastadas da costa, após 25 km de distância do início da sessão. Em águas superficiais, valores de no máximo 1 mmol-N/m^3 foram encontrados. Após 50 km da seção, P ocorreu em valores de até $2,5 \text{ mmol-N/m}^3$, localizados em 75 m de profundidade.

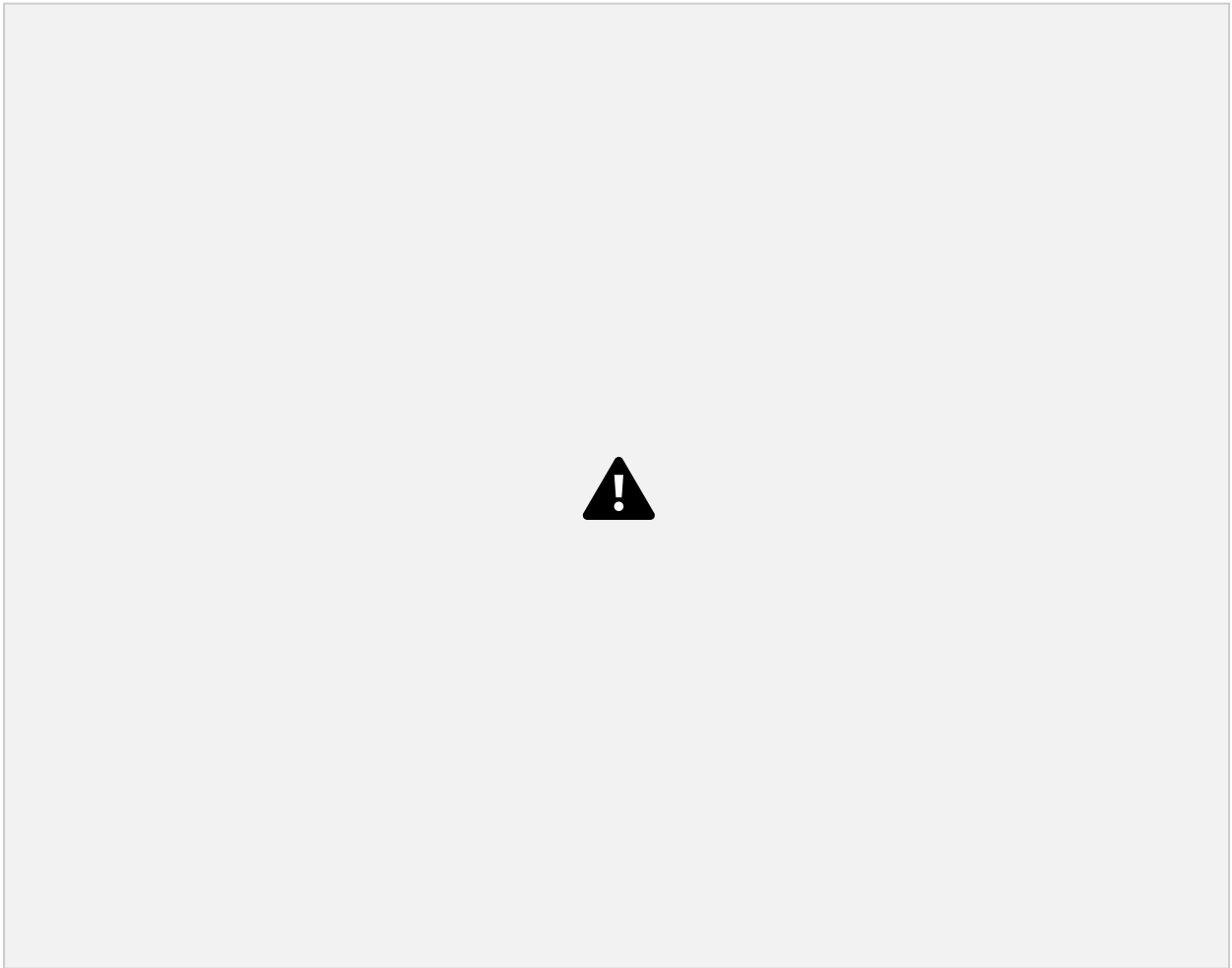


Figura 32. Seções verticais de temperatura, nitrato e fitoplâncton ao longo dos dias 46 até 50, no transecto 1 (Arraial do Cabo). A isoterma de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ é representada pela linha preta nas seções de temperatura.

A seção vertical de Z evidenciou uma abundância de aproximadamente 2,5

mmol-N/m³ próximo a costa e sobre a quebra de plataforma, desde os 20 m até aproximadamente 100 m de profundidade, entre os dias 34 e 36. No dia 38, os valores de Z próximo a costa decaíram para 1,5 mmol-N/m³ e se estenderam somente até 25 km do início da seção. Após a quebra de plataforma, durante os dias 34 até 36, ocorreram concentrações de até 1,5 mmol-N/m³, concentrados entre 50 – 75 m de profundidade, até o fim da seção.

O campo de detritos permaneceu com valores de aproximadamente 0,7 mmol N/m³ do dia 34 até o dia 38, sem muitas alterações em sua dispersão espacial na seção, e ocorreram entre 0 – 100 m de profundidade do início da seção até 50 - 75 km (Figura 33).

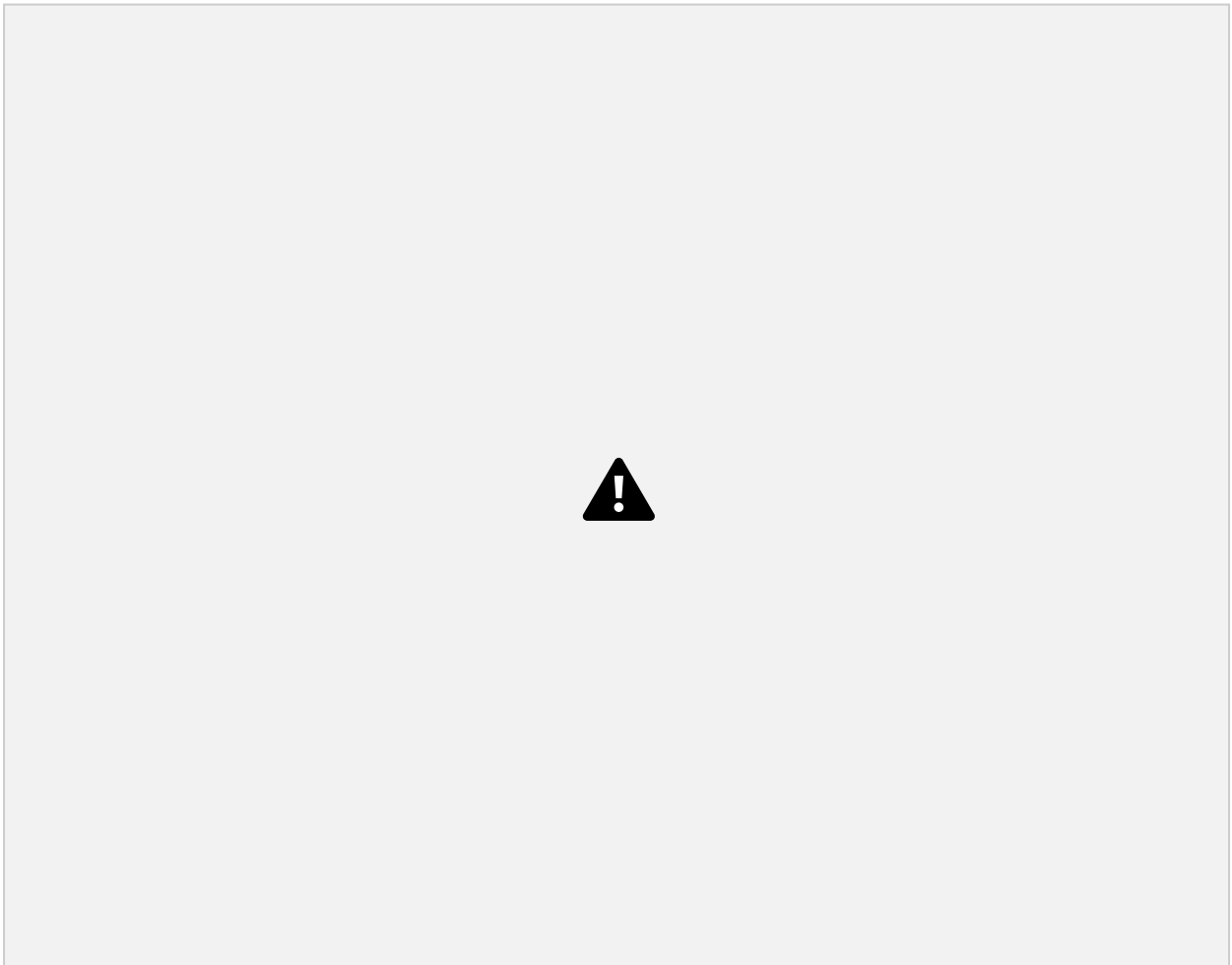


Figura 33. Seções verticais de fitoplâncton, zooplâncton e detritos ao longo dos dias 34 até 38, no transecto 1 (Arraial do Cabo).

A partir do dia 40, com o aumento na abundância de P em sub-superfície, ocorreu uma estagnação no crescimento de Z. Valores de até 2 mmol-N/m³ foram encontrados desde a superfície até 50 m de profundidade, próximo a costa, durante os dias 40 até 44. A partir dos 20 - 25 km da seção, esses valores se concentraram próximo a 60 m de profundidade ao longo de toda seção, e as águas superficiais apresentaram valores de até 1 mmol-N/m³.

Concentrações de detritos de até 0,7 mmol-N/m³ ocorreram ao longo de toda a seção, nos primeiros 100 m da coluna d'água, durante os dias 40 até 44 (Figura 34).

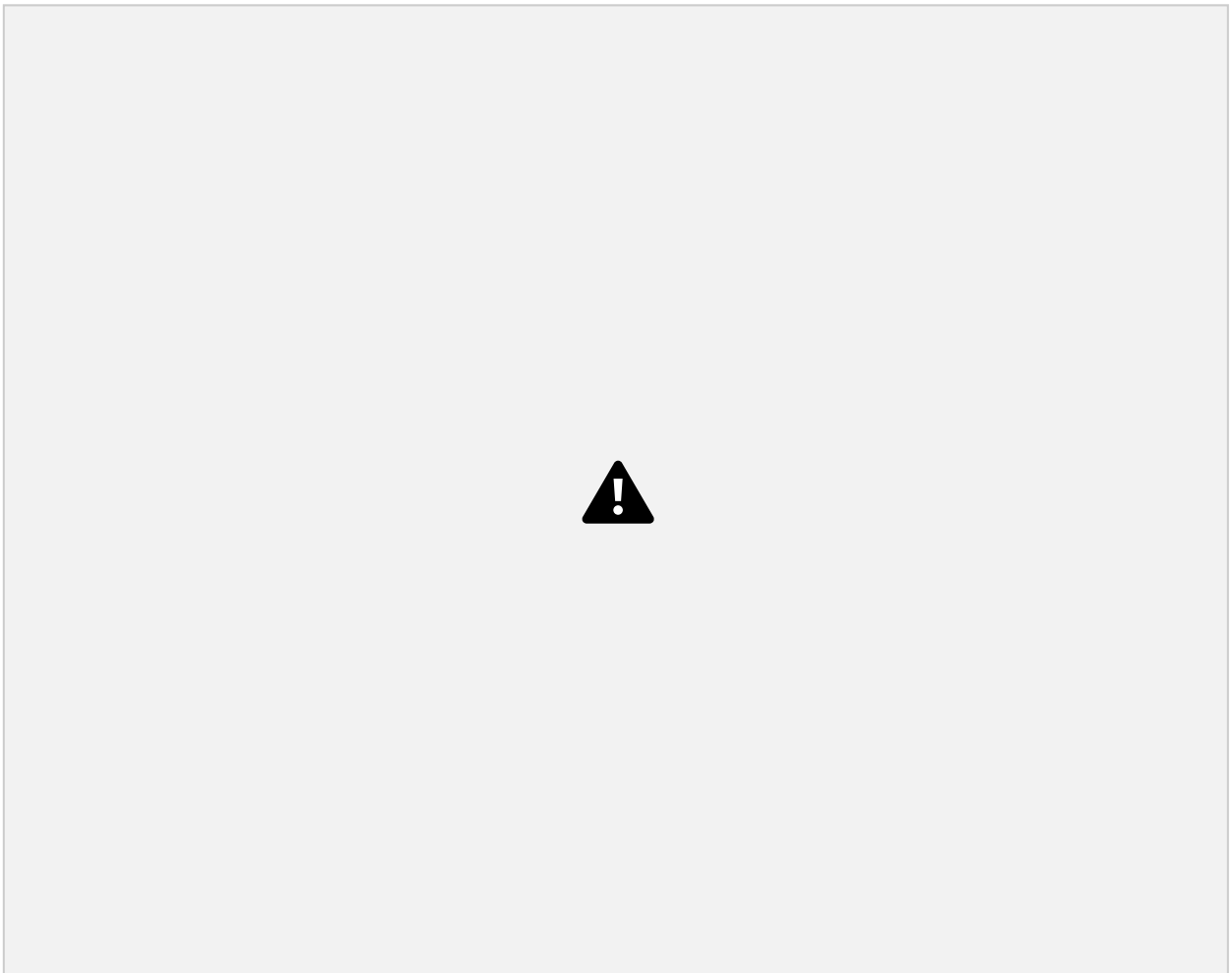


Figura 34. Seções verticais de fitoplâncton, zooplâncton e detritos ao longo dos dias 40 até 44, no transecto 1 (Arraial do Cabo).

No dia 46, quando ocorreram os máximos valores de biomassa de P em subsuperfície, os valores de Z atingiram seus mínimos em superfície e subsuperfície

próximo a costa ($1,4 \text{ mmol-N/m}^3$). Esses valores ocorrem somente em poucos quilômetros próximo a costa na seção (Figura 35).

A partir do dia 48 até o dia 50, observou-se um declínio nos valores de P e um aumento significativo na distribuição e abundância de Z na coluna d'água próximo a costa, com valores de até $2,5 \text{ mmol-N/m}^3$, da superfície até 130 m de profundidade. Após os 50 km do início da seção, ocorreram menores abundâncias de Z, com valores de até $1,4 \text{ mmol-N/m}^3$ localizados a 75 m de profundidade.

Os valores de detrito, mais uma vez, não mostraram grandes variações ao longo dos dias de simulação, e permaneceram com valores próximos a $0,7 \text{ mmol-N/m}^3$, da superfície até 130 m de profundidade próximo a costa.

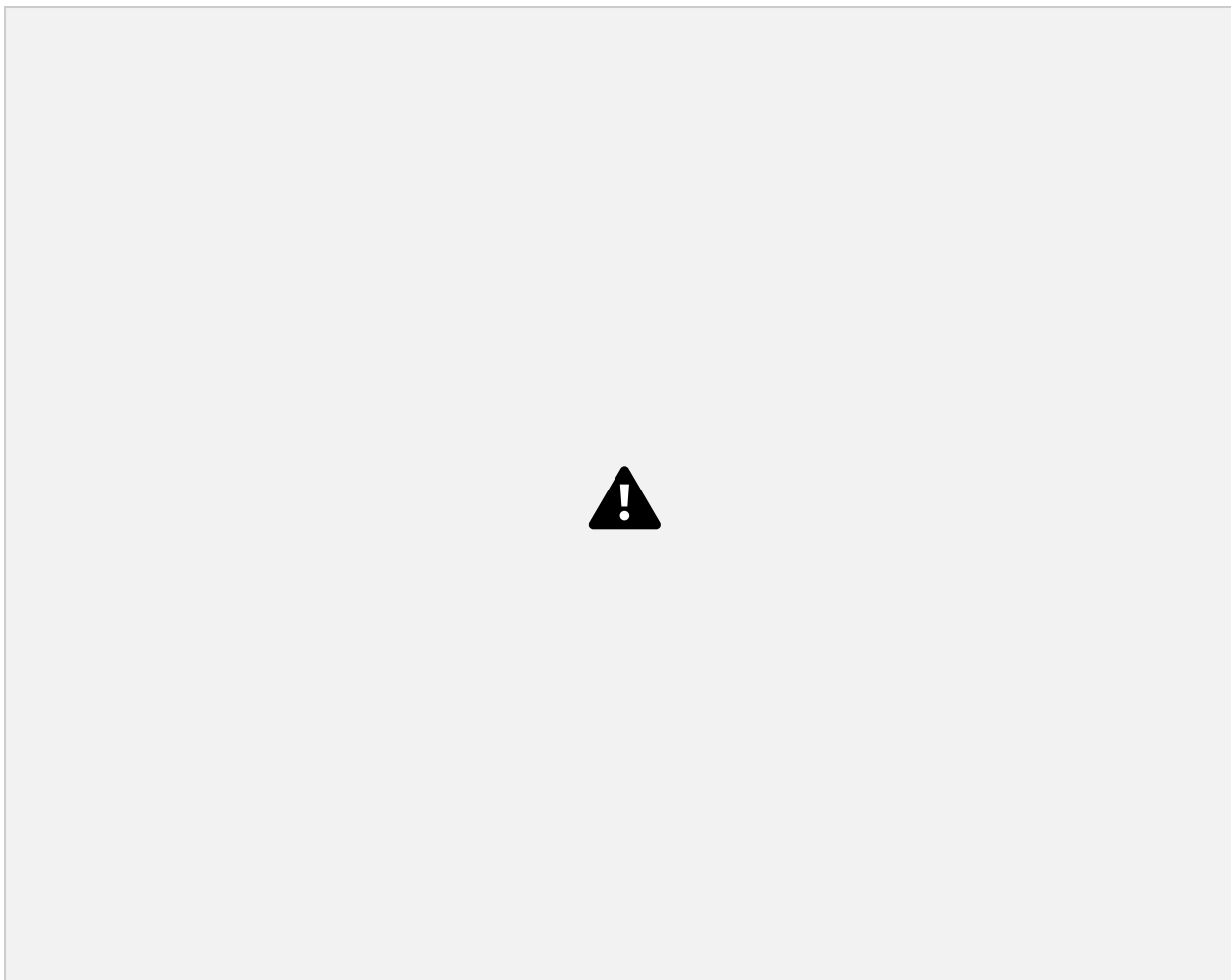


Figura 35. Seções verticais de fitoplâncton, zooplâncton e detritos ao longo dos dias 46 até 50, no transecto 1 (Arraial do Cabo).

4.3.3 Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidade de corrente ao longo do EXP2 – Transecto 2 (Saquarema)

O T2 (Saquarema) evidenciou um perfil de temperatura similar ao T1. No dia 34 da simulação, a isoterma de 20 °C se posicionou logo abaixo da profundidade de 50 m. As águas superficiais na costa apresentaram temperaturas superiores a 22 °C, e atingiram um máximo de aproximadamente 24 °C a partir de 50 km da seção. A partir do dia 36, a isoterma de referência se posicionou acima dos 50 m de profundidade e ascendeu um pouco mais plataforma adentro no dia 38. A temperatura das águas superficiais próximo a costa começou a diminuir, chegando a 21 °C. No restante da seção, após os 50 km, as águas superficiais apresentaram temperaturas de até 24 °C.

A salinidade se manteve em 36,1 próximo a costa no dia 34 e começou a diminuir suavemente até o dia 38, com valores de 35,8. Após 50 km da seção, a salinidade se manteve estável durante os dias 34 até 38, com valores acima de 36,4 até 150 m de profundidade.

O perfil de velocidade zonal evidenciou um aumento na intensidade de uma corrente fluindo no sentido oeste, sobre toda a plataforma interna e próximo a costa, com valores de velocidade entre 0,2 e 0,3 m/s, durante os dias 34 até 38. Após 75 km da seção, ocorreu uma corrente no sentido contrário da costeira, fluindo para leste, com valores de até 0,2 m/s (Figura 36).

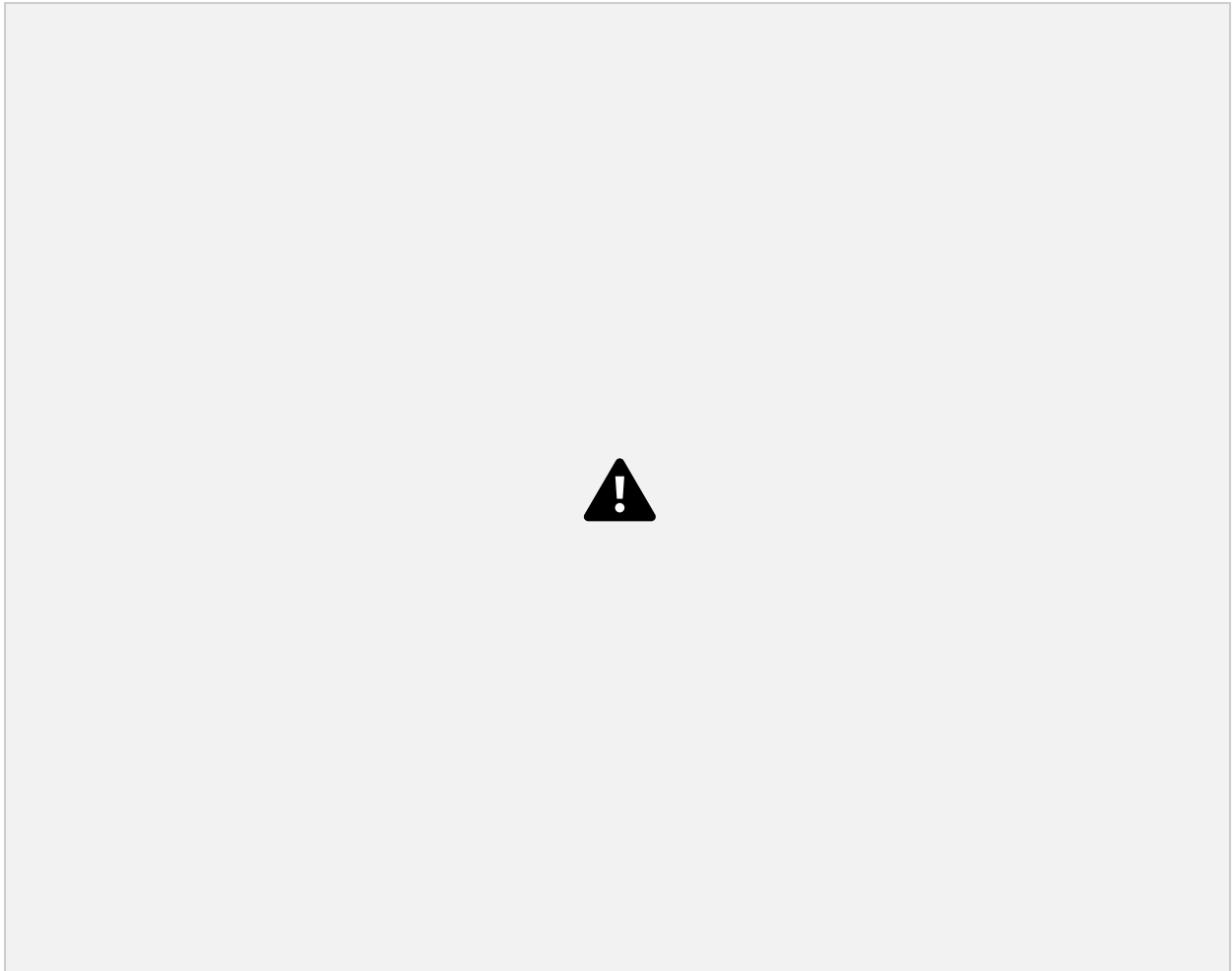


Figura 36. Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades de corrente ao longo dos dias 34 até 38 da simulação, no transecto 2 (Saquarema). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.

No dia 40 da simulação, a isoterma de 20 °C se posicionou entre 20 – 25 m de profundidade próximo a costa. A temperatura na superfície atingiu 21 °C próximo a costa, e ficou entre 23 e 24 °C após 40 km do início da seção.

Nos dias 42 e 44 a isoterma de referência continuou a ascender até atingir aproximadamente 20 m de profundidade próxima a costa, e a temperatura superficial ficou muito próxima dos 20 °C. Após 40 km da seção, ocorreram temperaturas entre 22 e 24 °C até 100 m de profundidade, e a isoterma de referência se posicionou abaixo dos 100 metros de profundidade. Os campos de salinidade mostraram uma pequena redução da salinidade próximo a costa, com valores de no mínimo 35,8. Após 50 km da seção, salinidades de até 36,8 ocorreram até 120 m de profundidade, e decaíram para

35,5 até os 200 m.

Entre os dias 40 e 44 foi possível observar uma aceleração da corrente costeira no sentido oeste, que atingiu valores de até 0,4 m/s. Após aproximadamente 60 km do início da seção, ocorreu uma corrente no sentido contrário a da costeira (fluindo para leste), com velocidades de até 0,2 m/s (Figura 37).

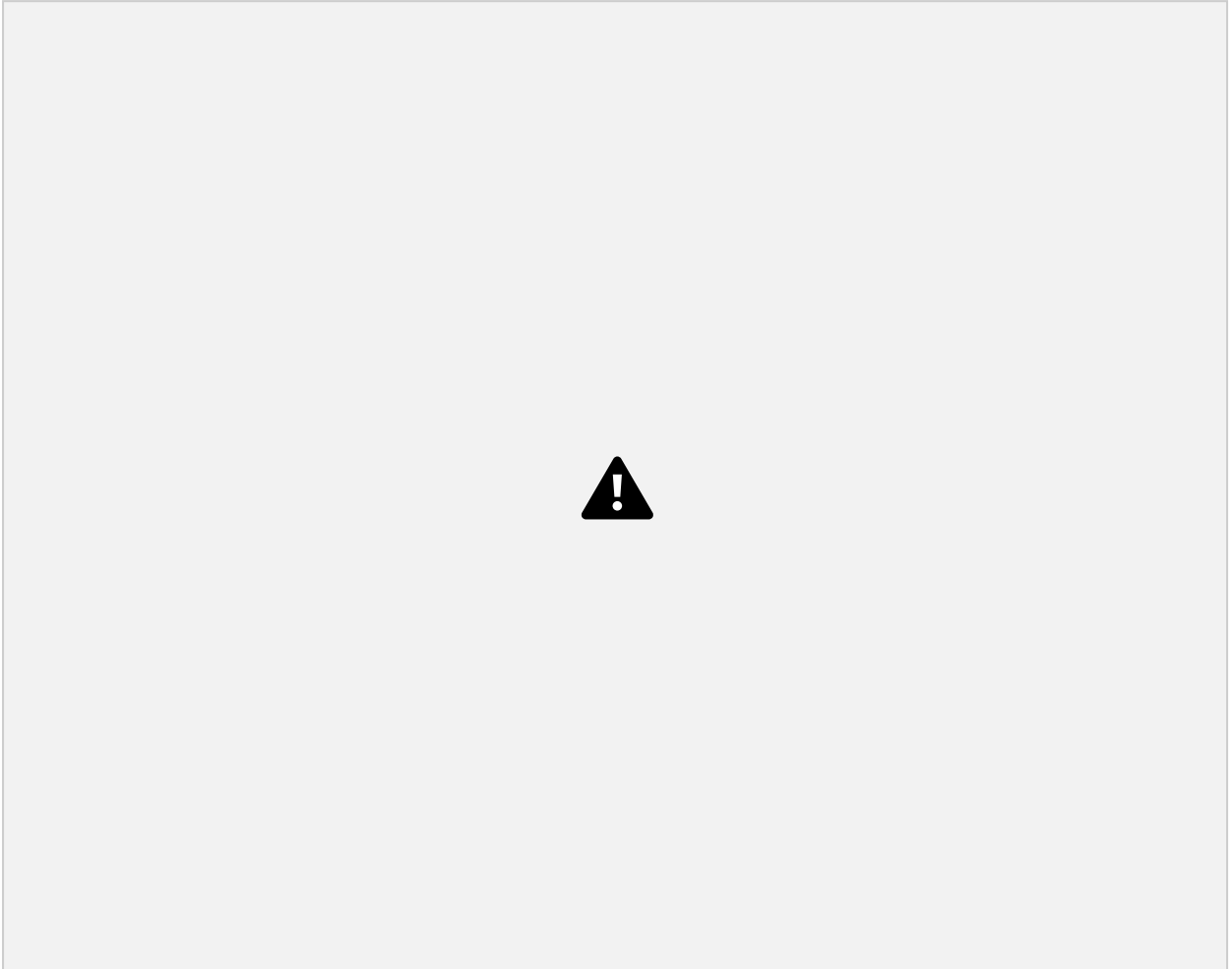


Figura 37. Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades de corrente ao longo dos dias 40 até 44 da simulação, no transecto 2 (Saquarema). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.

Do dia 46 até o dia 50, com a entrada de ventos do quadrante S, a isoterma de 20 °C começou a decair, indo de aproximadamente 35 m de profundidade no dia 46, para 80 m no dia 50 da simulação. A temperatura superficial próxima a costa ainda permaneceu próxima dos 20 °C no dia 46, mas se elevou até 22 °C no dia 50. Após 40

km da seção, as temperaturas superficiais atingiram até 24 °C, e a isoterma de referência se posicionou abaixo 100 m de profundidade.

A salinidade apresentou um aumento gradativo do dia 46 até o dia 50, e aumentou de 35,8 para valores acima de 36,4 até o último dia da simulação. Observou-se uma clara inversão da corrente costeira já no dia 46, que começou a fluir no sentido leste. A velocidade da corrente chegou a 0,1 m/s no dia 46 e aumentou gradativamente até o dia 50 (0,3 m/s). Após 30 – 40 km da seção, ocorreu um núcleo de corrente que fluiu no sentido oeste ao longo dos dias 46 até 50, com velocidades de até 0,4 m/s. Outro núcleo de corrente no sentido leste foi observado após 75 km do início da seção, com valores de até 0,2 m/s (Figura 38).

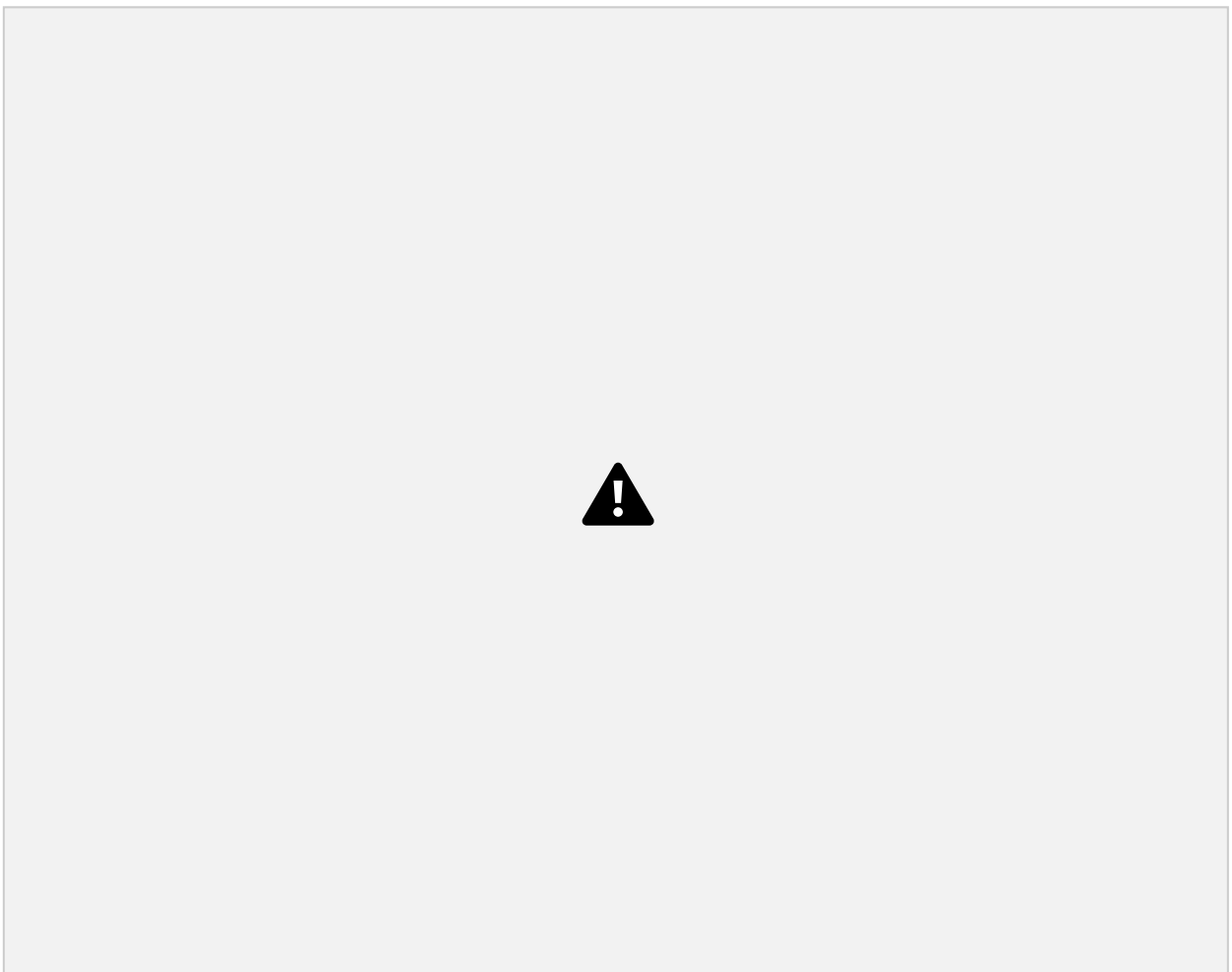


Figura 38. Seções verticais de temperatura, salinidade e velocidades de corrente ao longo dos dias 46 até 50 da simulação, no transecto 2 (Saquarema). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.

4.3.4 Seção vertical de N, P, Z e D ao longo do EXP2 – Transecto 2 (Saquarema)

No dia 34 da simulação, a nutriclina se posicionou próxima a isoterma de 20 °C, abaixo dos 50 m de profundidade, com valores de até 8 mmol-N/m³ de NO₃. Nos dias 36 e 38 ocorreu uma leve ascensão da termoclina para próximo dos 50 m de profundidade (Figura 39).

No dia 34, P apresentou abundâncias de até 4,3 mmol-N/m³, localizadas a 60 m de profundidade, entre 20 e 60 km de distância da costa. As abundâncias superficiais de P ao longo de toda a seção foram relativamente baixas (0,7 mmol-N/m³).

Já nos dias 36 e 38, P apresentou uma resposta rápida frente à disponibilização dos nutrientes na plataforma continental. Valores de até 5,0 mmol-N/m³ ocorreram no dia 36, localizados a 50 m de profundidade, a 20–25 km da costa. Após 50 km da seção, ocorreram abundâncias de até 2,1 mmol-N/m³, localizadas em 75 m de profundidade.

No dia 38, P atingiu valores de até 6,4 mmol-N/m³, desde muito próximo a costa até 25 km do início da seção, e abrangeu toda a coluna d'água entre 20 e 70 m de profundidade. Outro núcleo de produção ocorreu no km 50 da seção, com valores de P de até 4,3 mmol-N/m³, a 75 m de profundidade. Entre os dias 36 e 38 não ocorreu aumento nas concentrações superficiais de P (0,7 mmol-N/m³) ao longo de toda a seção.

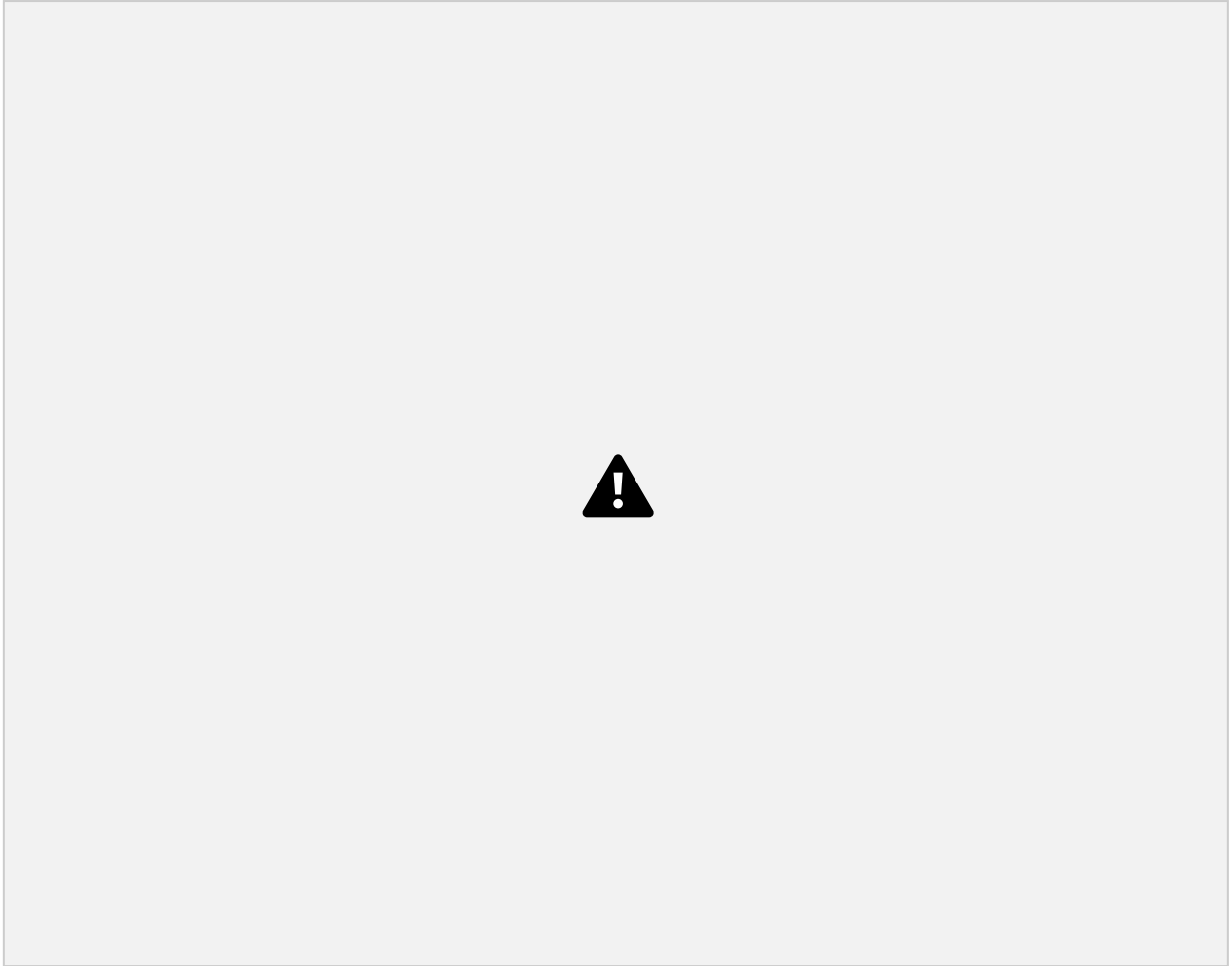


Figura 39. Seções verticais de temperatura, nitrato e fitoplâncton ao longo dos dias 34 até 38 da simulação, no transecto 2 (Saquarema). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.

A isoterma de referência ascendeu ainda mais no dia 40 da simulação, e chegou a atingir 20–25 m de profundidade. Ocorreram concentrações de até 8 mmol N/m³ de NO₃ a 50 m de profundidade próximo a costa, porém a nutriclina começou a decair para profundidades abaixo dos 50 m a partir do dia 42 até o 44. Não foi observado um aumento da concentração superficial de NO₃ ao longo dos dias 40 até 44 (Figura 40).

No dia 40 de simulação, foi possível observar abundâncias de P superiores a 6,4 mmol-N/m³ por grande parte da plataforma interna e próximo à costa, desde 20 m até 70 m de profundidade. Ocorreram valores superiores a 1,4 mmol-N/m³ muito próximo a

superfície na costa, e na região mais oceânica, as abundâncias permaneceram relativamente baixas ($0,7 \text{ mmol-N/m}^3$). O outro núcleo de produção, que ocorreu no dia 38, se manteve posicionado a 50 m de profundidade no dia 40, com valores de até 5 mmol-N/m^3 , posicionado mais próximo dos 40 km da seção. Após o segundo núcleo, valores de até $2,1 \text{ mmol-N/m}^3$ ocorreram próximos a 75 m de profundidade.

Do dia 42 ao dia 44, P atingiu seus máximos de abundância de dispersão na coluna d'água. Valores acima de $6,4 \text{ mmol-N/m}^3$ foram observados próximo a costa, desde 15 até 70 m de profundidade. Os valores superficiais de P ultrapassaram $2,1 \text{ mmol-N/m}^3$, desde o início da seção até 15 – 20 km. Após 25 km, os valores de P decaíram para $0,7 \text{ mmol-N/m}^3$.

Uma junção foi observada entre a produção mais próxima da costa e o outro núcleo, localizado a aproximadamente 40 km do início da seção, com valores de P entre $3,6$ e 5 mmol-N/m^3 . Após 40 km da seção, P ocorreu em abundâncias de até 2 mmol-N/m^3 , localizadas em 75 m de profundidade.

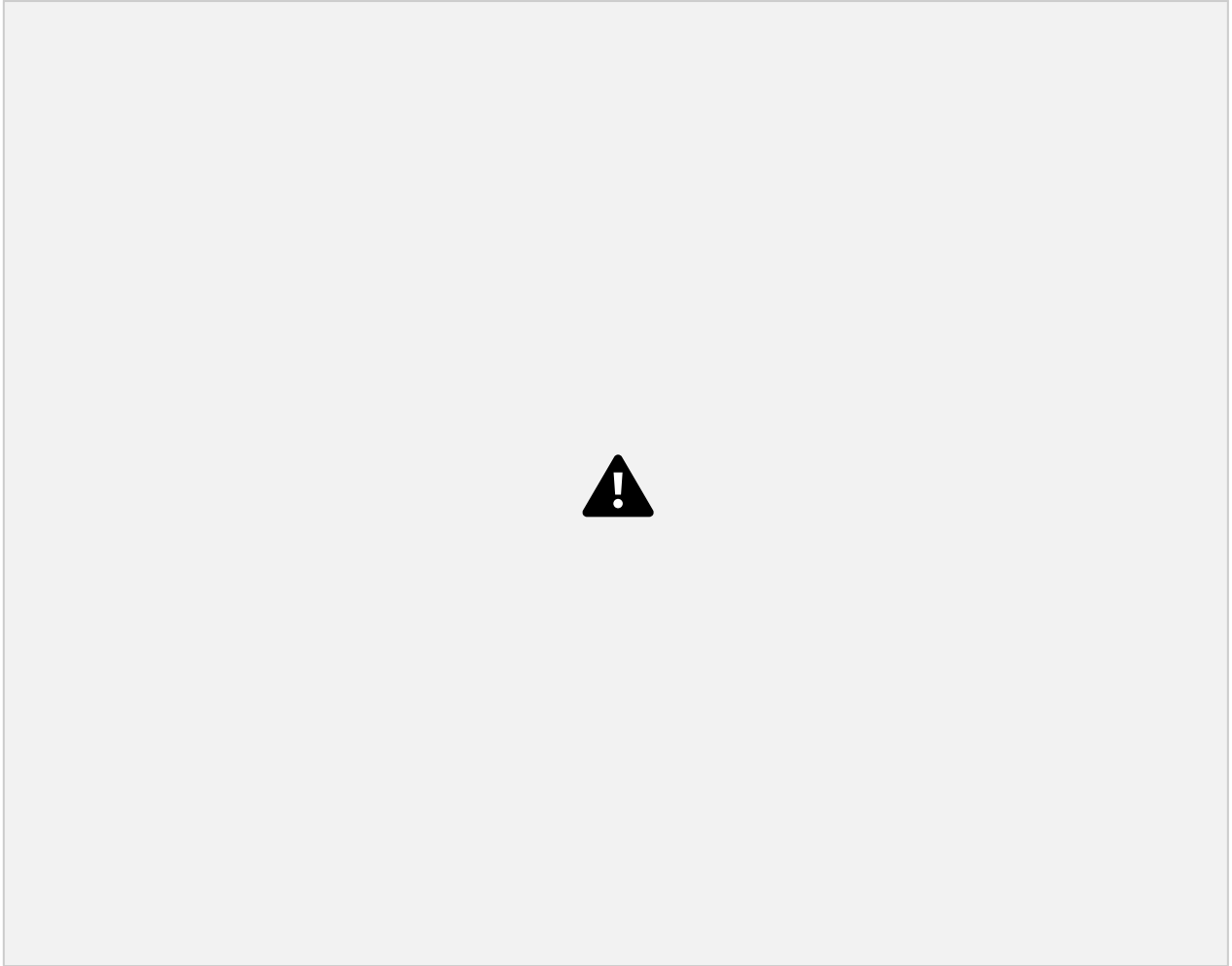


Figura 40. Seções verticais de temperatura, nitrato e fitoplâncton ao longo dos dias 40 até 44 da simulação, no transecto 2 (Saquarema). A isoterma de 20 °C é representada pela linha preta nas seções de temperatura.

A partir do dia 46, ventos de quadrante S atingiram a área de interesse, fazendo a isoterma de referência decair para profundidades de até 80 m no dia 50 da simulação. O campo vertical de nutrientes evidenciou uma estabilização da termoclina na profundidade de 75 m, acompanhando a isoterma de 20 °C, a partir do dia 48. A concentração superficial de NO_3 foi quase nula ao longo dos dias 46 até 50.

O campo de P, no dia 46 ainda apresentou reflexos da floração que começou a ocorrer no dia 38. As abundâncias de P, próximo a costa, atingiram valores de até 6,4 mmol-N/m^3 , próximo aos 60 m de profundidade. Nas águas costeiras superficiais, ainda foi possível observar valores de P entre 1,4 e 2,1 mmol-N/m^3 . Após 50 km da seção,

ocorreram abundâncias de até $2,1 \text{ mmol-N/m}^3$, localizadas em 75 m de profundidade.

No dia 48 de simulação, ocorreu uma diminuição brusca das concentrações de P próximo a costa. Valores entre $0,7$ e $1,4 \text{ mmol-N/m}^3$ foram encontrados apenas em águas superficiais adjacentes a costa. A produção se concentrou após 50 km da seção, com valores de até $3,6 \text{ mmol-N/m}^3$ no dia 48 e $2,9 \text{ mmol-N/m}^3$ para o dia 50, ambas localizadas a 75 m de profundidade. Após a quebra de plataforma, valores de até $2,1 \text{ mmol-N/m}^3$ foram encontrados, também a 75 m de profundidade (Figura 41).

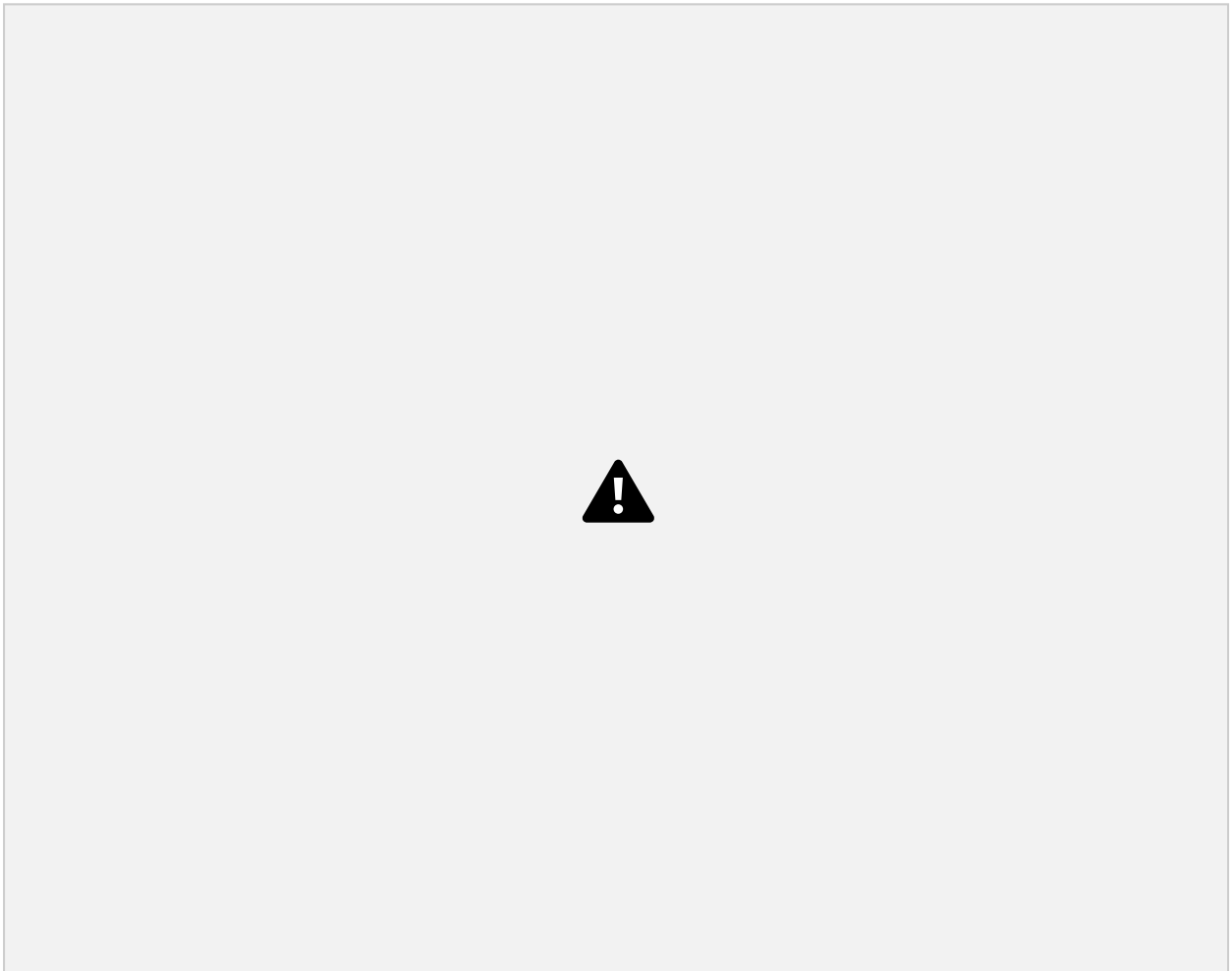


Figura 41. Seções verticais de temperatura, nitrato e fitoplâncton ao longo dos dias 46 até 50 da simulação, no transecto 2 (Saquarema). A isoterma de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ é representada pela linha preta nas seções de temperatura.

O campo vertical de zooplâncton, no dia 34, evidenciou abundâncias de até $2,9 \text{ mmol-N/m}^3$ nos primeiros 25 km da seção, localizados a 50 m de profundidade. Após 25 km, valores de $2,1 \text{ mmol-N/m}^3$ ocorreram em profundidades entre 50 e 75 m. Na

superfície, próximo a costa, ocorreram valores de até $2,1 \text{ mmol-N/m}^3$. O campo de detritos não apresenta grandes variações ao longo dos dias 34 até 38, mantendo valores de até $0,7 \text{ mmol-N/m}^3$ ao longo dos primeiros 100–120 m da coluna d'água, por toda a extensão da seção (Figura 42).

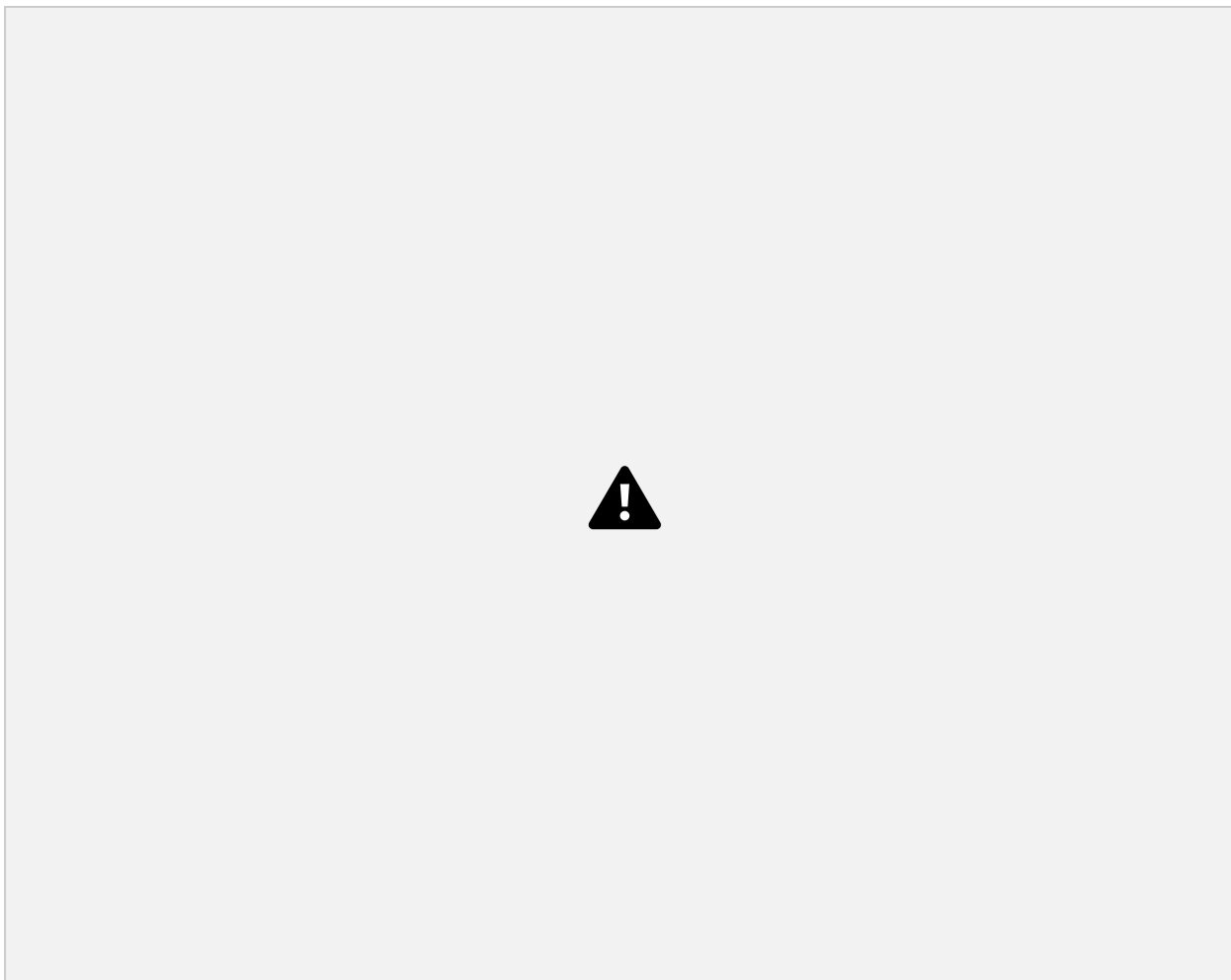


Figura 42. Seções verticais de fitoplâncton, zooplâncton e detritos ao longo dos dias 34 até 38 da simulação, no transecto 2 (Saquarema).

Com o aumento nas abundâncias e dispersão de P ao longo da seção, a partir do dia 40, Z apresentou uma maior dispersão em superfície e subsuperfície próximo a costa, e atingiu valores de até $2,1 \text{ mmol-N/m}^3$ nos primeiros 50 m da coluna d'água.

Após 40 km e até o fim da seção, foi possível observar um grande filamento de Z, com valores acima de $2,1 \text{ mmol-N/m}^3$, localizados entre 50 e 75 m de profundidade. Este padrão de distribuição de Z ocorreu desde o dia 40 até o dia 44 da simulação.

Valores acima de $0,7 \text{ mmol-N/m}^3$ de D ocorreram ao longo de toda a seção, entre 50–75 m de profundidade. Próximo à superfície, na costa, também foi possível observar valores de até $0,7 \text{ mmol-N/m}^3$ (Figura 43).

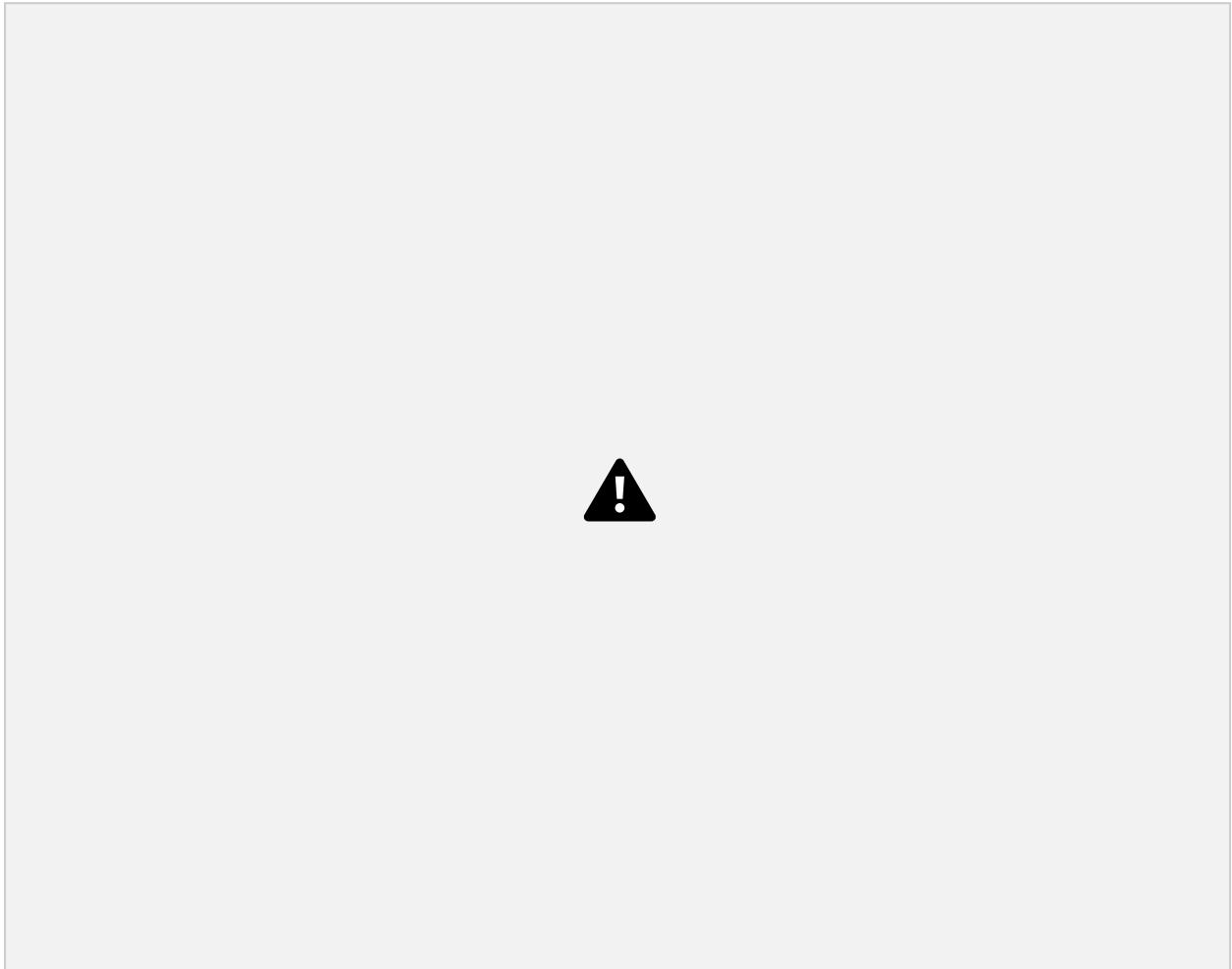


Figura 43. Seções verticais de fitoplâncton, zooplâncton e detritos ao longo dos dias 34 até 38 da simulação, no transecto 2 (Saquarema).

A partir do dia 46 de simulação, as concentrações de P começaram a diminuir, e observou-se um aumento de Z, principalmente próximo ao fundo, em profundidades de até 100 m (Figura 44). Valores de até $2,1 \text{ mmol-N/m}^3$ foram encontrados desde a superfície até 50 m de profundidade próximo a costa, e um máximo de $3,6 \text{ mmol-N/m}^3$ foi encontrado em 50 m de profundidade, aproximadamente entre os quilômetros 10 e 25 da seção, no dia 46.

O dia 48 apresentou a maior concentração e dispersão de Z durante todo o