

OCEANOGRAFIA FÍSICA

Renato Ghisolfi, Thayná Martins, Angelo Lemos, Fernanda Perassoli

METODOLOGIA

1) Coleta de dados *in situ*

A coleta de dados termohalinos, de pressão, fluorescência, turbidez e oxigênio dissolvido realizadas à bordo do NOc Vital de Oliveira foram realizadas com o CTD 11plus acoplado à Rosette com 24 garrafas com capacidade coletar para 12 litros de água. Nas estações rasas, isto é, ao longo da isóbata de 10 m e nas amostragens realizadas no cruzeiro feito com o navio Soloncy Moura em janeiro de 2016 utilizou-se um perfilador do tipo CTD do modelo 3" Micro CTD fabricado por *Falmouth Scientific, INC*. Que possui acoplado um fluorímetro e turbidímetro modelo *SCUFA (Self-Contained Underwater Fluorescence Apparatus)* fabricado por *Turner Designs*. Nesse último cruzeiro não foram realizadas perfilagens de oxigênio dissolvido.

A outra diferença entre as coletas realizadas à bordo do NOc Vital de Oliveria e do Soloncy Moura referem-se as características dos sensores de fluorescência e turbidez. No NOc Vital de Oliveira os resultados são informados em termos de mg/m^3 de clorofila-*a*, enquanto que o 3" Micro CTD fornece os resultados em termos relativos, isto é, em Unidades Relativas de Fluorescência (ou RFU – *Relative Fluorescence Unit*).

Ambos os equipamentos fornecem os dados de turbidez em NTU ou (*Nephelometric Turbidity Unit* ou Unidades Nefelométricas de Turbidez). O sensor acoplado ao CTD 9plus está calibrado para leituras na faixa entre 0 e 25 NTU enquanto que o turbidímetro *SCUFA* associado ao 3" Micro CTD mede na faixa entre 0 a 100 NTU.

a) Processamento dos dados em laboratório

Os dados hidrográficos passaram por um pré-processamento a fim de retirar os valores discrepantes e as descontinuidades. Esse procedimento incluiu:

- **Filtragem:** Detecção e retirada dos valores discrepantes (*spikes*) utilizando o critério de separar verticalmente os perfis em 5 m e, em cada bloco, eliminar os valores que foram superiores (inferiores) a ele mesmo somado (subtraído) de três vezes o desvio padrão do bloco.

- **Binagem:** Médias verticais dos dados a cada 1 dbar da coluna d'água de forma que os perfis hidrográficos fiquem equi-espaçados verticalmente.
- **Alisamento por Janela Móvel:** Substituição dos valores por uma média ponderada entre eles mesmos e os valores adjacentes. O tamanho da janela utilizado foi 5 devido às baixas profundidades da área de estudo. A janela aplicada foi do tipo *hanning* cuja distribuição de peso é de caráter gaussiano, ou seja, o maior peso é atribuído ao valor central.

Por fim, a temperatura *in situ* foi convertida em Temperatura Conservativa com o auxílio do pacote de rotinas *GSW Oceanographic Toolbox* desenvolvido por McDougall e Barker (2011).

2) Imagens de satélite

Nesta avaliação foram analisadas imagens da concentração de clorofila-*a* [mg/m^3], temperatura da superfície do mar [$^{\circ}\text{C}$], de Refletância Corrigida (*True Color*) e de bandas selecionadas do espectro visível da radiação dos sensores VIIRS/Suomi NPP, MODIS/Aqua e MODIS/Terra disponíveis no sítio da NASA (*National Aeronautics and Space Administration* - <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>). Quando necessário, as imagens foram ortoretificadas dentro do *software* SEADAS™ e imagens com alta cobertura de nuvens foram descartadas.

3) Modelagem numérica

a) Modelo hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico utilizado no presente estudo é o *Regional Ocean Model System* (ROMS) versão Agrif. O ROMS é um modelo oceânico tridimensional, de superfície livre, coordenadas seguidoras de terreno e que resolve as equações de Navier-Stokes utilizando a média de Reynolds e assumindo as aproximações de Boussineq e hidrostática, sendo amplamente utilizado pela comunidade científica em uma vasta gama de aplicações (por exemplo, Haidvogel *et al.*, 2000; Marchesiello *et al.*, 2003; Peliz *et al.*, 2003; Mason *et al.*, 2010; Rezende *et al.*, 2011). Maiores informações sobre o modelo podem ser encontradas em Shchepetkin e McWilliams (2005).

O modelo ROMS foi estruturado para representar as condições hidrodinâmicas de mesoescala na região da foz do Rio Doce a partir da chegada da lama de rejeitos de mineração na costa do Espírito Santo, em 21 de novembro/2015. No presente resultado não

está incluído a descarga do rio, forçante essa que será implementada na nova simulação. Os resultados referentes às campanhas do NOc Vital de Oliveira e do navio Soloncy Moura serão aqui apresentadas.

A estratégia de simulação utilizada foi o *downgrade*, isto é, os resultados provenientes da simulação global do Hycom (resolução espacial de $1/48^\circ$) foram processados em uma grade de maior resolução espacial ($1/48^\circ$) com novas forçantes meteorológicas e oceanográficas descritas a seguir. A maré foi também implementada.

A área modelada é apresentada na Figura 1.

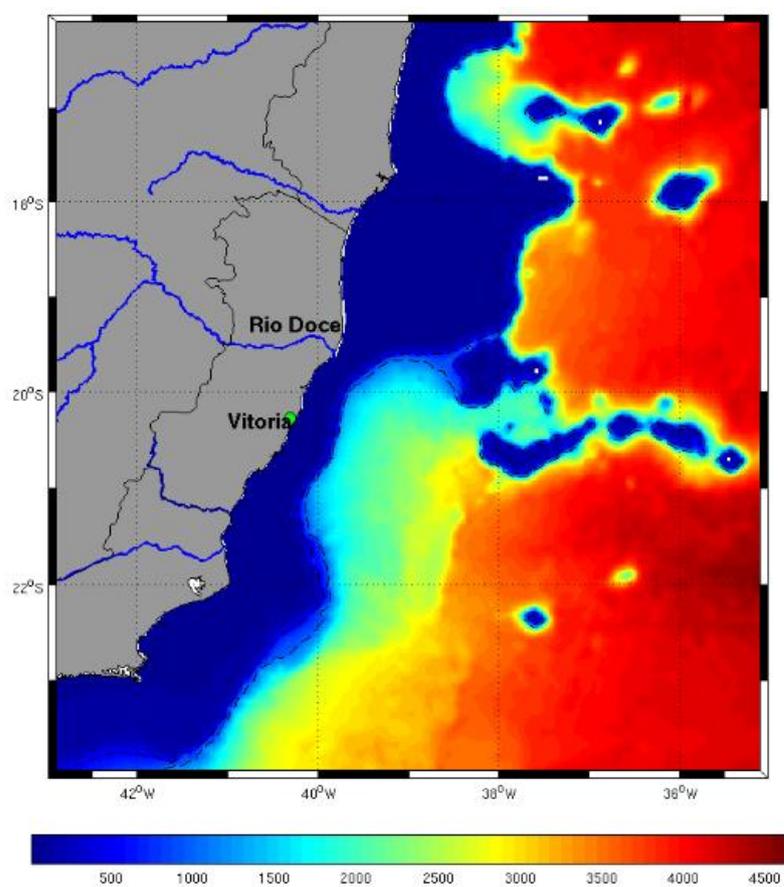


Figura 1: Batimetria utilizada no modelo computacional obtida do GEBCO com resolução espacial de $\sim 0,89$ km. As isóbatas (linha pontilhada) representam a batimetria de 500 e 1000 m.

i) Configuração do modelo ROMS

Tabela 1: Configurações utilizadas no modelo ROMS.

Parâmetro	Valor
Latitude mínima	24º S
Latitude máxima	16º S
Longitude mínima	43º W
Longitude máxima	35º W
Número de camadas σ	32
Resolução espacial	1/48 (~ 2 km)
Profundidade mínima na costa	10 m
Nível de referência para cálculo geostrófico	1000 m
Número de componentes de maré	10
Mínimo d_x e d_y	2,11 km
Máximo d_x e d_y	2,22 km

- Batimetria

Os dados batimétricos utilizados no modelo computacional foram obtidos do *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) com resolução espacial de 30 segundos (~0,89 km). Esses dados foram corrigidos pontualmente sobre a plataforma continental por medições *in situ* realizadas na região costeira do Espírito Santo.

- Forçante atmosférica

Os dados de forçantes atmosférica foram obtidos do modelo *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR), o qual representa a interação entre os oceanos, terra e atmosfera. O banco de dados do modelo consiste de previsões atmosféricas horárias geradas pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). O modelo gera resultados de 6h-6h (horas analisadas = 0000, 0600, 1200 a 1800 UTC) usando rede de informações de estações meteorológicas globais e produtos derivados de satélites, em uma resolução horizontal de 38 km.

Os parâmetros utilizados do modelo são: Temperatura Acima da Superfície, Fluxo de Radiação de Onda Longa (*Downward* e *Upward*), Fluxo de Radiação de Onda Curta (*Downward* e *Upward*), Temperatura Superficial, Taxa de Precipitação, Componente-U do Vento, Componente-V do vento e Umidade Específica.

- Forçante hidrodinâmica

Os dados hidrodinâmicos foram obtidos do modelo *HYCOM + NCODA Global 1/12º Analysis*, tendo uma resolução de aproximadamente 9,25 km na região costeira do Espírito Santo. Os dados de SSH (*Sea Surface Height*), Temperatura, Salinidade, Componente-U da Velocidade e Componente-V da Velocidade foram obtidos do modelo global e interpolados para a grade de 1/48 do modelo ROMS. No modelo hidrodinâmico foram inseridas as 10 principais componentes de maré (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_f e M_m) do modelo global TPXO de ¼ de resolução espacial, validadas através de análise horária com o marégrafo da Barra do Riacho em uma simulação específica para tal objetivo. Dessa forma, foi elaborado um Diagrama de Taylor comparando estatisticamente (RMS, Coeficiente de Correlação e Desvio Padrão) os dados do marégrafo com o TPXO, e do marégrafo com o resultado do modelo para o mês de novembro/2015 (**Figura 3**). O resultado da amplitude de maré do modelo, TPXO e marégrafo é mostrado na **Figura 4**.

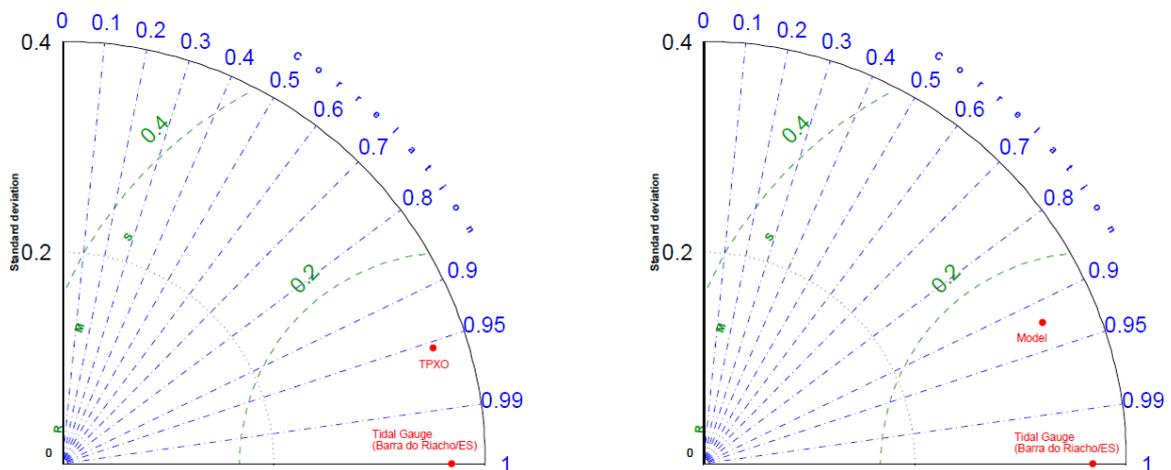


Figura 2: Diagrama de Taylor comparando os dados do modelo global TPXO com o marégrafo (esquerda) e o resultado do modelo com o marégrafo (direita).

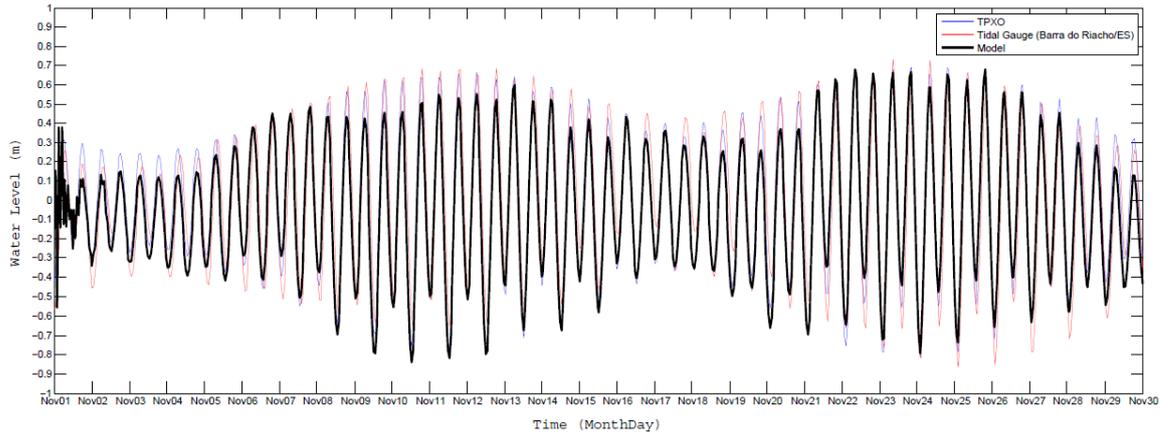


Figura 3: Série temporal de elevação de maré do modelo global TPXO, marégrafo da Barra do Riacho e resultado do modelo para o mês de novembro/2015.

b) Modelo biogeoquímico PISCES

O modelo biogeoquímico utilizado nesse estudo e acoplado ao modelo hidrodinâmico é o PISCES (*Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystem Studies*). O PISCES simula a produtividade biológica marinha e descreve os ciclos biogeoquímicos do carbono e dos principais nutrientes (P, N, Si e Fe) (Figura 4). Os dados de entrada do modelo foram médias climatológicas sazonais obtidas do WOA 2009 (*World Ocean Atlas*).

O PISCES possui 24 compartimentos divididos em:

- Cinco nutrientes limitantes para o crescimento do fitoplâncton: Nitrato, Amônia, Fosfato, Silicato e Ferro.
- Quatro compartimentos biológicos, incluindo duas classes de tamanho do fitoplâncton (nanofitoplâncton, 2 - 20 μm ; e diatomáceas, 20 - 200 μm), enquanto zooplâncton compreende o microzooplâncton (ciliados, 20 - 200 μm) e o mesozooplâncton (200 - 300 μm).
- Três compartimentos para carbono orgânico considerados: carbono orgânico dissolvido (DOC), e dois tamanhos de carbono orgânico particulado (POC).
-

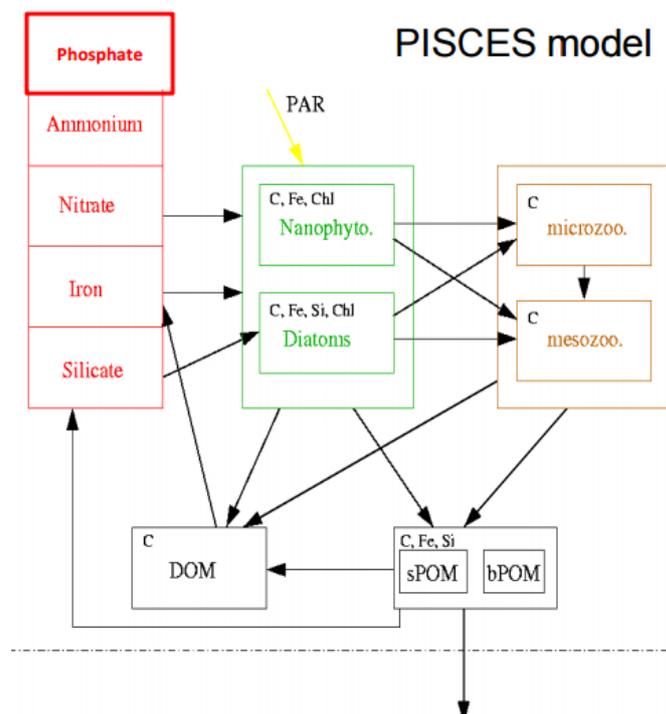


Figura 4: Diagrama da arquitetura do modelo PISCES.

Entre os demais parâmetros de saída do modelo biogeoquímico, a clorofila é prognosticamente prevista baseada na concentração dos nutrientes limitantes e parametrizada usando o modelo foto-adaptivo de Geider *et al.* (1998).

RESULTADOS

Os resultados serão apresentados por ordem cronológica de coleta, isto é, iniciando com os dois cruzeiros realizados à bordo do NOc. Vital de Oliveira seguido daqueles coletados com o auxílio do navio Soloncy Moura. Neste último, os resultados serão apresentados de acordo com as áreas foco de coleta, a saber Parque Nacional de Abrolhos, Barra Nova e região da foz do Rio Doce. As estações oceanográficas realizadas foram agrupadas em seções para a melhor compreensão dos resultados. A seguir serão apresentadas as imagens obtidas por sensoriamento remoto nos diferentes dias da campanha e os perfis verticais de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (URF) ou Clorofila-*a* e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas que foram realizadas no mesmo dia.

COLETAS REALIZADAS À BORDO DO NOc. VITAL DE OLIVEIRA - I PERNADA

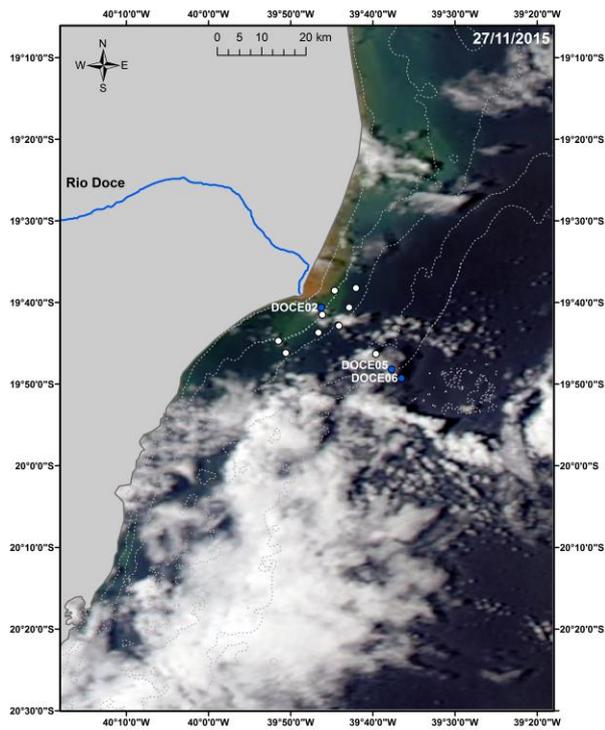


Figura 5: Imagem obtida pelo sensor MODIS/Aqua no dia 27 de novembro de 2015. Os pontos em azul destacam as estações oceanográficas realizadas no dia em que a imagem foi obtida.

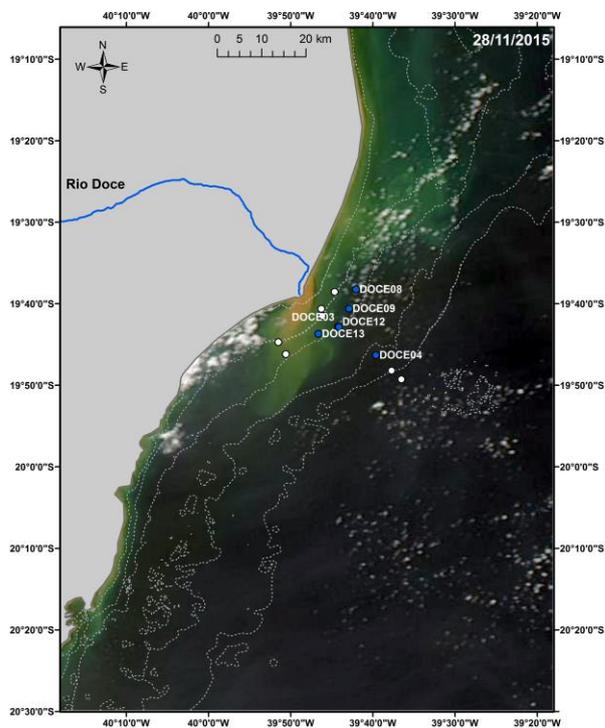


Figura 6: Imagem obtida pelo sensor MODIS/Aqua no dia 28 de novembro de 2015. Os pontos em azul destacam as estações oceanográficas realizadas no dia em que a imagem foi obtida.

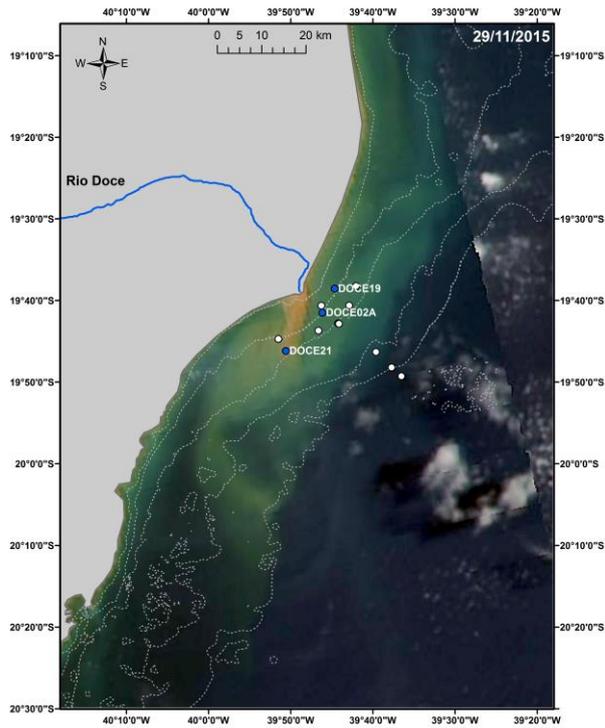


Figura 7: Imagem obtida pelo sensor MODIS/Aqua no dia 29 de novembro de 2015. Os pontos em azul destacam as estações oceanográficas realizadas no dia em que a imagem foi obtida.

TRANSECTO PERPENDICULAR À COSTA

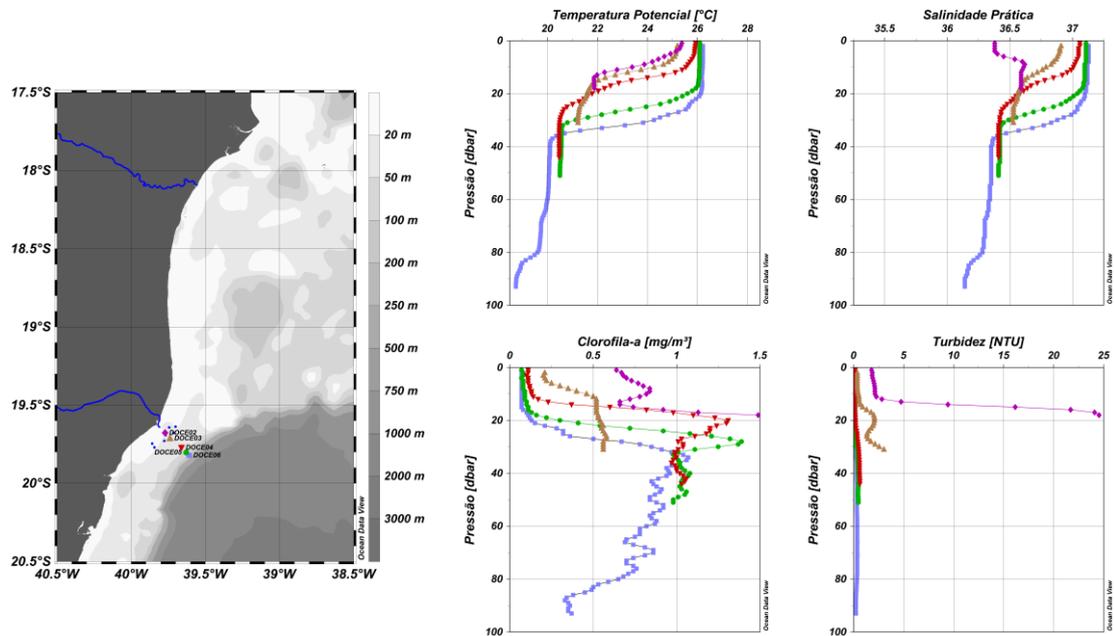


Figura 8: Perfis verticais de Temperatura Potencial ($^{\circ}\text{C}$), Salinidade Prática, clorofila- a (mg/m^3) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas realizadas perpendicularmente à foz do Rio Doce.

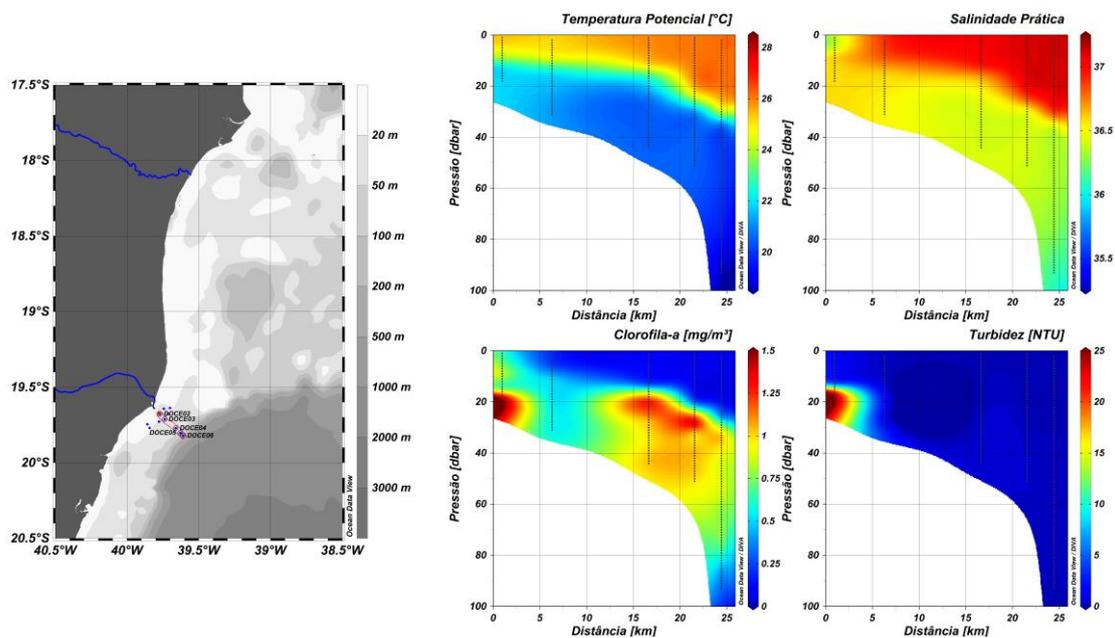


Figura 9: Seções de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, clorofila-*a* (mg/m³) e Turbidez (NTU) referentes às estações oceanográficas realizadas perpendicularmente à foz do Rio Doce.

Esse transecto foi amostrado praticamente nos dias 27 e 28 de novembro de 2015. Nele, o padrão térmico mostrou um oceano em duas camadas, superficialmente com temperaturas em torno de 26 °C, enquanto que abaixo dos 18 m a temperatura era inferior a 22 °C. Abaixo dos 40 m de profundidade, a temperatura era inferior a 20 °C, caracterizando a presença de 100% de Água Central do Atlântico Sul. A salinidade estava alta em todo o transecto, muito embora na estação mais costeira se identificou a influência da descarga continental. Ela, no entanto, não foi suficientemente alta para reduzir a salinidade a valores menores que 36. A concentração clorofila-*a* apresentou um padrão inverso ao da temperatura, enquanto que os maiores teores de turbidez foram observados somente nas duas estações mais costeiras e sempre próximo ao fundo. Deve salientar que a faixa de medida do sensor de turbidez utilizado nestas medições era de 0 a 25 NTU, isto é, para águas caracteristicamente oceânicas.

ARCO 20m

Ao longo da isóbata de 20 m o gradiente térmico é no sentido sudoeste, no mesmo padrão do gradiente de turbidez. Embora o padrão seja igual, é interessante notar que o nível de turbidez se iguala nos três pontos ao final da termoclina. Enquanto na estação mais ao sul, a turbidez se manteve praticamente constante, nos outros dois pontos, ela aumentou significativamente abaixo da termoclina.

O padrão de salinidade foi constante ao longo da coluna de água, enquanto que as maiores concentrações de clorofila-*a* junto ao fundo foram semelhantes ao padrão identificado para a turbidez.

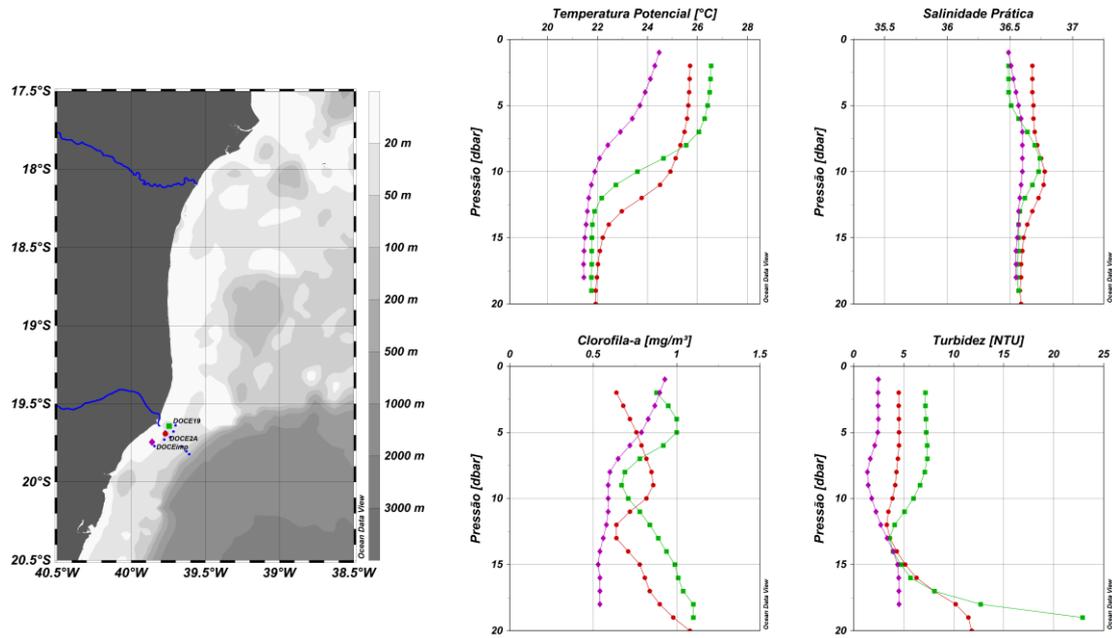


Figura 10: Perfis verticais de Temperatura Potencial ($^{\circ}\text{C}$), Salinidade Prática, clorofila- a (mg/m^3) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas localizadas ao longo da isóbata de 20 m.

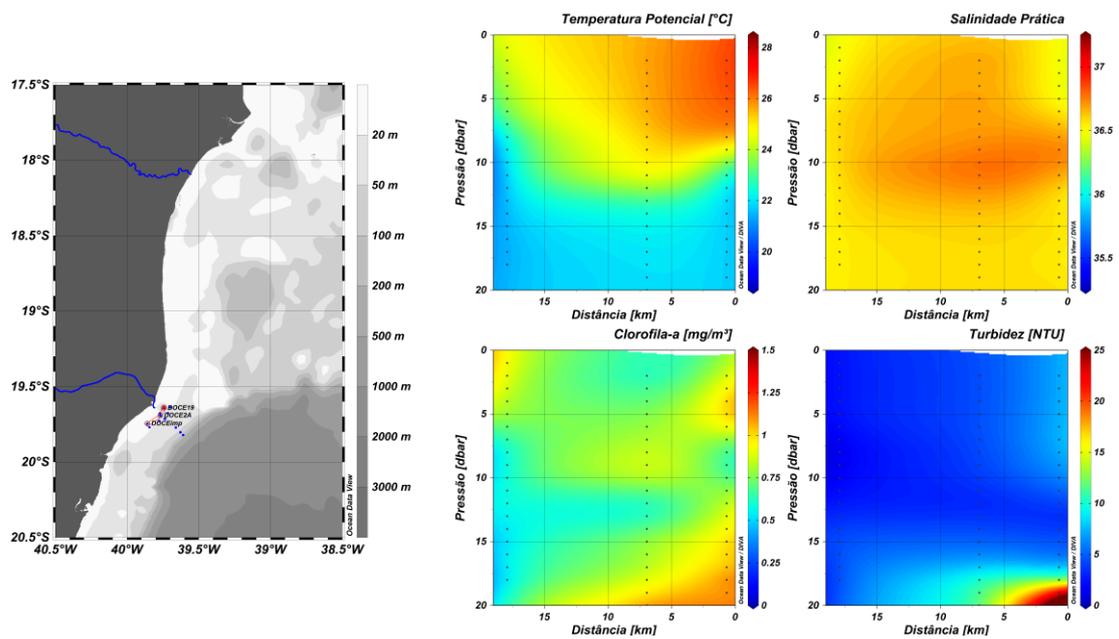


Figura 11: Seções verticais paralelas à costa de Temperatura Potencial ($^{\circ}\text{C}$), Salinidade Prática, clorofila- a (mg/m^3) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas localizadas ao longo da isóbata de 20 m.

ARCO 30 m

Cinco estações compõe o arco de 30 m de profundidade. Observando-se o padrão termohalino verifica-se que a #DOCE02 distoa das demais. Nas quatro estações restantes, a homogeneidade térmica e halina observada abaixo dos 10 m não se observou na camada superficial. As duas estações ao sul da foz apresentaram menores temperaturas e salinidade enquanto que nas duas ao norte os valores térmicos e halinos foram maiores. Interessante notar que a mesma diferenciação, mas com padrão inverso, ocorreu em termos de clorofila-*a* e turbidez. Finalmente, com exceção da estação mais ao sul (#DOCE21) nos demais pontos houve aumento da turbidez abaixo dos 20 m de profundidade.

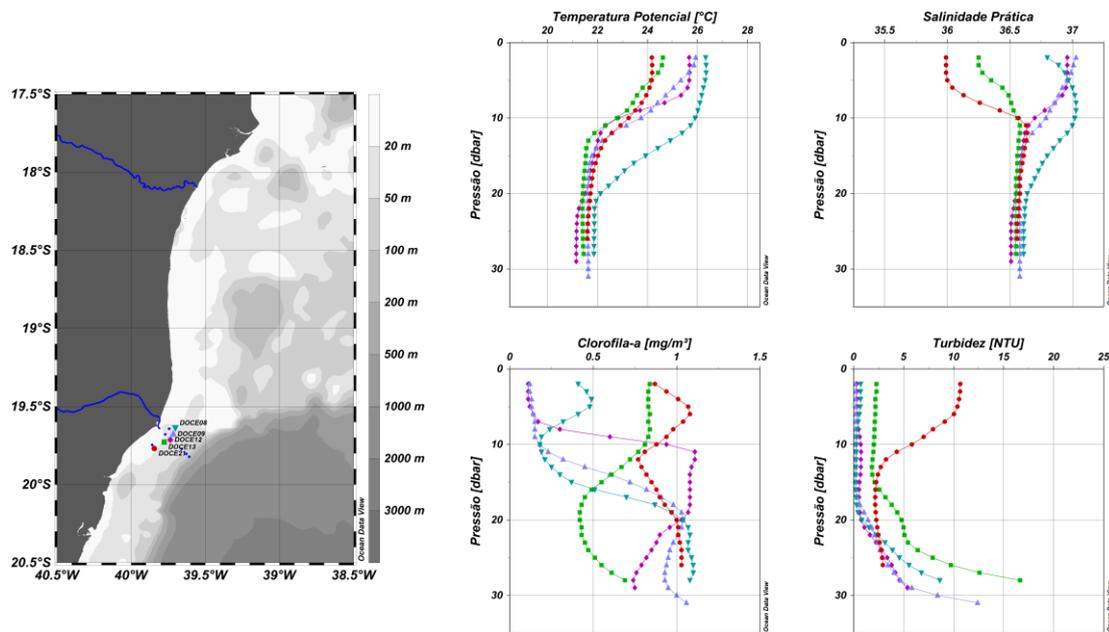


Figura 12: Perfis verticais de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, clorofila-*a* (mg/m³) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas localizadas ao longo da isóbata de 30 m.

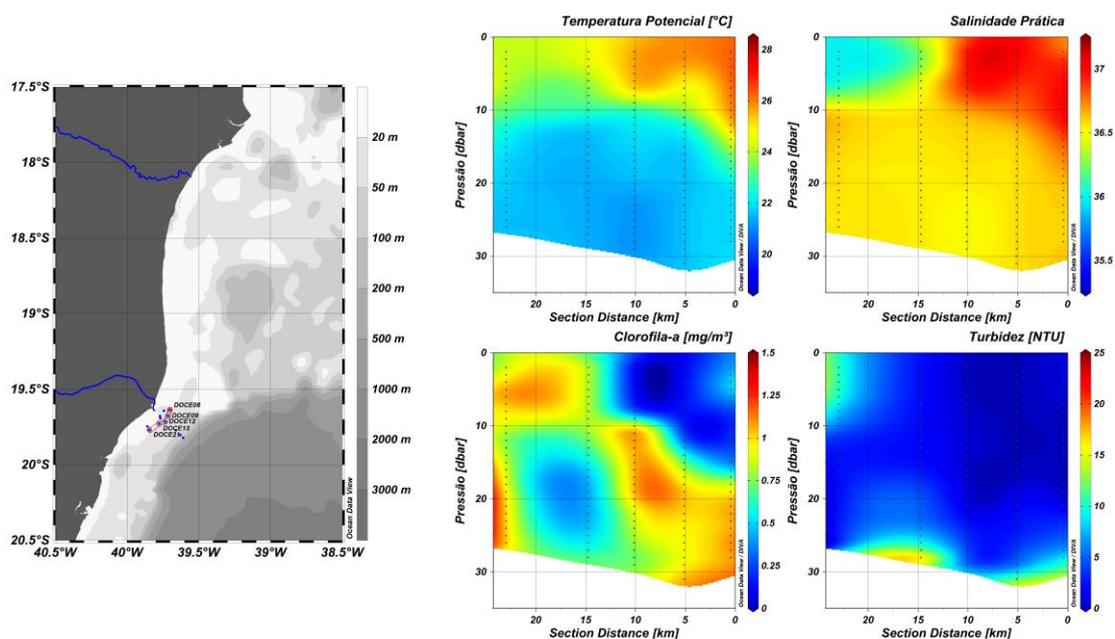


Figura 13: Seções verticais paralelas à costa de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, clorofila-*a* (mg/m³) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas localizadas ao longo da isóbata de 30 m.

II PERNADA

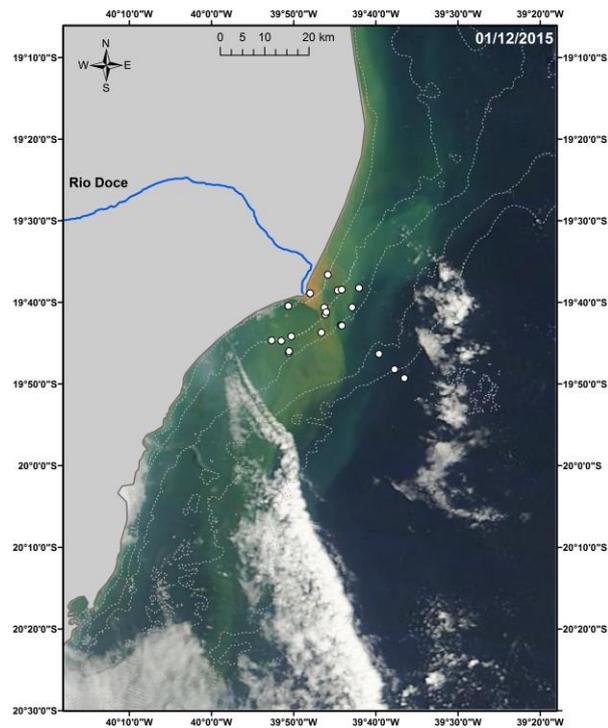


Figura 14: Imagem obtida pelo sensor MODIS/Aqua no dia 01 de dezembro de 2015. Os pontos brancos destacam as estações oceanográficas realizadas realizadas nesta pernada.

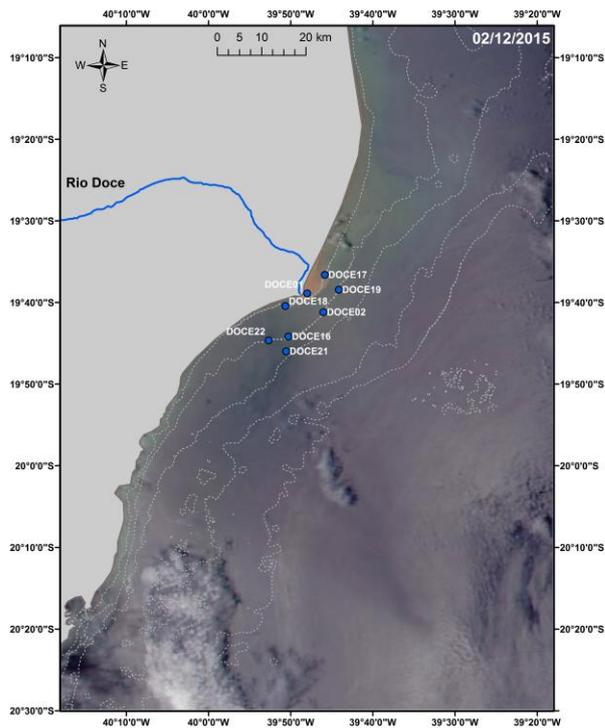


Figura 15: Imagem obtida pelo sensor MODIS/Aqua no dia 02 de dezembro de 2015. Os pontos em azul destacam as estações oceanográficas realizadas no dia em que a imagem foi obtida.

ARCO 10 m

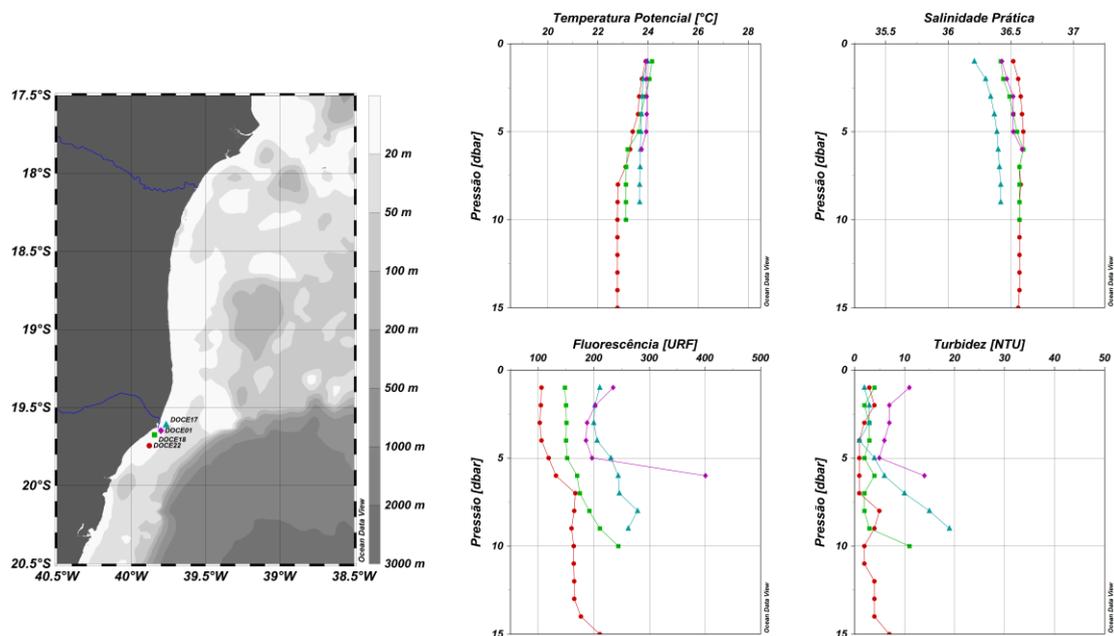


Figura 16: Perfis verticais de Temperatura Potencial ($^{\circ}\text{C}$), Salinidade Prática, Fluorescência (URF) e Turbidez (NTU) realizadas ao longo da isóbata de 10 m.

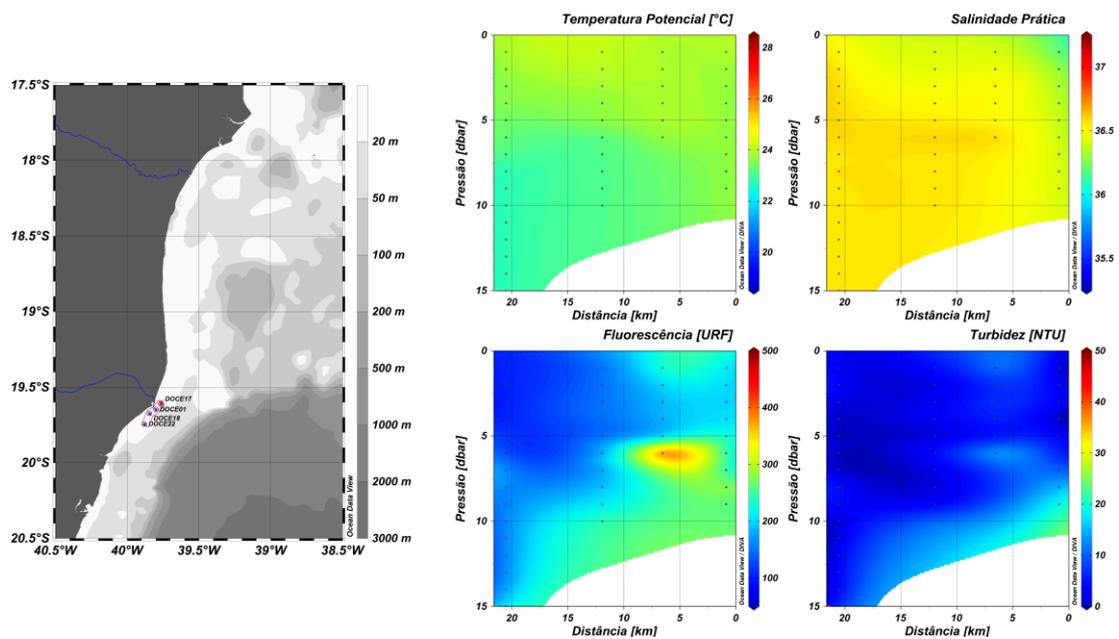


Figura 17: Seções verticais paralelas à costa de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, fluorescência (URF) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas localizadas ao longo da isóbata de 10 m.

ARCO 20 m

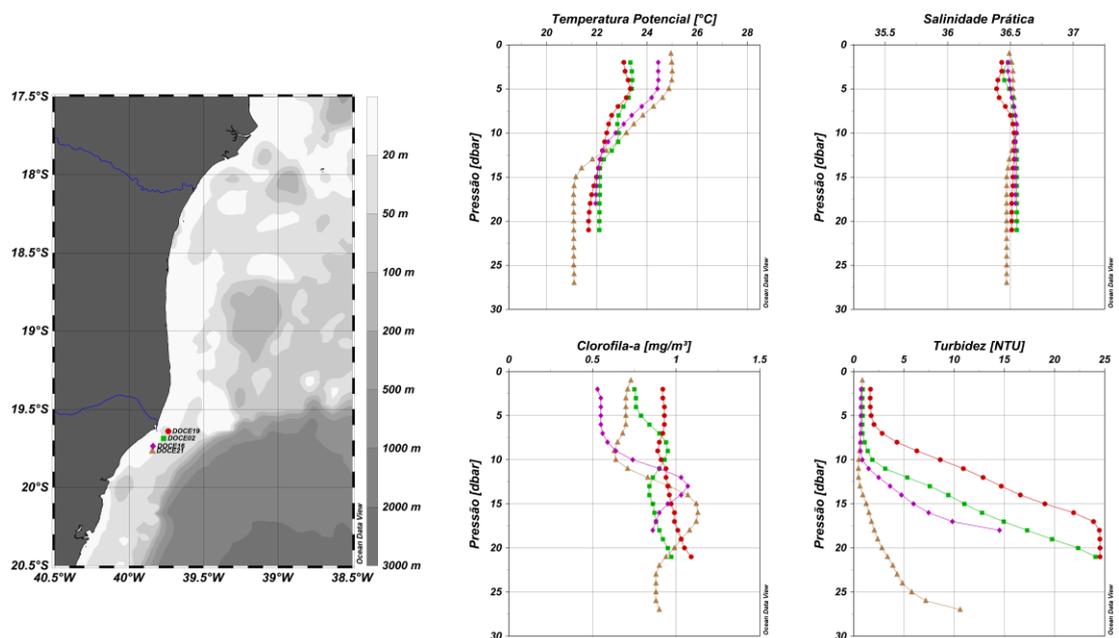


Figura 18: Perfis verticais de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, clorofila-a (mg/m^3) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas localizadas ao longo da isóbata de 20 m.

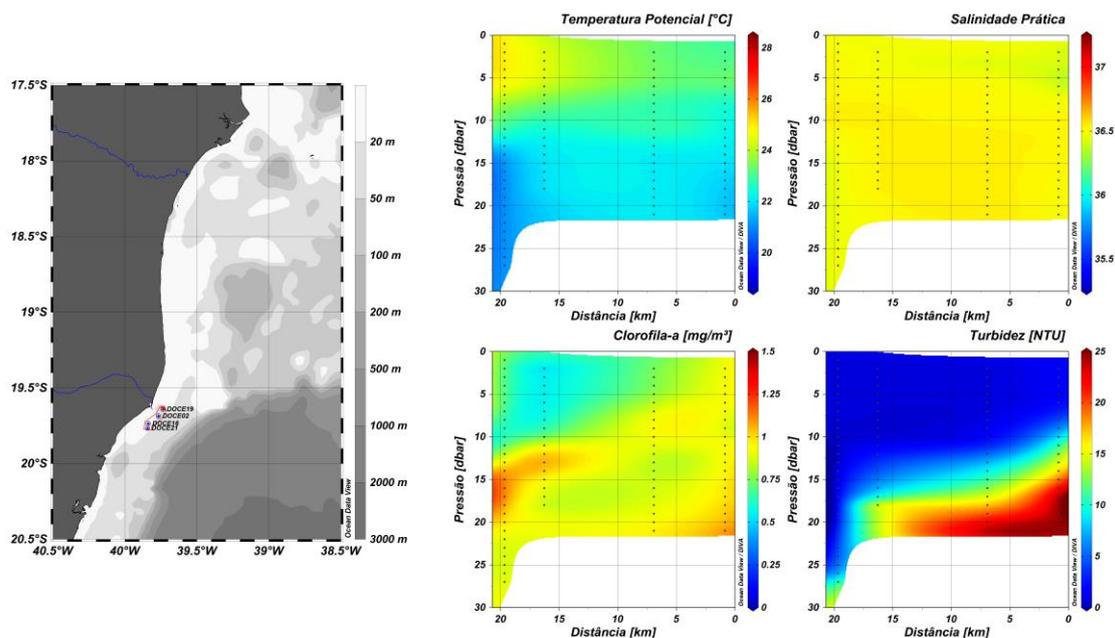


Figura 19: Seções verticais paralelas à costa de Temperatura Potencial ($^{\circ}\text{C}$), Salinidade Prática, clorofila- a (mg/m^3) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas localizadas ao longo da isóbata de 20 m.

Todas as coletas na segunda pernada foram realizadas no dia 02 de dezembro de 2015. Desta vez foram realizadas somente coletas no arco de 10 m de profundidade (com o auxílio da lancha) e no arco de 20 m com o auxílio do NOC. Vital de Oliveira. Comparando-se a imagens deste dia com as anteriores (ex., Figura 14 e Figura 15) observa-se que parece ter havido uma redução na descarga continental e mudança na direção do fluxo de saída identificado pela cor amarelo-marrom.

No arco mais interno (10 m) houve uma homogeneidade térmica (24°C) e halina (em torno de 36,5), com menor fluorescência ao sul do que ao norte da foz. A maior turbidez foi observada ao norte da foz e junto ao fundo.

Ao longo da isóbata de 20 m o padrão é semelhante, mas inverso, ao observado ao longo do arco de 30 m durante a I pernada. Distintamente do anterior, as águas mais frias estão ao norte e as mais quentes ao sul, enquanto que a salinidade foi homogênea (36,5) ao longo de toda a coluna. Em termos de turbidez, havia muito pouco em superfície, mas a sua concentração aumentou significativamente e este aumento foi diretamente proporcionalmente ao aumento da profundidade. As maiores concentrações de turbidez foram observadas junto ao fundo ao norte da foz do rio.

COLETAS REALIZADAS À BORDO DO NAVIO SOLONCY MOURA

A seguir são apresentados os resultados obtidos das coletas realizadas no final do mês de janeiro e início de fevereiro de 2016 à bordo do navio Soloncy Moura.

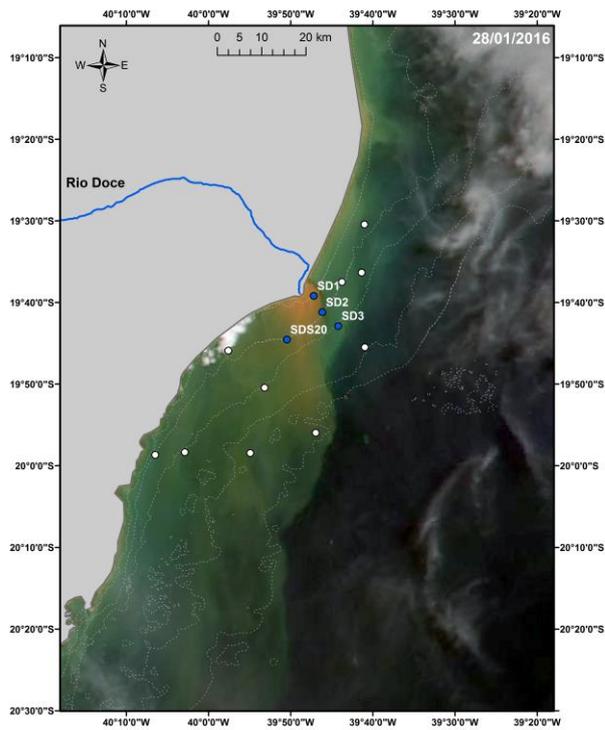


Figura 20: Imagem obtida pelo sensor VIIRS/Suomi NPP nos dias 28 de janeiro de 2016. Os pontos em azul destacam as estações oceanográficas realizadas no dia em que a imagem foi obtida.

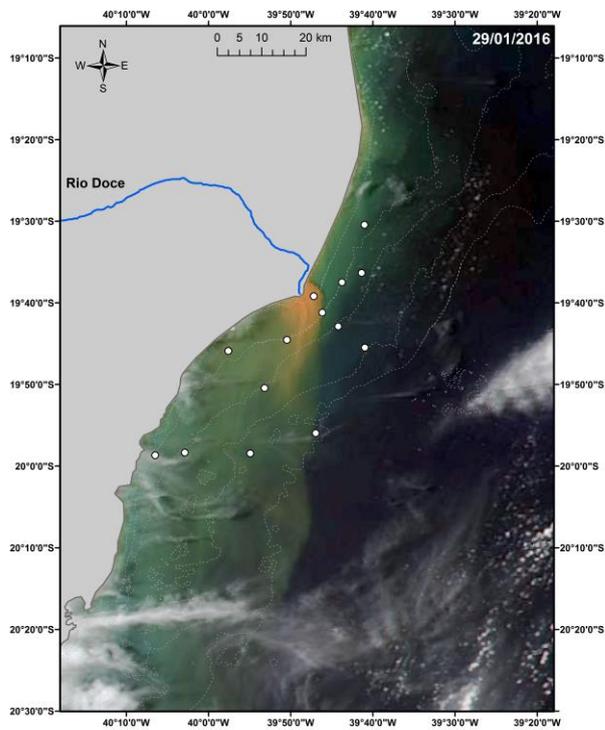


Figura 21: Imagem obtida pelo sensor VIIRS/Suomi NPP no dia 29 de janeiro de 2016. Os pontos brancos destacam as estações oceanográficas localizadas na foz do Rio Doce.

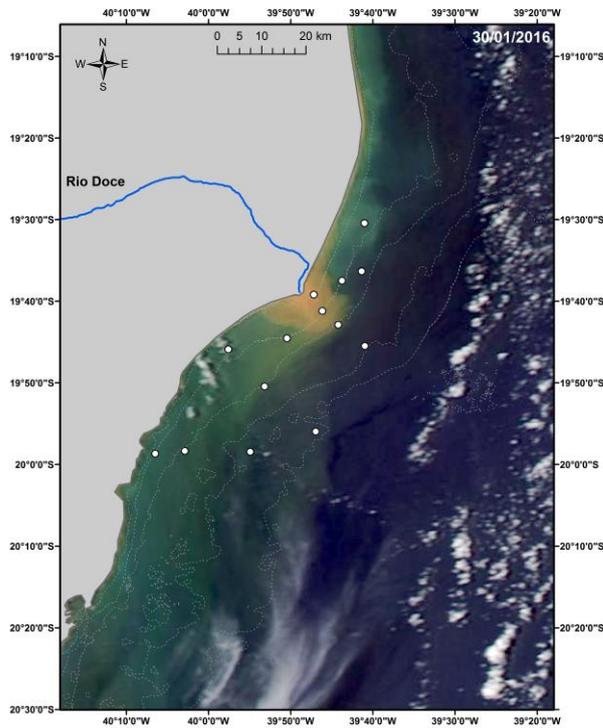
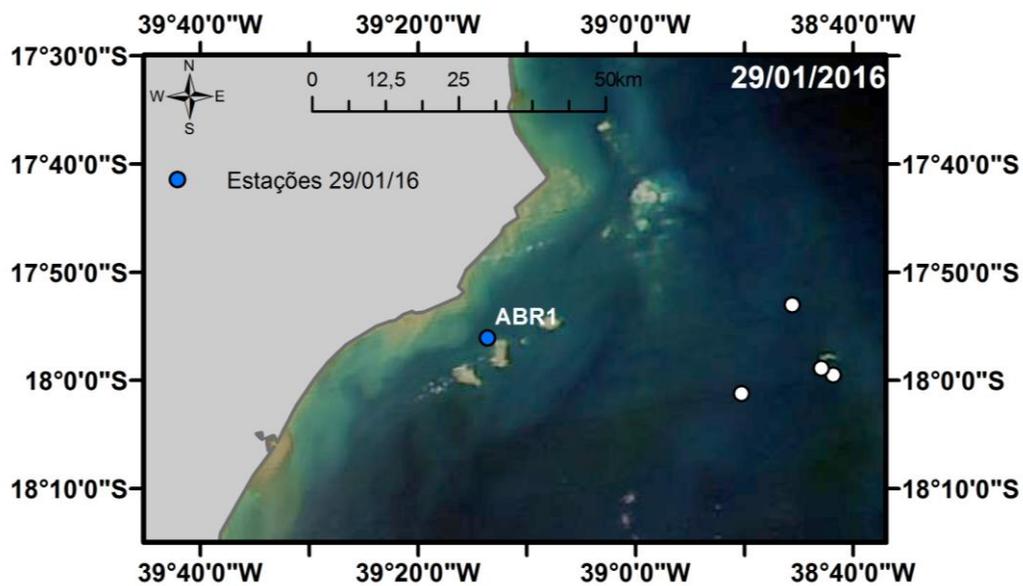


Figura 22: Imagem obtida pelo sensor MODIS/Aqua no dia 30 de janeiro de 2016. Os pontos brancos destacam as estações oceanográficas localizadas na foz do Rio Doce.



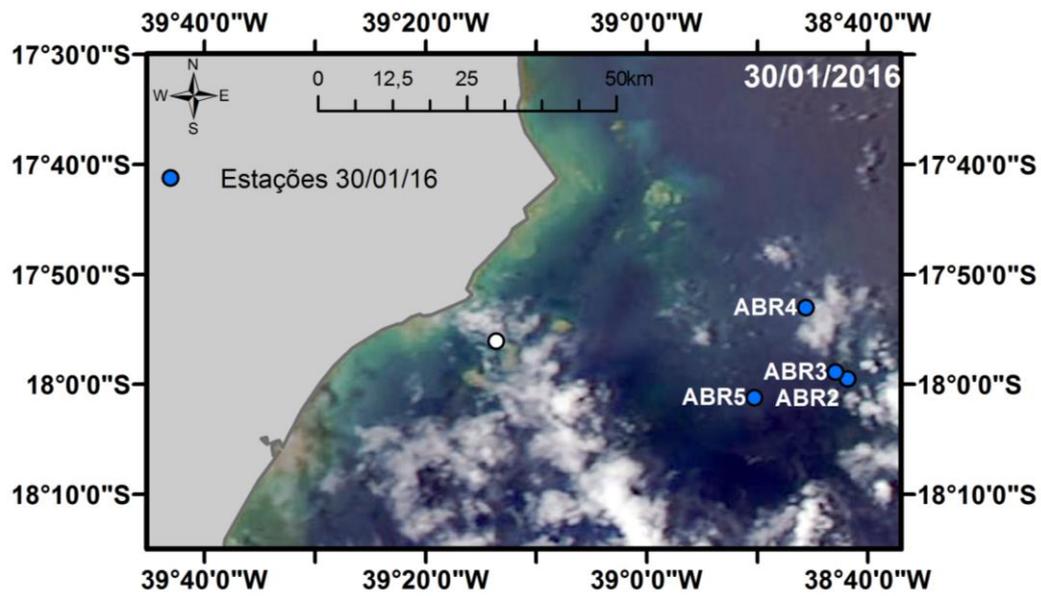


Figura 23: Imagens obtidas pelos sensores VIIRS/Suomi NPP e MODIS/Aqua nos dias 29 e 30 de janeiro de 2016, respectivamente, com foco nas estações oceanográficas realizadas na área do Parque Nacional de Abrolhos. Os pontos em azul destacam as estações oceanográficas realizadas nos dias em que as imagens foram obtidas.

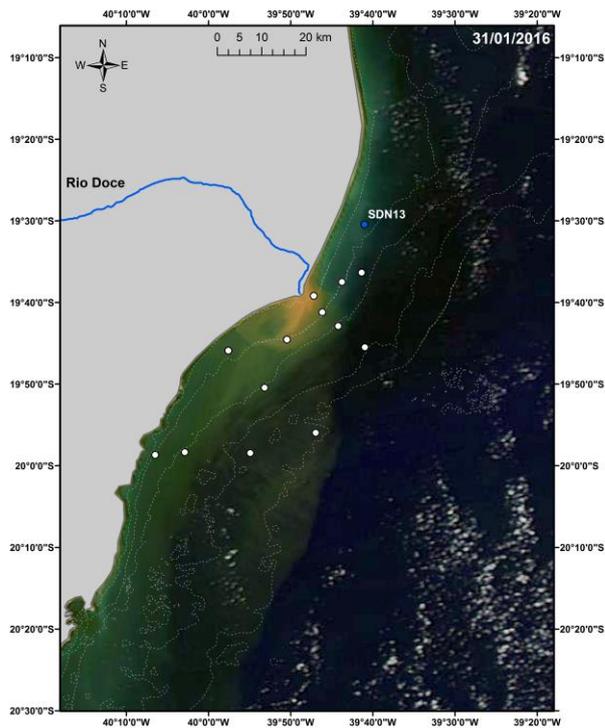


Figura 24: Imagem obtida pelo sensor VIIRS/Suomi NPP nos dia 31 de janeiro de 2016. Os pontos em azul destacam as estações oceanográficas realizadas no dia em que a imagem foi obtida.

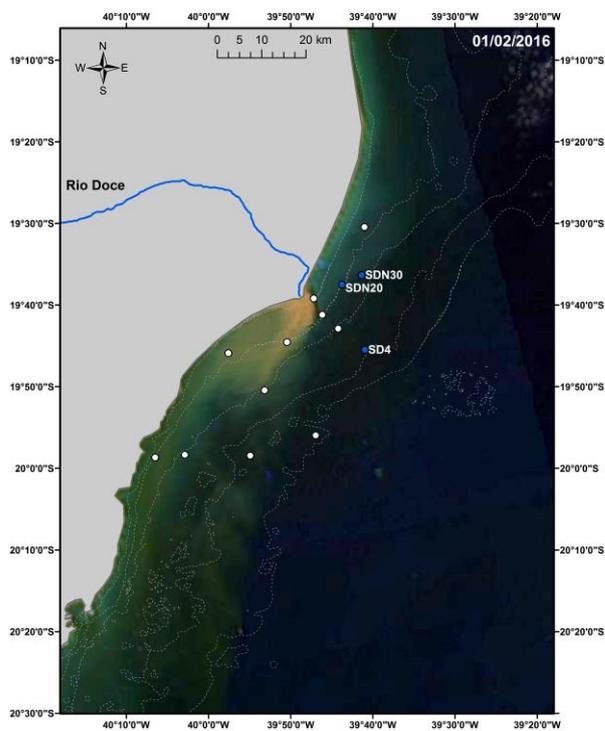


Figura 25: Imagem obtida pelo sensor MODIS/Aqua nos dia 01 de fevereiro de 2016. Os pontos em azul destacam as estações oceanográficas realizadas no dia em que a imagem foi obtida.

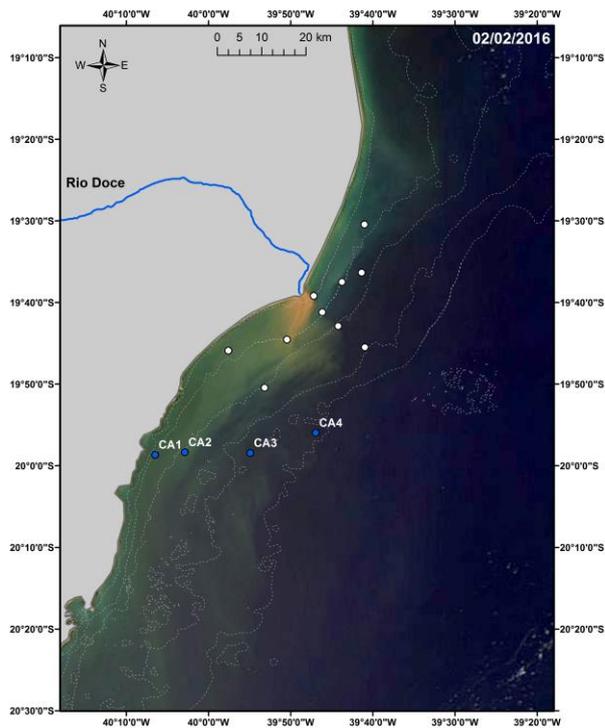


Figura 26: Imagem obtida pelo sensor MODIS/Aqua nos dia 02 de fevereiro de 2016. Os pontos em azul destacam as estações oceanográficas realizadas no dia em que a imagem foi obtida.

Região do Banco de Abrolhos

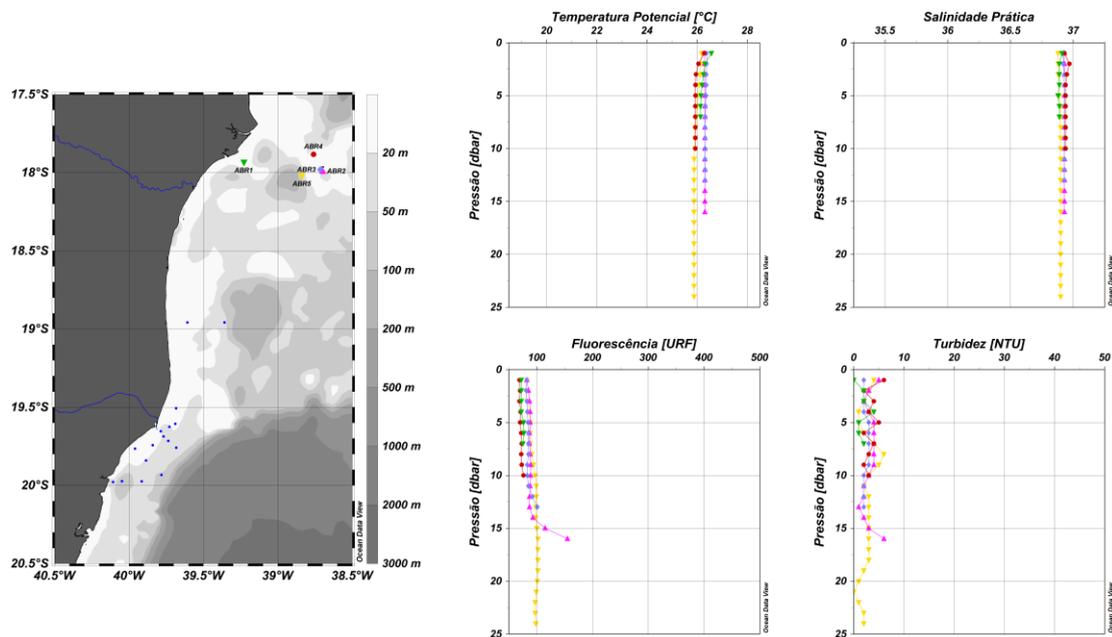


Figura 27: Perfis verticais de Temperatura Potencial ($^{\circ}\text{C}$), Salinidade Prática, Fluorescência (URF) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas realizadas no Parque Nacional de Abrolhos.

O padrão oceânico superficial é mostrado na Figura 23. Nos dados físicos amostrados na região de Abrolhos mostraram um padrão verticalmente homogêneo sem a

presença de um padrão que se diferenciou dos demais. Os valores obtidos são semelhantes aos valores "oceânicos" (isto é, típicos aqueles obtidos na região fora da pluma, ex., BN1 e BN2) obtidos na região de Barra Nova.

Plataforma continental adjacente ao distrito de Barra Nova – ES

A coleta de amostras em frente a Barra Nova foi realizada em dias diferentes. Sendo assim, as diferenças aparentes não são representativas, podendo-se assumir que representam, da mesma forma que nas coletas de Abrolhos, um padrão verticalmente homogêneo e sem feições dignas de menção.

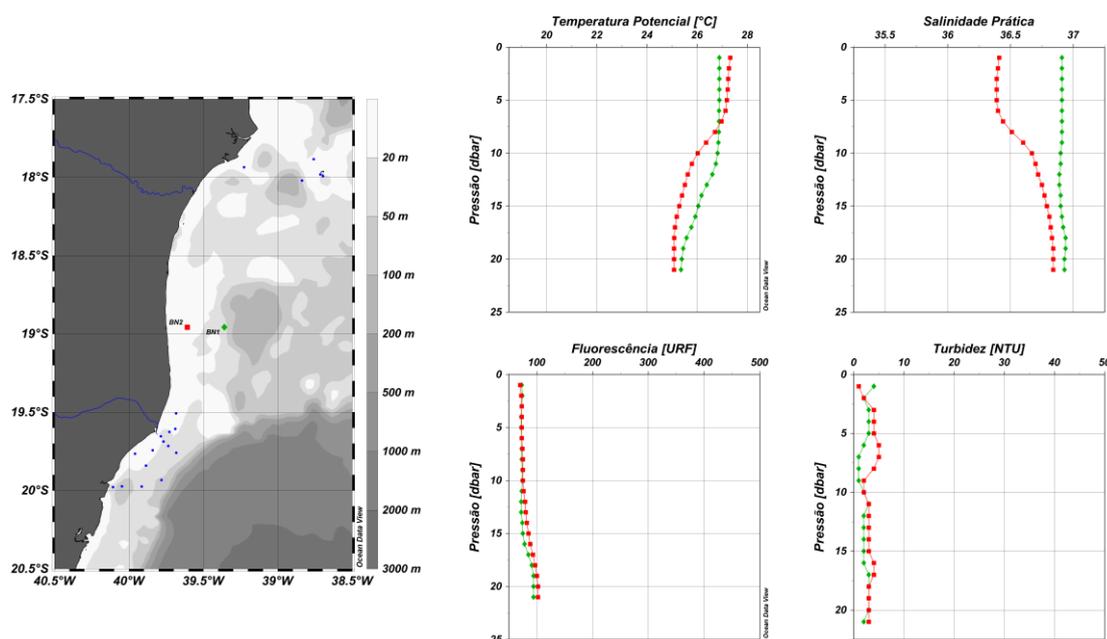


Figura 28: Perfis verticais de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (URF) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas realizadas na plataforma continental adjacente ao distrito de Barra Nova - ES.

Região da foz do Rio Doce

O padrão oceânico nos dias das coletas realizadas na região da foz do Rio Doce é mostrado na Figura 20, Figura 24, Figura 25.

Estações ao norte da foz do Rio Doce.

Distintamente do padrão verificado nas estações anteriores verificou-se uma elevada estratificação térmica que pode apresentar uma certa variabilidade mesmo para estações próximas entre si (#FRD6 – cor vinho). Deve-se notar, no entanto, que a #FRD6 está na isóbata de 30 m, enquanto que as demais são mais rasas. De certa forma, quanto mais rasas as estações, maior é o gradiente térmico. Além disso, foi nesta estação que o maior nível de turbidez ocorreu próximo ao fundo, onde a temperatura foi a menor observada (< 22 °C).

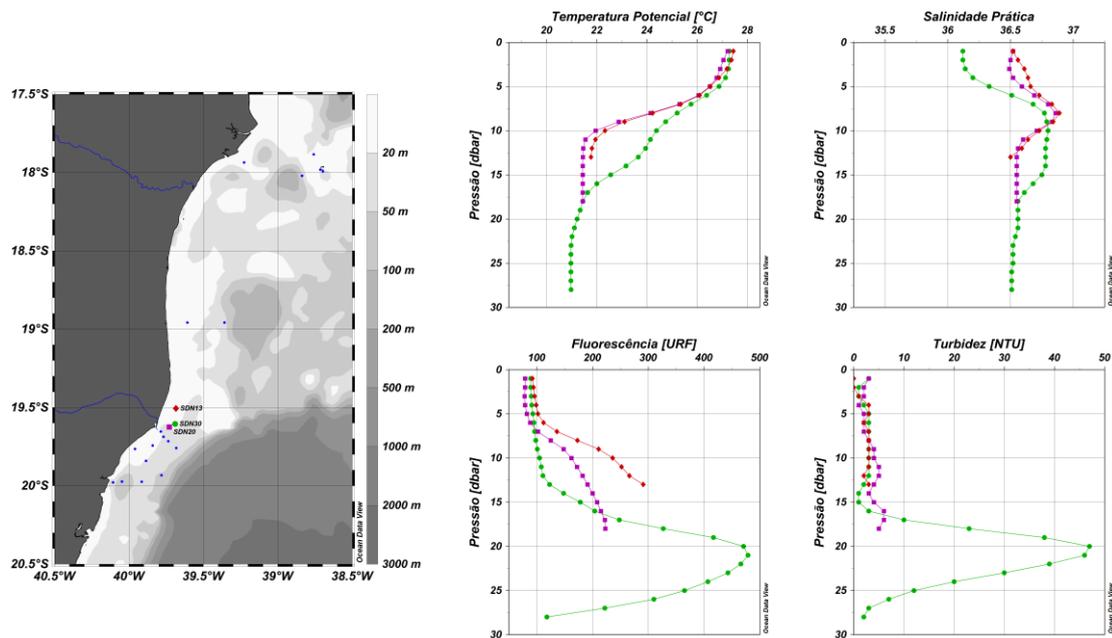


Figura 29: Perfis verticais de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (URF) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas realizadas ao norte da foz do Rio Doce.

Transecto perpendicular à foz do Rio Doce

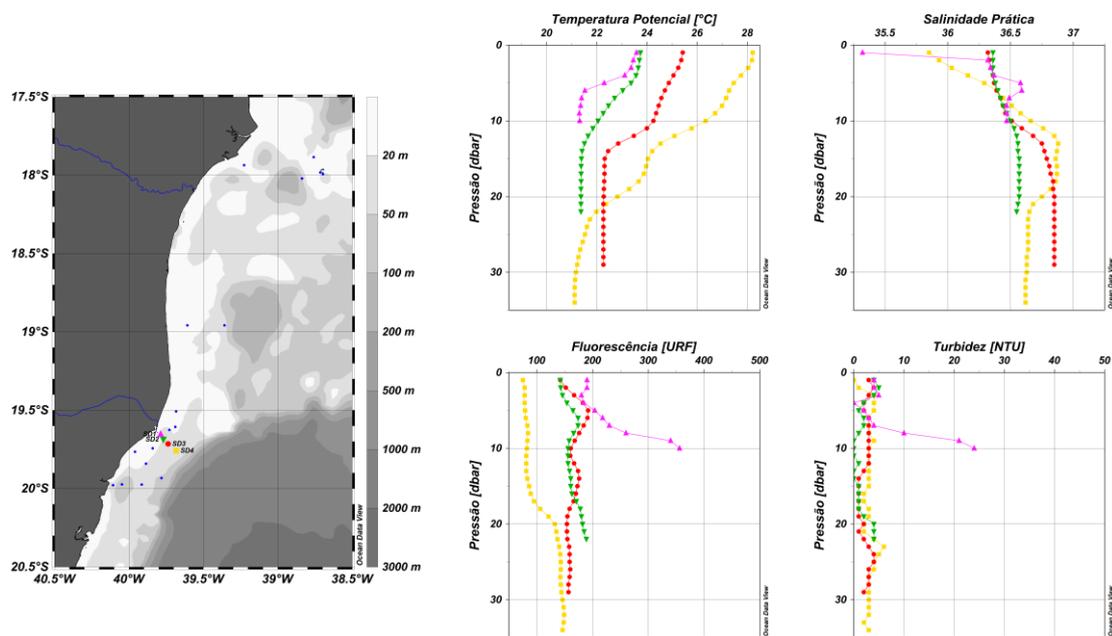


Figura 30: Perfis verticais de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (URF) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas realizadas perpendicularmente à foz do Rio Doce.

Perpendicularmente à foz do Rio Doce foi visível uma forte variação horizontal de temperatura. As duas estações mais próximas à desembocadura (claramente associadas a cor amarelada na imagem de satélite) apresentaram as menores temperaturas em superfície, enquanto que na estação mais distante da desembocadura a temperatura foi superior a 28 °C. O padrão visualizado é típico de um processo de ascensão de água fria ($T <$

22 °C) presentes em profundidades cada vez menores de acordo com a diminuição da profundidade total da estação. Coerentemente, a estação mais próxima da costa apresentou a menor salinidade superficial e o maior nível de turbidez próximo ao fundo. Embora nas demais estações o nível de turbidez esteve em torno de 5 NTU, o mesmo não ocorreu com a fluorescência. Na estação mais distante da costa a fluorescência foi a menor, aumentando abaixo dos 20 m de profundidade quando a temperatura era a menor. As demais estações localizadas dentro da mancha apresentaram os maiores níveis de fluorescência.

Transecto perpendicular à costa ao sul da foz do Rio Doce

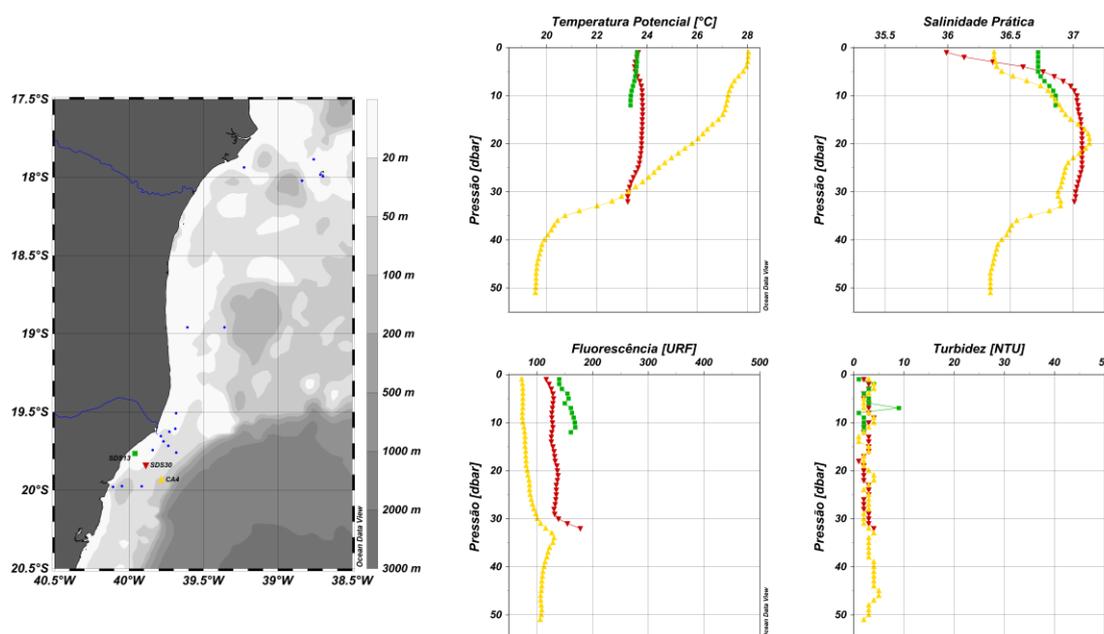


Figura 31: Perfis verticais de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (URF) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas realizadas perpendicularmente à costa ao sul da foz do Rio Doce.

Novamente ao sul da foz do Rio Doce foi verificado uma alta diferença em temperatura (> 4 °C) separando a região da plataforma média (profundidades menores que 30 m) da plataforma externa (profundidades em torno de 50 m). Ainda, as águas mais quentes estiveram associadas às menores fluorescências, embora não se tenha observado a mesma diferenciação em termos do teor de turbidez. A menor salinidade superficial observada na estação intermediária sugere que uma água oriunda da descarga continental (já misturada com a água do entorno) estivesse fluindo ao longo da isóbata de 30 m.

Região da APA Costa das Algas

Neste transecto ficou mais evidente a presença de água fria junto à costa (#CA1) associada ao maior valor de fluorescência. Nas demais estações localizadas na plataforma média e externa a superficial aumenta gradativamente enquanto que a fluorescência diminua, mas não na mesma proporção. Observa-se que abaixo da termoclina a temperatura se manteve praticamente homogênea a menor que 22 °C. Nesta região a fluorescência localmente aumentou e a salinidade voltou a decrescer depois de um incremento subsuperficial típico. Novamente não se distinguem feições típicas de menção na distribuição vertical de turbidez.

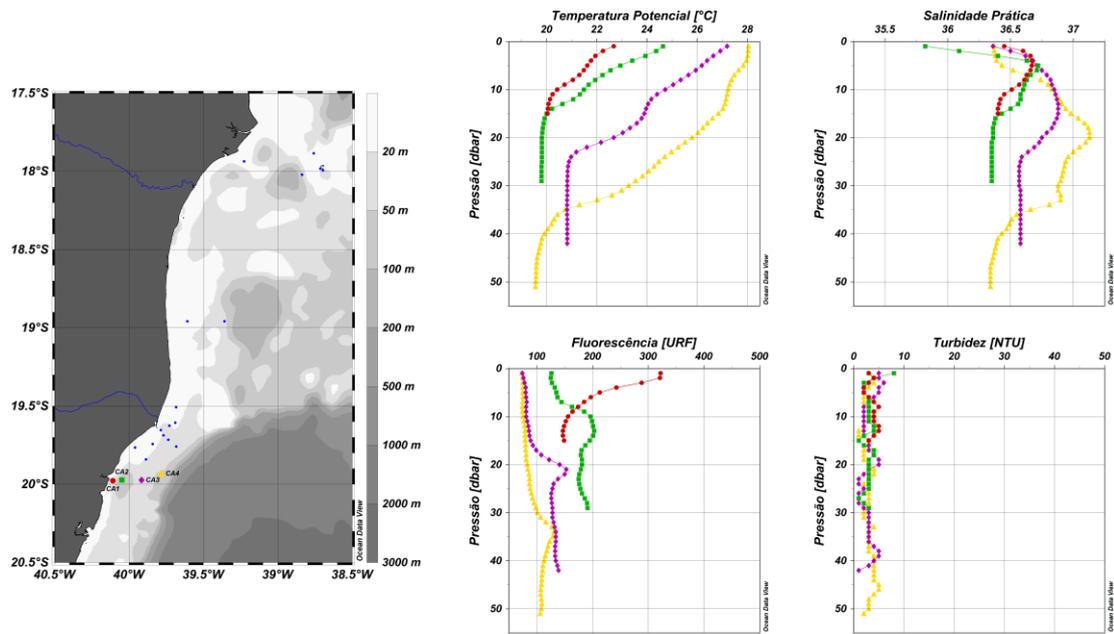


Figura 32: Perfis verticais perpendiculares à costa de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (URF) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas realizadas na APA Costa das Algas.

Transecto paralelo à costa ao longo da isóbata de 20 m

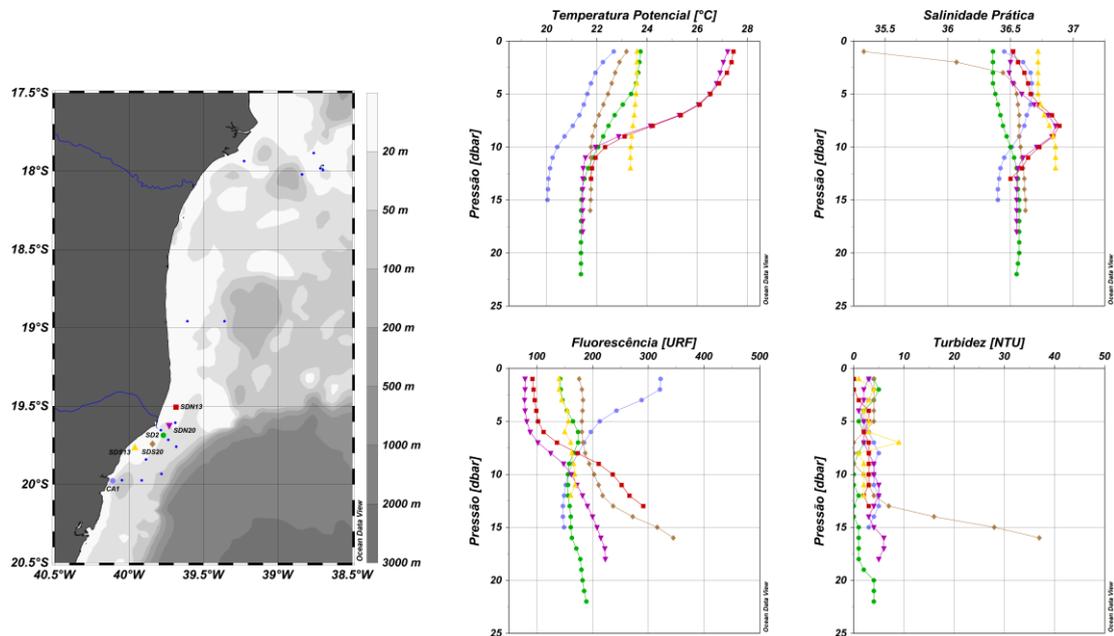


Figura 33: Perfis verticais de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (URF) e Turbidez (NTU) das estações localizadas ao longo da isóbata de 20 m.

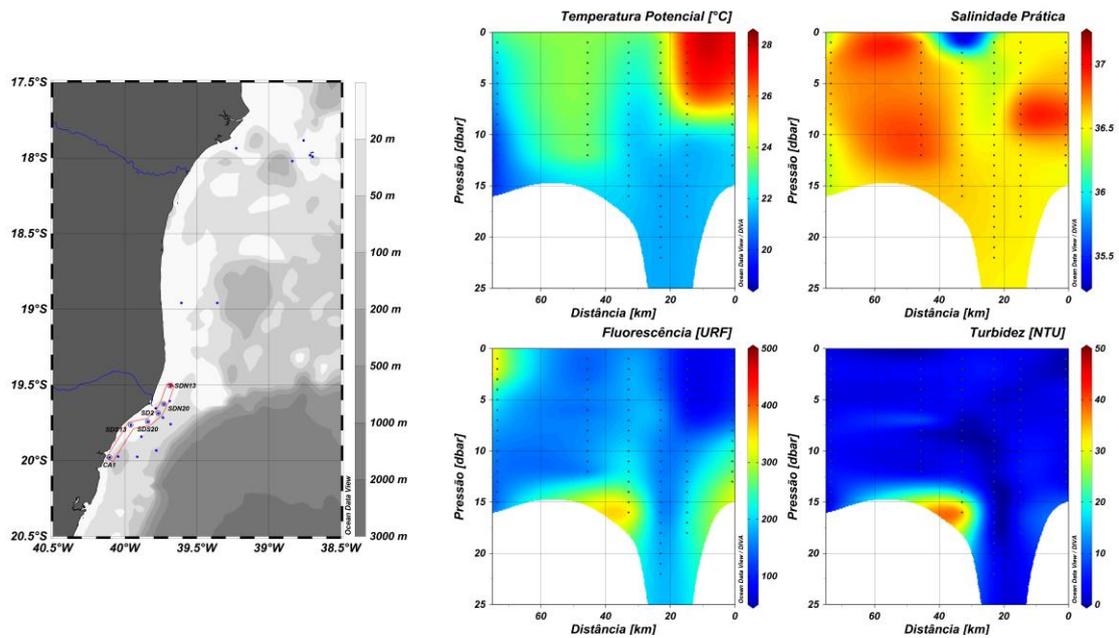


Figura 34: Seções verticais paralelas à costa de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (URF) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas localizadas ao longo da isóbata de 20 m. O ponto de origem é a estação #SDN13 localizada ao norte.

E ambas as figuras se identificou claramente um gradiente térmico superficial (nos primeiros 10 m de profundidade) Abaixo desta profundidade a temperatura foi menor e se estendeu, homogeneamente, ao longo da toda a região. Em termos de salinidade se identificou, em superfície, a presença de água menos salina associada a descarga do rio, enquanto que máximos de turbidez, junto ao fundo, foram observados tanto ao norte (#SDN13) quanto ao sul da saída de água do rio na estação #SDS20.

Transecto paralelo à costa ao longo da isóbata de 30 m

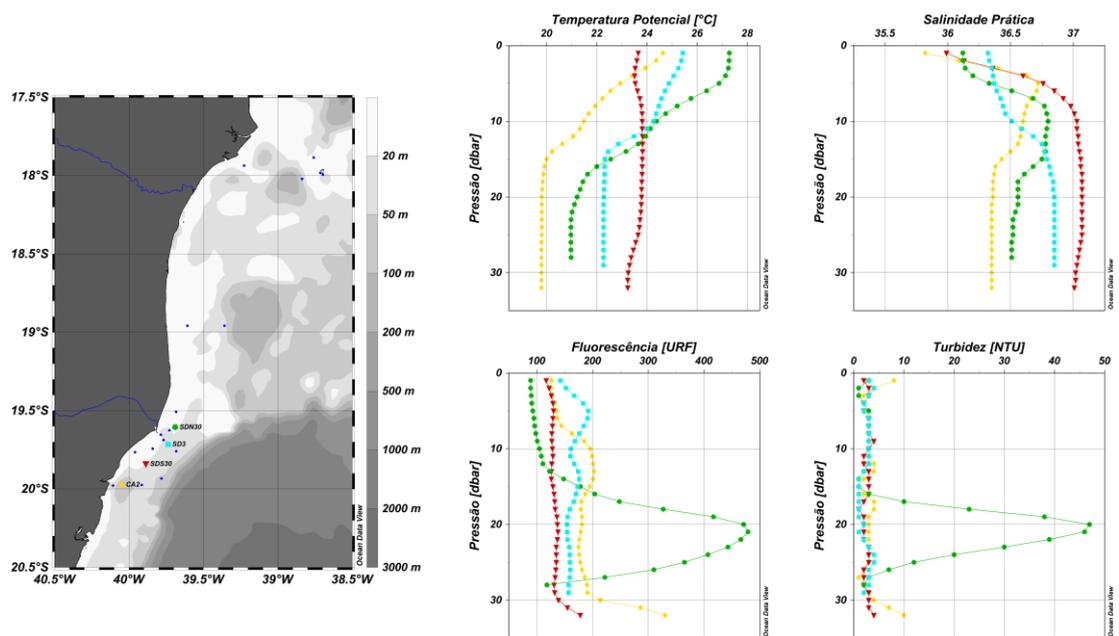


Figura 35: Perfis verticais de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (URF) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas localizadas ao longo da isóbata de 30 m

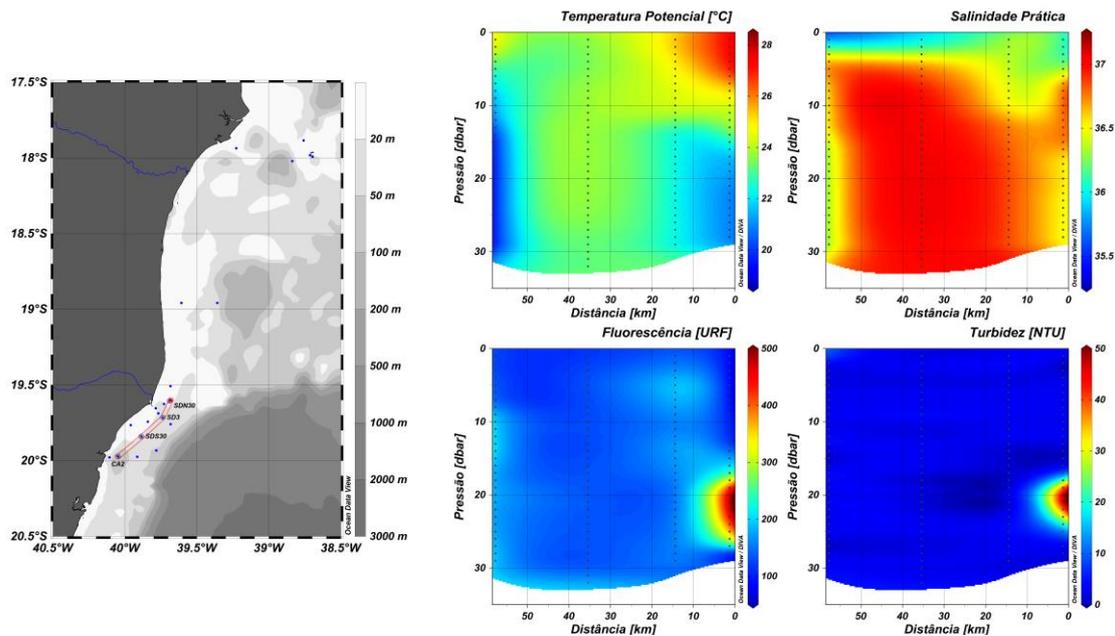


Figura 36: Seções verticais paralelas à costa de Temperatura Potencial (°C), Salinidade Prática, Fluorescência (URF) e Turbidez (NTU) das estações oceanográficas localizadas ao longo da isóbata de 30 m. O ponto de origem é a estação #SDN30 localizada ao norte.

A diferenciação térmica ao norte e ao sul da foz do rio Doce observada em 20 m não se manteve ao longo da isóbata de 30 m. A diferença entre o mínimo e o máximo valor de temperatura superficial observada permaneceu, mas ela foi variando de maneira mais ou menos constante entre esses dois extremos. A estação #SDS30 se diferenciou das demais por apresentar uma coluna de água termicamente homogênea e a maior salinidade (abaixo dos 10 m superficiais). Essa estrutura parece indicar uma entrada de água de características tipicamente tropicais que estiveram associadas com baixos valores de fluorescência relativa. Distintamente do perfil anterior, agora o máximo de turbidez no fundo somente foi visível ao norte da seção.

DISCUSSÃO

No período seguinte a chegada do rejeito de lama ao mar houve uma entrada frequente de frentes frias que alteraram o padrão meteorológico e oceanográfico na região da foz do Rio Doce (Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 14 e Figura 15). Esse padrão não é o esperado neste período e é provável que esteja relacionado com o desenvolvimento do El Niño no Oceano Pacífico Equatorial.

A ressurgência costeira foi uma feição amostrada nos três cruzeiros realizados. Nas imagens da temperatura da superfície do mar ela aparece como uma feição de água mais fria junto à costa se estendendo até (Figura 37 e Figura 39), ou ao norte, da foz do Rio Doce (Figura 38).

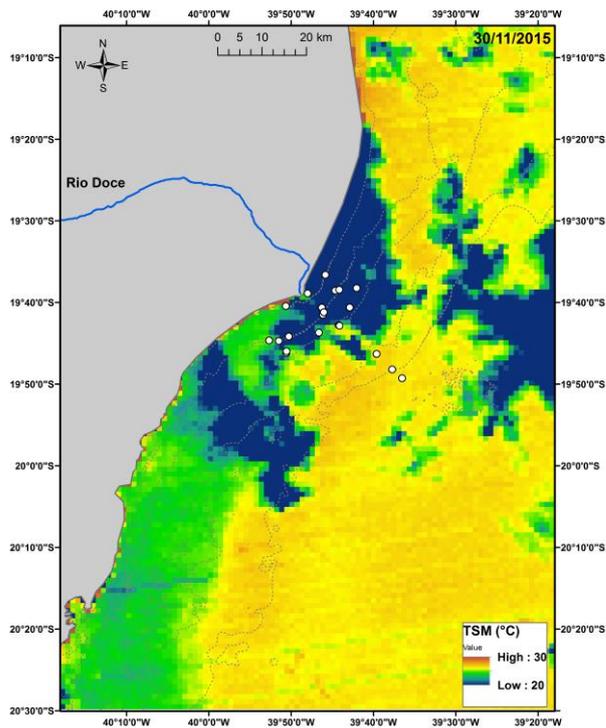


Figura 37: Temperatura da superfície do mar do dia 30 de novembro de 2015 obtida pelo sensor MODIS/Aqua. Os pontos em azul marcam as estações de coleta do referido cruzeiro.

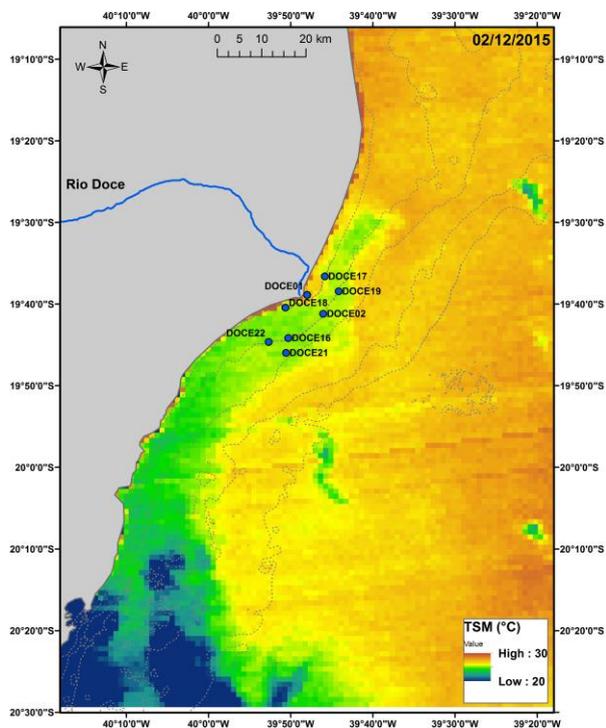


Figura 38: Temperatura da superfície do mar do dia 02 de dezembro de 2015 obtida pelo sensor MODIS/Aqua. Os pontos em azul marcam as estações de coleta do referido cruzeiro.

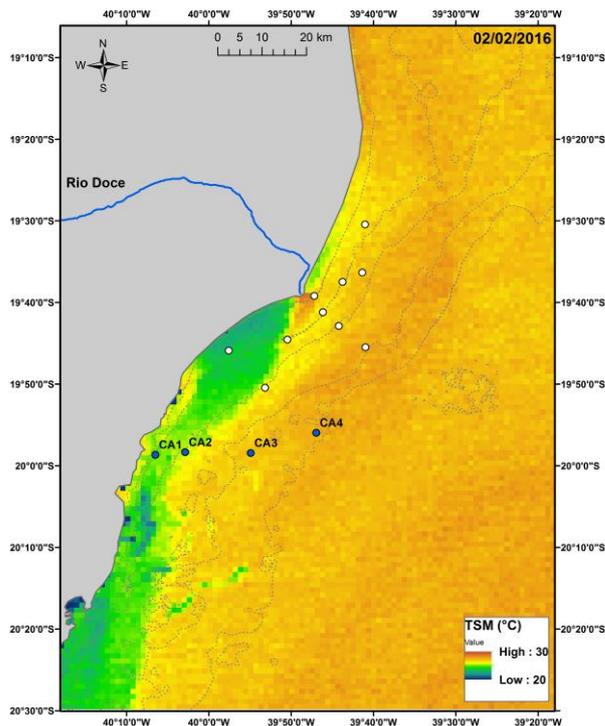


Figura 39: Temperatura da superfície do mar do dia 02 de fevereiro de 2016 obtida pelo sensor MODIS/Aqua. Os pontos brancos marcam as estações de coleta do referido cruzeiro.

Superficialmente, a região de maior diferença em temperatura parece se desenvolver entre as isóbatas de 30 m e 40 m de modo que quanto mais próximo à costa for a amostragem, mais verticalmente homogêneo tende a ser a coluna de água. Essa região marca a ascensão da água de fundo (menos salina e quente) e, quando essa água aparece em superfície se estabelece uma limite térmico bem definido entre águas de características distintas tal qual observado, por exemplo, nas imagens de TSM. Uma coluna de água verticalmente homogênea também foi observado nas estações realizadas em frente a Barra Nova e em Abrolhos. Distintamente das estações localizadas ao sul da foz do Rio Doce, nestes dois locais a água era quente, de caráter tipicamente tropical (Água Tropical), e salina.

Estudos (ex., Martins (2014), Martins (2015)) sobre a ressurgência costeira na região a associaram tanto ao padrão de cisalhamento da tensão do vento quanto ao padrão e magnitude da Corrente do Brasil. Ainda assim, foram identificados períodos quando tanto o padrão de cisalhamento de vento quanto o da corrente era favorável e, mesmo assim, não se identificou a ressurgência costeira. Outra característica identificada no estudo de Martins (2015) foi o caráter em pulsos no qual a ressurgência parece se desenvolver. Essas características conferem a região uma dinâmica complexa que ainda necessita ser plenamente entendida haja vista que a rápida mudança no padrão dinâmico parece ser uma característica da região.

Um exemplo desta alteração no padrão foi identificado na segunda pernada do cruzeiro realizado pelo NOc Vital de Oliveira. O padrão identificado na Figura 17 e Figura 19 é oposto ao observado nas Figuras 11 e 13. No dia 02 de dezembro de 2016 foram realizadas medidas de ADCP (*Acoustic Doppler Currentmeter Profile*) de casco (Figura 40). Nesta ocasião houve uma coerência no campo de corrente (nordeste) sobre a plataforma continental também identificado no campo térmico superficial da Figura 38 quando o limite da água mais fria esteve ao norte da foz do Rio Doce.

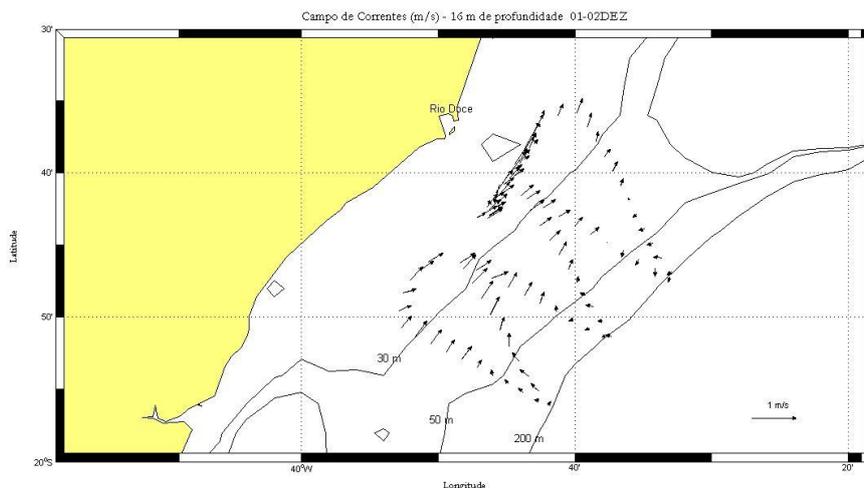


Figura 40 – Campo hidrodinâmico a 16 metros de profundidade identificado na segunda pernada do NOc. Vital de Oliveira nos dias 01 e 02 de dezembro de 2015.

Além da inversão do campo, nesse dia foi identificada uma diminuição na descarga continental, outra importante forçante nessa região. Uma intensificação na descarga continental parece, pelo menos superficialmente (primeiros 10 m de espessura), separar as áreas ao norte e ao sul da foz do Rio Doce (por exemplo, Figura 18 e Figura 33), tanto pela menor salinidade quanto maior temperatura (ex., Figura 39) associada a descarga do rio. De fato, as coletas realizadas à bordo do navio Soloncy Moura foram realizadas após um período de maior precipitação na região de drenagem do Rio Doce.

A descarga continental aliada à ressurgência acabam por determinar a estratificação termohalina vertical observada nos resultados, quer seja perpendicularmente à costa (Figura 9 e Figura 30) quanto paralelamente à costa (ex., Figura 11, Figura 13 e Figura 34). Nos transectos paralelos a água mais fria abaixo dos 10 metros superficiais parece se espalhar para além (ao norte) da última estação amostrada, mas sem chegar à Barra Nova (Figura 28). Assim, a descarga do Rio Doce poderia agir como um bloqueio hidráulico à expansão de água mais fria a menores latitudes. O limite norte desta expansão abaixo dos 10 m superficiais não foi amostrado em nenhum dos cruzeiros realizados.

Comparando-se as Figuras 38 e 39, verifica-se que na região da APA Costa das Algas pode se desenvolver um estrangulamento da feição termal superficial onde a água mais fria fluiu entre as isóbatas de 20 m e 30 m de profundidade. O resultado é visualizado na Figura 32 que claramente separa as duas estações mais costeiras daquelas amostradas sobre a água mais quente. Como esta não parece ser uma feição permanente é possível que a intensidade e o padrão de cisalhamento do vento seja importante neste caso. Médias de cinco anos de resultados numéricos de direção e intensidade de ventos foram apresentadas por Ghisolfi *et al.* (2015) para a região de Abrolhos e identificaram uma variabilidade sazonal marcante (Figura 41). Ventos mais intensos, tipicamente NE, ocorrem na primavera. Durante o verão os ventos permaneceram NE, mas com menor intensidade. O outono trouxe os ventos de SE, enquanto que no inverno os ventos variaram de NE-E a E-SE.

Do final do mês de novembro de 2015 até o início do mês de janeiro de 2016 houve uma entrada significativa de frentes frias que inverteram o padrão esperado do vento para esta época. De fato, no início do mês de janeiro de 2016 se desenvolveu um ciclone extratropical na região do Embaiamento de Tubarão que modificou rapidamente o padrão hidrodinâmico, padrão esse identificado pela inversão de direção da pluma oriunda do rio. Esta mudança ocorre rapidamente em regiões mais rasas onde, tipicamente, a coluna de água é menos

estratificada, sendo dificultada com o aumento da profundidade e a estratificação termohalina observada em decorrência do processo de ressurgência que se desenvolveu na região.

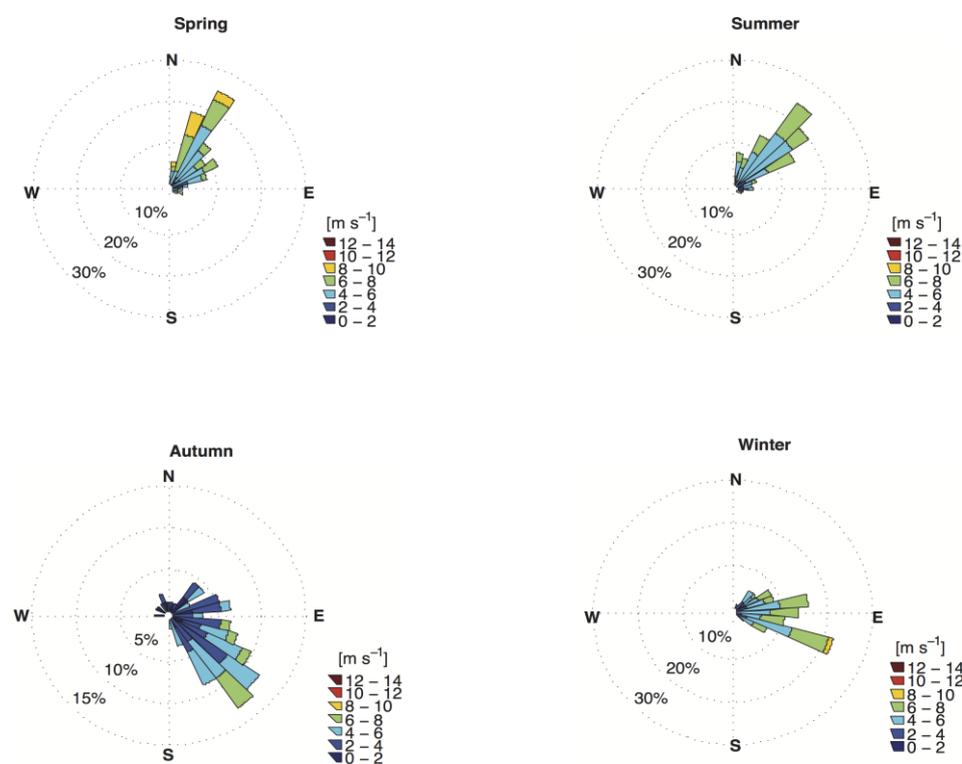


Figura 42: Rosa dos ventos sazonal para a área de Abrolhos no período 2005-2010. Fonte: Ghisolfi *et al.* (2015).

Em geral, as estações que amostraram águas quentes e salinas apresentaram os menores níveis de fluorescência, enquanto que nas águas frias as concentrações foram maiores, em acordo com as menores e maiores concentrações de nutrientes associados a essas águas. Maiores valores de fluorescência também foram encontrados nas estações e profundidades onde a turbidez foi maior. Embora não se descarte a influência da turbidez nesses resultados, eles também podem decorrer de maiores teores de nutrientes associados com a descarga continental.

Em média, se observou que os maiores níveis de turbidez foram encontrados próximo ao fundo. A dinâmica da sedimentação e do transporte de sedimento está além do escopo tratado neste estudo, mas é possível que, a estratificação termohalina atue para manter o material abaixo da pycnoclina que se desenvolveu na plataforma média e externa em razão da ressurgência costeira.

Aos gradientes termohalinos observados nas Figuras 37, 38 e 39 associa-se o desenvolvimento de uma corrente (jato) ao qual poderá ocorrer cisalhamento vertical da velocidade paralela à costa. Se esse processo se desenvolver (ainda não há medidas de velocidade *in situ*) ele adiciona uma complexidade a mais à dinâmica local afetando, por exemplo, a dispersão e o transporte de sedimentos no local.

Apesar de não existirem ainda medidas *in situ* de corrente que poderiam evidenciar a ocorrência ou não dessa dinâmica, pode-se lançar mão dos resultados numéricos para examiná-la. Na Figura 42 é apresentado o resultado de uma seção vertical perpendicularmente à costa na região da foz do Rio Doce. Observa-se que junto ao fundo

(profundidade entre 35 e 40 m, 20 km da costa) se desenvolve velocidade positiva (N) oposta à direção superficial (dirigida para sul/sudoeste). De fato, esse aspecto ainda necessita ser melhor avaliado, quer seja nos resultados da modelagem ou por observação *in situ*.

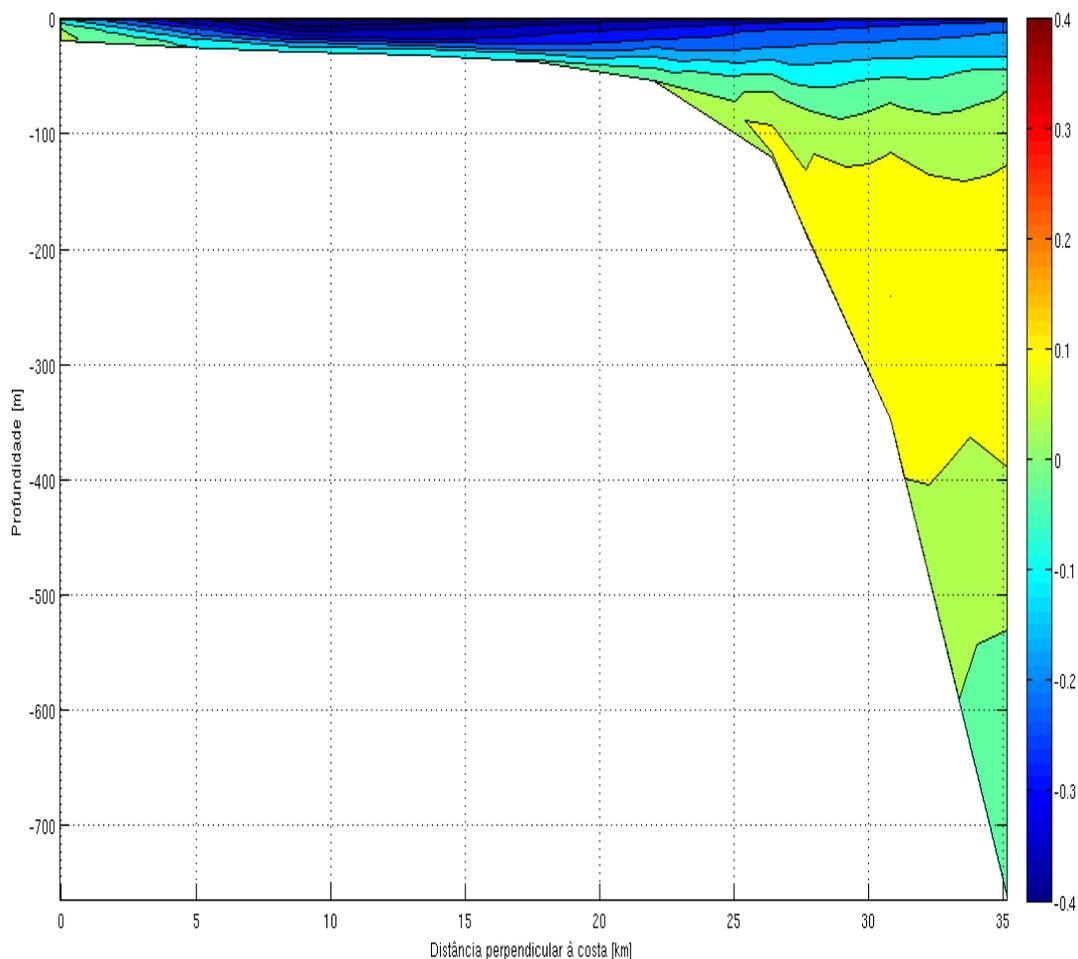


Figura 42: Seção vertical de velocidade paralela à costa (componente V – [m/s]) perpendicularmente à costa na região da foz do Rio Doce. Valores positivos (N)/negativos (S) referem-se estão de acordo com a componente Y do sistema cartesiano de eixos.

Finalmente, a Figura 43 e Figura 44 mostra o resultado os resultados prévios das simulações realizadas com o modelo biogeoquímico PISCES para o dia 30/01/2016 para a concentração nitrato e de clorofila-*a*, respectivamente. Os resultados mostrados não tem a intenção de ratificar um padrão para esses componentes na região; ao invés eles devem ser visualizados como potenciais resultados que podem ser obtidos como o uso deste modelo.

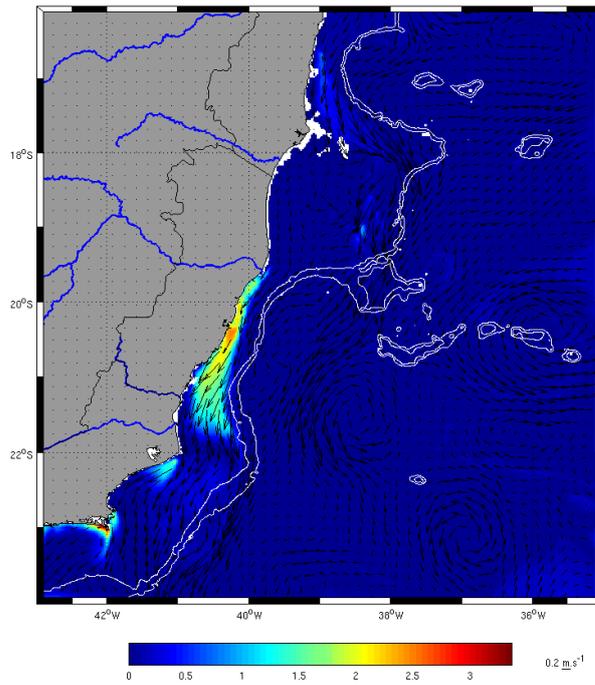


Figura 43: Resultado do modelo ROMS/PISCES de nitrato ($\mu\text{mol.L}^{-1}$) do dia 30/01/2016 sobreposta ao campo de velocidade superficial. As linhas brancas representam as isóbatas de 200 e 1000 m.

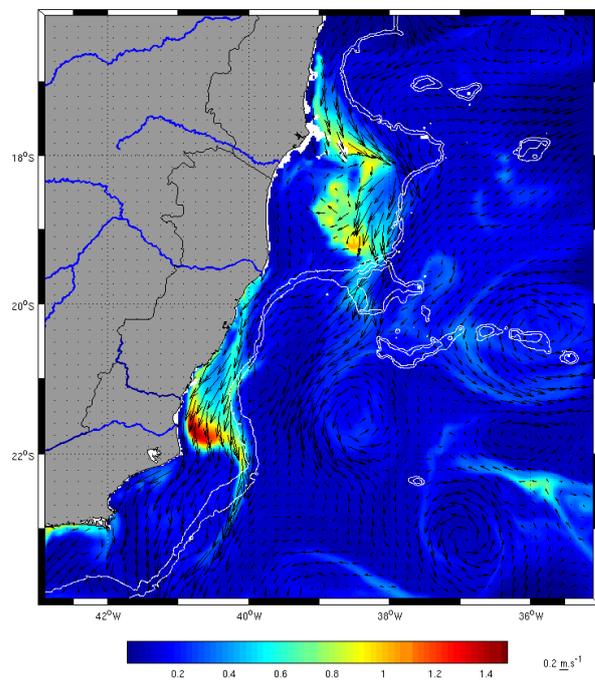


Figura 44: Resultado do modelo ROMS/PISCES da concentração de clorofila-a do nanofitoplâncton (mg.m^{-3}) do dia 30/01/2016 sobreposta ao campo de velocidade superficial. As linhas brancas representam as isóbatas de 200 e 1000 m.

CONCLUSÃO

Os resultados das coletas realizadas durante a primavera e o verão mostram que a ressurgência costeira é um processo permanente na região da foz do Rio Doce. Como resultado deste processo e da descarga continental se produz um padrão tanto horizontal quanto vertical de estratificação termohalina, o qual pode influenciar na dinâmica e padrão de dispersão do material em suspensão.

O padrão e a intensidade do cisalhamento do vento (local ou remoto) é outra forçante importante na região e condiciona o padrão de dispersão da pluma principalmente na região da plataforma interna (profundidades menores que 10 m). No entanto, à medida que a área da dispersão da pluma aumenta a dinâmica de mesoescala não pode ser descartada e necessita, obrigatoriamente, ser considerada na simulação numérica da dinâmica oceanográfica e dos aspectos biogeoquímicos na área.

REFERÊNCIAS

Ghisolfi, R D; da Silva, M P; Santos, F T; Servino, R N; Cirano, M e Thompson, F L (2015) - **Physical Forcing Mechanisms Controlling the Variability of Chlorophyll-a over the Royal-Charlotte and Abrolhos Banks—Eastern Brazilian Shelf**. PLOS ONE
DOI:10.1371/journal.pone.0117082

Martins, T R (2014) - A Corrente do Brasil no Embaiamento de Tubarão – Oceano Atlântico Sudoeste. Dissertação de mestrado. UFES.

Martins, B S (2015) – A ressurgência de Vitória. Dissertação de mestrado. COPPE-UFRJ