

**Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da
Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região
Marinha e Costeira Adjacente**

Material Suplementar Ambiente Marinho

Tema: Modelagem

RT- 44/ NOV 23

RSE2023 PMBA/Fest

Vitória,

Novembro de 2023

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	3
2	RESULTADOS DOS INDICADORES	3
2.1	TURBIDEZ/ CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO NA COLUNA D'ÁGUA ...	4
2.2	SALINIDADE NA SUPERFÍCIE DA COLUNA D'ÁGUA.....	9
3	REFERÊNCIAS	12

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

O histórico de malha e frequência amostrais do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) abrange informações de suma importância para o balizamento do presente programa, uma vez que passou por modificações ao longo do tempo, visando melhor atender aos objetivos do PMBA/Fest. Estas alterações foram aprovadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) por meio de: (1) ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição) e (2) Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

As modificações implementadas se encontram nos seguintes Materiais Suplementares: 1) **MS – Malha e Frequência amostral**, onde as diferentes malhas e frequências amostrais são apresentadas nas abas “Ano 1”, “Transição”, “Novo Ciclo” e “Histórico Frequências” e 2) **MS – Mapas das malhas amostrais**, com a espacialização histórica referente às malhas amostrais dos Ambientes. Como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, “Ano 1” se refere às estações amostrais coletadas entre setembro de 2018 e setembro de 2019, “Transição” às estações entre outubro de 2019 e julho de 2022 e “Novo Ciclo” referente às estações amostrais coletadas a partir de agosto de 2022, à exceção do grupo da Ecotoxicologia, que iniciou a amostragem referente ao Novo Ciclo em janeiro de 2023.

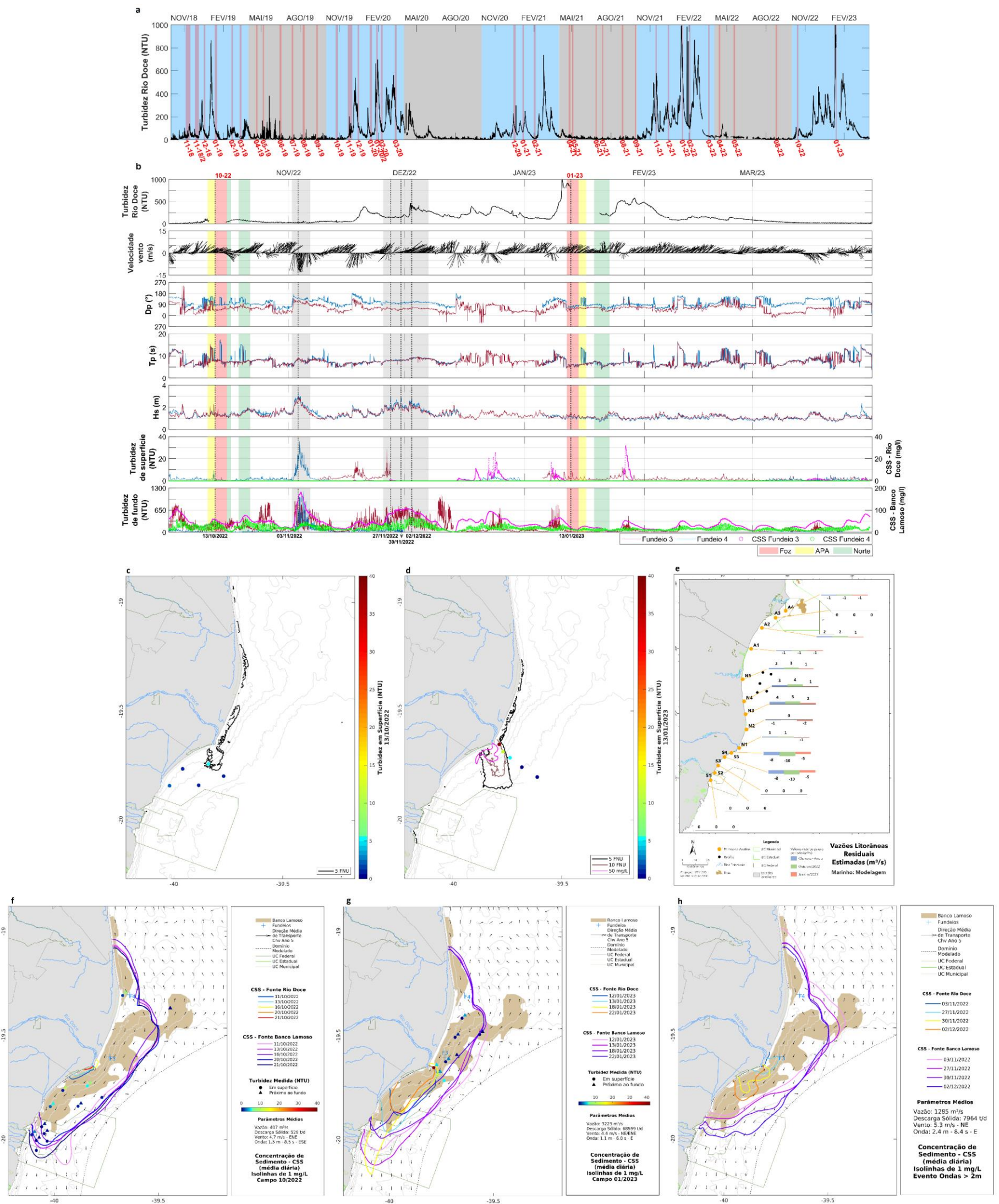
2 RESULTADOS DOS INDICADORES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest e obtidos ao longo do monitoramento (setembro/2018 – março/2023) na área ambiental I. Vale ressaltar que, os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar e sintetizar a historicidade dos resultados, interpretação e conclusões do monitoramento, promovendo o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade, além de configurarem importantes ferramentas de suporte aos gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

Os indicadores do PMBA/Fest vêm se consolidando ao longo do monitoramento e, seguindo a proposta estabelecida desde o Relatório Anual de 2022 (RA2022), a apresentação dos resultados será exclusivamente a partir da apresentação dos indicadores, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua variação espaço-temporal de forma mais direta e objetiva como se segue:

2.1 TURBIDEZ/ CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO NA COLUNA D'ÁGUA

Figura 1: Turbidez/Concentração de sedimento em suspensão na coluna d'água



1a. Variação horária de turbidez (NTU) medida na estação automática RDO-16 Boia (Linhares - ES) do Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos da Fundação Renova (PMQQS) para todo o período do PMBA/Fest (outubro/2018 a março/2023). As faixas verticais vermelhas destacam os períodos de realização das campanhas de coletas de dados *in situ* do Ambiente Marinho no Setor Foz. As áreas azuis e cinzas indicam os períodos chuvosos e secos, respectivamente.

1b. Séries temporais medidas durante o Período Chuvoso do Ano 5 (outubro/2022 a março/2023). Da porção superior à inferior: (1) Variação horária de turbidez (NTU) medida na estação automática RDO-16 Boia (Linhares - ES) do PMQQS; (2) Série temporal horária de ventos (m/s - notação meteorológica), provenientes da reanálise do *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) para o ponto 39,75°O e 19,75°S (ponta da seta do vento localizada no eixo x); (3) Variação temporal da Direção de Pico de Ondas – Dp (°) medida no Fundeio 3 (vermelho) e no Fundeio 4 (azul); (4) Variação temporal de Período de Pico de Ondas - Tp (s) medida no Fundeio 3 (vermelho) e no Fundeio 4 (azul); (5) Variação temporal da Altura Significativa de Ondas – Hs (m) medida no Fundeio 3 (vermelho) e no Fundeio 4 (azul); (6) Variação temporal da Turbidez em superfície (NTU) medida no Fundeio 3 (vermelho) e no Fundeio 4 (azul) e variação temporal da concentração de sedimentos em suspensão da pluma do Rio Doce (CSS Rio Doce – mg/l) simulada pelo modelo para a localidade do Fundeio 3 (rosa) e do Fundeio 4 (verde); (7) Variação temporal da Turbidez de fundo (NTU) medida no Fundeio 3 (vermelho) e no Fundeio 4 (azul) e variação temporal da concentração de sedimentos em suspensão ressuspensa do banco lamoso (CSS banco lamoso – mg/l) simulada pelo modelo para a localidade do Fundeio 3 (rosa) e do Fundeio 4 (verde). Os períodos de realização das campanhas de coletas de dados *in situ* do Ambiente Marinho são destacados pelas faixas verticais vermelhas (Setor Foz), amarelas (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz) e verdes (Setor Norte). As faixas verticais em cinza destacam os eventos de ressuspensão por ondas. As linhas pontilhadas verticais indicam os dias: 13 de outubro, 03, 27 e 30 de novembro de 2022 e 02 e 13 de dezembro de 2022, em ordem cronológica, dias em que a altura significativa das ondas foi superior a 2 m.

1c. Área de abrangência da turbidez superficial ≥ 5 FNU (delimitada pela isolinha preta) obtida através de sensoriamento remoto no dia 13 de outubro de 2022 (MODIS/Aqua). Os pontos em escala de cor indicam os valores de turbidez medidos em superfície (NTU) durante a campanha de coleta de dados *in situ* do Ambiente Marinho nas estações amostradas neste mesmo dia.

1d. Áreas de abrangência da turbidez superficial ≥ 5 FNU (delimitada pela isolinha preta) e ≥ 10 FNU (delimitada pela isolinha marrom) obtidas através de sensoriamento remoto no dia 13 de janeiro de 2023 (MODIS/Aqua). A área de abrangência da concentração de sedimentos em suspensão ≥ 50 mg/l da pluma de sedimentos do Rio Doce obtida por simulação numérica no horário próximo à passagem do satélite neste mesmo dia é delimitada pela isolinha rosa. Os pontos em escala de cor indicam os valores de turbidez medidos em superfície (NTU) durante a campanha de coleta de dados *in situ* do Ambiente Marinho nas estações amostradas neste mesmo dia.

1e. Mapa da deriva litorânea para o Período chuvoso do Ano 5 (barras azuis) e para as campanhas 10-22 (barras verdes) e 01-23 (barras em rosa). A vazão litorânea representa a capacidade de transporte pelas correntes longitudinais geradas pelas ondas, obtidas pela formulação adaptada de Longuet-Higgins (1970). Nestes cálculos foram utilizadas informações de altura significativa e direção de pico das ondas obtidos através de simulações numéricas em pontos semelhantes às estações de

medições amostradas pelo Tema Praias do Ambiente Costeiro. **1f.** Mapa de dispersão da pluma de sedimentos do Rio Doce e da pluma gerada a partir da ressuspensão de sedimentos finos provenientes do banco lamoso para os dias de realização da campanha 10-22. As isolinhas representam as concentrações de sedimentos em suspensão iguais a 1 mg/l. As setas apontam a direção média sazonal do transporte dos sedimentos finos do banco lamoso obtida para o Período Chuvoso do Ano 5 calculada através de simulações numéricas. Os círculos e os triângulos em escala de cor indicam os valores de turbidez (NTU) medidos *in situ* para a superfície e fundo, respectivamente, durante a campanha 10-22. **1g.** Mapa de dispersão da pluma de sedimentos do Rio Doce e da pluma gerada a partir da ressuspensão de sedimentos finos provenientes do banco lamoso para os dias de realização da campanha 01-23. As isolinhas representam as concentrações de sedimentos em suspensão iguais a 1 mg/l. As setas apontam a direção média sazonal do transporte dos sedimentos finos do banco lamoso obtida para o Período Chuvoso do Ano 5 calculada através de simulações numéricas. Os círculos e os triângulos em escala de cor indicam os valores de turbidez (NTU) medidos *in situ* para a superfície e fundo, respectivamente, durante a campanha 01-23. **1h.** Mapa de dispersão da pluma de sedimentos do Rio Doce e da pluma gerada a partir da ressuspensão de sedimentos finos provenientes do banco lamoso para os dias dos eventos de ressuspensão por ondas. As isolinhas representam as concentrações de sedimentos em suspensão iguais a 1 mg/l para os dias em que a altura significativa das ondas medidas *in situ*, nos pontos dos fundeios, foi superior a 2 m (03, 27 e 30 de novembro de 2022 e 02 de dezembro de 2022). As setas apontam a direção média sazonal do transporte dos sedimentos finos do banco lamoso obtida para o Período Chuvoso do Ano 5 calculada através de simulações numéricas.

O indicador Turbidez está associado à concentração de material particulado em suspensão que é aportado pelo Rio Doce e ressuspendido do banco lamoso presente na plataforma continental do Espírito Santo. A simulação numérica do transporte de sedimento levou em consideração as duas fontes mencionadas, denominadas Rio Doce e banco lamoso, representativas da turbidez em superfície e no fundo, respectivamente. A medição desse indicador na estação automática RDO-16 do PMQQS (Figura 1a) apresentou forte correlação direta¹ com a vazão do Rio Doce na estação P21 do Ambiente Dulcícola (Figura 2a) ao longo do PMBA/Fest, confirmando ser ele um importante elo entre os Ambientes Dulcícola e Marinho. Ao longo de todo o monitoramento, observou-se que os períodos chuvosos se caracterizaram pelo incremento nos valores de turbidez medidos na estação automática RDO-16 (Figura 1a). Adicionalmente, o período chuvoso do Ano 5 apresentou valor máximo de turbidez (em torno de 1000 NTU, medido no dia 14 de janeiro de 2023) que tinha sido observado anteriormente apenas no período chuvoso do Ano 4 (outubro/2021 a março/2022) (Figura 1a). Diferente do comportamento que foi observado como característico dos períodos chuvosos, a campanha 10-22 foi realizada em um cenário de baixos valores de turbidez (Figura 1a e 1b1) e menor dispersão da pluma de sedimentos provenientes do Rio Doce (Figura 1c e Figura 1f), características típicas de períodos secos. No período de realização desta campanha, somente no ponto localizado a 10 km ao sul da foz do Rio Doce foram registrados valores de turbidez iguais ou superiores a 5 NTU nos 3 primeiros metros

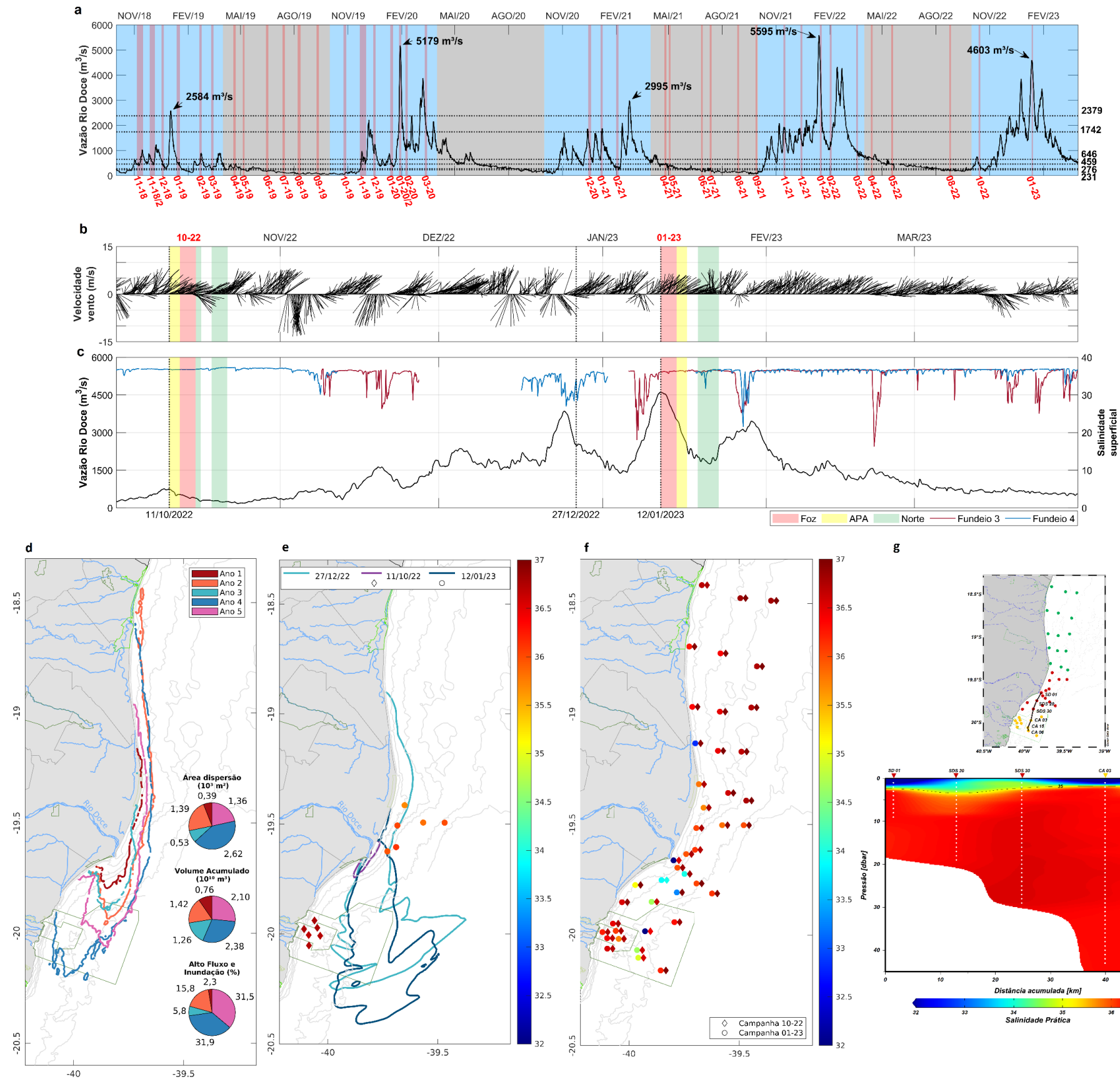
¹ O valor de r varia entre ± 1 , sendo os valores positivos indicativo de uma correlação direta e valores negativos de uma correlação indireta. Quanto mais próximo de ± 1 , maior é a intensidade da correlação.

da coluna d'água (Figura 1c). No dia 13 de outubro (imagem de satélite disponível) a isolinha de 5 FNU indicou que a pluma foi advectada para *offshore* ao sul da foz em função da atuação do vento NE no dia da coleta, alcançando cerca de 13 km da desembocadura do Rio Doce (Figura 1c). Ressalta-se que para este dia valores de 10 FNU não estavam presentes na turbidez estimada por sensoriamento remoto, assim como a isolinha de 50 mg/l adotada para representação da pluma do Rio Doce modelada, em função das condições fluviais vigentes (Figura 1c). Para o dia 13 de outubro a área total da dispersão de turbidez foi de aproximadamente 749 km² (Figura 1c). Por outro lado, a área total no dia 13 de janeiro de 2023 atingiu aproximadamente 1.175 km² (Figura 1d), conferindo à campanha 01-23 um cenário típico dos períodos chuvosos. Este aumento de 56% na área de dispersão pode ser atribuído ao máximo de vazão (Figura 2a) e turbidez (Figura 1a) registrados no Ambiente Dulcícola para o período chuvoso do Ano 5. Devido à predominância de ventos NE, pode-se observar que no dia 13 de janeiro a turbidez superficial ≥ 5 FNU se dispersou a cerca de 24 km para região *offshore* ao sul da foz (Figura 1d). A pluma do Rio Doce modelada também teve sua dispersão para sul coincidindo com as medições *in situ* de turbidez superficiais obtidas em dois pontos próximos à foz do Rio Doce e com a área da isolinha de 10 FNU obtida pelo sensoriamento remoto para o mesmo dia, apesar de se manter mais próxima da costa (Figura 1d). De acordo com a simulação numérica, o limite da dispersão da pluma do Rio Doce se manteve sobre a porção sul indicando um importante processo de aporte de sedimento finos para o banco lamoso durante o período chuvoso (Figura 1f a 1h). Além da turbidez proveniente do aporte fluvial do Rio Doce, as medições nos pontos de fundeio evidenciaram também o aumento da turbidez na coluna d'água devido à ressuspensão por ondas de um material que previamente pode ter sido disponibilizado pelo Rio Doce e sedimentado na plataforma continental (Figura 1b6 e Figura 1b7). Apesar das ondas mais energéticas serem mais frequentes nos períodos secos (e.g., FEST, 2023), eventos de ressuspensão também foram observados nos períodos chuvosos (Figura 1b3 a Figura 1b7). A modelagem da ressuspensão dos sedimentos provenientes do depósito lamoso para o período chuvoso do Ano 5 apresentou uma forte correlação direta¹ com as medições de turbidez de fundo no Fundeio 3 (Figura 1b7). Assim, os três primeiros meses do período chuvoso conservaram as características do período seco, com uma relação direta¹ entre a ressuspensão devido à ação das ondas de SE (Figura 1b3 e Figura 1b7). Dessa forma, a modelagem de ressuspensão de sedimentos corroborou para a distinção entre as características durante os períodos de realização de campanhas. Assim como definido para a vazão, a campanha 10-22 apresentou condições típicas de período seco, visto que o processo de ressuspensão de sedimentos envolveu uma área entre 2.098 e 2.182 km² (Figura 1f). Por outro lado, nos dias de realização da campanha 01-23, o modelo mostrou que houve uma redução na área da ressuspensão do banco lamoso chegando à 1.251 km², refletindo condições típicas da estação chuvosa (Figura 1g). Repetindo o padrão típico do período chuvoso, o modelo mostrou que a direção média sazonal do transporte de sedimento do depósito lamoso foi para o S (Figura 1f, Figura 1g e Figura 1h), induzido em grande medida pela ação dos ventos e ondas predominantemente de NE (Figura 1b2 e Figura 1b3). Além das campanhas, alguns eventos nos quais os valores de turbidez de fundo foram superiores a 650 NTU puderam ser registrados pelos fundeios (Figura 1b7). Ondas de SE e E, resultantes da combinação entre Hs superiores a 2 m e a entrada de *swell* (eventos de ondas com períodos ≥ 8 s), acarretaram aumentos de turbidez em ambos os fundeios

(Figura 1b3 a Figura 1b7). Durante esse período, no dia 2 de dezembro, também foi obtida a máxima ressuspensão simulada, abrangendo uma área de 2.217 km² (Figura 1h). Incrementos nos valores superficiais de turbidez foram registrados simultaneamente em superfície (Figura 1b6), a depender da magnitude dos eventos. Por exemplo, entre os dias 01 e 10 de novembro de 2022 foram registradas alturas de onda acima de 3 m (Figura 1b5) e a máxima turbidez registrada na superfície foi próximo a 40 NTU no Fundeio 4 (sem medições para o Fundeio 3) (Figura 1b6). Sabendo-se que aumentos de turbidez superficial nos fundeios ao norte da foz também são influenciados por aumentos de concentração de sedimento em suspensão do Rio Doce (CSS Rio Doce) durante inversões do vento, a modelagem numérica contribui para o entendimento desta dinâmica (Figura 1b6). Momentos cujo aumento da turbidez *in situ* é indicado, mas que não é acompanhado de um incremento na CSS Rio Doce, ressaltam o caráter primordial da ressuspensão neste processo, que também são justificados por fortes correlações diretas¹ entre ressuspensão e a turbidez de fundo (Figura 1b7), e entre a ressuspensão e a altura significativa das ondas (Figura 1b5), calculadas para o mês de novembro. Além disso, as observações sugeriram que a direção dessas ondas em relação à disposição do banco lamoso interferiu na elevação da turbidez, por vezes registrados em apenas um dos pontos de fundeio devido à sua localização (Figura 1b3 e Figura 1b7). Quando a combinação entre *swell* e o incremento de Hs resultou em ondas de E e NE, ou durante ocorrências isoladas de *swell*, oscilações de turbidez dessa magnitude foram registradas apenas no Fundeio 3 (Figura 1b3 a Figura 1b7). A dinâmica do sedimento em suspensão observada na região da plataforma continental do Espírito Santo adjacente ao Rio Doce, resulta da combinação e interação entre os processos físicos continentais e marinhos que determinam sua dispersão. Após sucessivos ciclos de sedimentação e ressuspensão, os sedimentos finos alcançam o sistema praial e passam a ser controlados pelos processos oriundos do clima de ondas, com o transporte pela deriva litorânea atuando como um importante mecanismo de transferência de sedimentos para outras regiões costeiras. A vazão litorânea estimada para o Período Chuvoso do Ano 5 demonstrou uma capacidade de transporte para N a partir da foz do Rio Doce, e para S, nas estações de medições mais ao sul (Figura 1e). Como evidenciado na análise, o transporte ocorreu predominantemente para o N nos três períodos considerados (Período Chuvoso do Ano 5 e campanhas 10-22 e 01-23) (Figura 1e), como pode ser constatado pela presença de lama na região de antepraia, ao norte da foz (RRDM, 2021). Comparando os dois eventos dentro deste período, os valores encontrados para a vazão de deriva no mês de outubro foram superiores ao mês de janeiro, em virtude da atuação de altura de ondas maiores (Figura 1b5). Nas estações mais ao sul, localizadas na Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (S1, S2 e S3 - Figura 1e), a deriva litorânea foi considerada nula em virtude da presença de afloramentos cristalinos característicos de praias de terraço de abrasão, que reduzem a energia das ondas e impedem a geração das correntes litorâneas, como descrito em relatórios anteriores pelo Ambiente Costeiro (e.g., RRDM, 2020).

2.2 SALINIDADE NA SUPERFÍCIE DA COLUNA D'ÁGUA

Figura 2: Salinidade na superfície da coluna d'água



2a. Variação horária de vazão do Rio Doce (m^3/s) medida na estação P21 (Linhares - ES) do Ambiente Dulcícola para todo o período do PMBA/Fest (outubro/2018 a março/2023). As faixas verticais vermelhas destacam os períodos de realização das campanhas de coletas de dados *in situ* do Ambiente Marinho no Setor Foz. As áreas azuis e cinzas indicam os períodos chuvosos e secos, respectivamente. As linhas pontilhadas horizontais indicam os limites que estabelecem as condições de vazão de acordo com Oliveira e Quaresma (2017), em ordem crescente: Seca Extrema, Baixo Fluxo, Seca, Normal, Úmida, Alto Fluxo e Inundação. As indicações dos valores de vazão destacam o maior valor registrado para cada um dos períodos chuvosos. **2b.** Variação horária de ventos (m/s - notação meteorológica) para o Período Chuvoso do Ano 5 (outubro/2022 a março/2023), provenientes da reanálise do *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) para o ponto $39,75^\circ\text{O}$ e $19,75^\circ\text{S}$ (ponta da seta do vento localizada no eixo x). Os períodos de realização das campanhas de coletas de dados *in situ* do Ambiente Marinho são destacados pelas faixas verticais vermelhas (Setor Foz), amarelas (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz) e verdes (Setor Norte). As linhas pontilhadas verticais indicam os dias: 11 de outubro de 2022, 27 de dezembro de 2022 e 12 de janeiro de 2023, em ordem cronológica. **2c.** Variação horária de vazão do Rio Doce (linha em preto), salinidade prática superficial medida no Fundeio 3 (linha em vermelho), localizado no Setor Foz Norte, e no Fundeio 4 (linha em azul), localizado no Setor Norte, para o Período Chuvoso do Ano 5. Os períodos de realização das campanhas de coletas de dados *in situ* do Ambiente Marinho são destacados pelas faixas verticais vermelhas (Setor Foz), amarelas (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz) e verdes (Setor Norte). As linhas pontilhadas verticais indicam os dias: 11 de outubro de 2022, 27 de dezembro de 2022 e 12 de janeiro de 2023, em ordem cronológica, destacadas pelas máximas áreas de abrangência da pluma de baixa salinidade do Rio Doce. **2d.** Área de abrangência da recorrência de 10% dos valores de salinidade iguais ou inferiores a 35 obtidos através de simulações numéricas para os cinco diferentes períodos chuvosos investigados durante a realização do PMBA/Fest. Os gráficos de pizza no canto inferior direito apresentam: os valores desta área de abrangência superficial (superior), o volume acumulado aportado pelo Rio Doce na plataforma continental (meio) e o percentual do tempo de permanência da vazão do Rio Doce nas condições de Alto Fluxo e Inundação (inferior) durante os cinco períodos chuvosos monitorados. **2e.** Área de abrangência da ocorrência dos valores de salinidade menores ou iguais a 35 para o dia 11 de outubro de 2022 (máxima entre os dias da campanha 10-22 - delimitada pela isolinha roxa), para o dia 27 de dezembro de 2022 (máxima para todo o Período Chuvoso do Ano 5 - delimitada pela isolinha azul clara), e para o dia 12 de janeiro de 2023 (máxima entre os dias da campanha 01-23 - delimitada pela isolinha azul escura). Os losangos e os círculos em escala de cor indicam os valores de salinidade medidos em superfície obtidos durante a campanha de coleta de dados *in situ* do Ambiente Marinho nas estações amostradas nos dias 11 de outubro de 2022 e 12 de janeiro de 2023, dias em que ocorreram as máximas áreas de abrangência da pluma de baixa salinidade durante a realização das campanhas 10-22 e 01-23, respectivamente. **2f.** Mapa da distribuição superficial da salinidade prática obtida durante as campanhas 10-22 (losangos) e 01-23 (círculos) para a coleta de dados *in situ* realizadas durante o Período Chuvoso do Ano 5. **2g.** Seção de salinidade obtida pela perfilagem de CTD na campanha 01-23 do Marinho Integrado durante o Período Chuvoso do Ano 5, indicada pela linha preta no mapa auxiliar na parte superior. O mapa auxiliar mostra

também a localização das estações amostrais no Setor Foz (pontos em vermelho), Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (pontos em amarelo) e Setor Norte (pontos em verde).

Compreender a dinâmica da dispersão da pluma de baixa salinidade proveniente do Rio Doce sobre a plataforma continental do Espírito Santo permite investigar o destino dos materiais dissolvidos e particulados associados ao rejeito oriundo do rompimento da barragem de Fundão (Mariana – MG) no Ambiente Marinho. Analisando os campos superficiais de salinidade obtidos a partir de simulações numéricas para os diferentes períodos chuvosos, observou-se que os baixos valores ($S \leq 35$) oriundos do aporte do Rio Doce foram encontrados tanto ao norte quanto ao sul da sua foz em resposta às condições meteoceanográficas vigentes no momento da descarga e ao volume de água doce aportado à plataforma continental (Figura 2d). Especificamente, no Período Chuvoso do Ano 5, a vazão do Rio Doce permaneceu 31,5% do tempo entre as condições de Alto Fluxo e Inundação, o que conferiu a este ano o segundo maior volume de água doce aportado na plataforma continental, inferior apenas ao do Ano 4 (outubro/2021 a março/2022) que também apresentou o maior tempo de permanência nas condições mencionadas (Figura 2d). Contudo, em termos de áreas de abrangência de 10% de recorrência de $S \leq 35$ sobre a superfície marinha, observou-se que o Ano 5 apresentou uma área inferior tanto ao Ano 4, quanto ao Ano 2 (outubro/2019 a março/2020), apesar deste último ser menor que o Ano 5 quanto ao volume aportado e ao tempo de permanência nas condições de Alto Fluxo e Inundação (Figura 2d). Essa distinção entre a área de recorrência de 10% da pluma de baixa salinidade e o volume de água doce aportado na plataforma pelo Rio desaparece quando as magnitudes dos picos de Inundação do Rio Doce são consideradas (Figura 2a). Conclui-se, então, que as maiores áreas observadas foram associadas aos períodos chuvosos com os maiores valores de vazão registrados. Além disso, a distribuição espacial dessa pluma também se relacionou com o padrão de vento desenvolvido nos períodos chuvosos durante o PMBA/Fest. O Ano 5 alcançou a segunda maior distância ao sul da foz (cerca de 44 km), inferior apenas a estimada para o Ano 4 (~ 69 km), justificado, principalmente, pela diferença no volume de água doce aportado (Figura 2d). Ambos estiveram sob uma predominância de ventos NE (não mostrado para o Ano 4). Por outro lado, o Ano 2 esteve associado ao maior número de inversões do vento (não mostrado), consequentemente resultando no maior limite ao norte dessa área de recorrência e contribuindo para que ele atingisse a segunda maior área de todo o monitoramento (Figura 2d). Analisando-se exclusivamente o Período Chuvoso do Ano 5, foram realizados dois cruzeiros hidrográficos do Marinho Integrado que amostraram diferentes condições de vazão (Figura 2c), mas semelhantes condições de vento (predominantemente NE) (Figura 2b). No período de realização da campanha 10-22, somente no ponto localizado a 10 km ao sul da foz do Rio Doce foram registrados valores de salinidade iguais ou inferiores a 35 nos 3 primeiros metros da coluna d'água (Figura 2f). Nessa campanha, a vazão do Rio Doce variou entre a condição Normal e Seca Extrema ($< 646 \text{ m}^3/\text{s}$) (Figura 2a e Figura 2c), sendo a máxima área de dispersão da pluma (~ 72 km^2) registrada no dia 11 de outubro de 2022 (Figura 2e). Já na campanha 01-23, a maior área de dispersão da pluma foi registrada no dia 12 de janeiro de 2023 (~ 2.536 km^2), significativamente maior do que a registrada na campanha anterior (Figura 2e). Nesse período, a vazão permaneceu nas condições de Inundação e Alto Fluxo ($> 1.742 \text{ m}^3/\text{s}$) e ocorreu o terceiro maior pico de vazão registrado no escopo do PMBA/Fest ($4.603 \text{ m}^3/\text{s}$, 11 de janeiro de 2023), que correspondeu a 80% do maior valor

registrado em todo o monitoramento (Ano 4) (Figura 2a e Figura 2c). Os valores de salinidade iguais ou menores do que 35 foram amostrados até no Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, ou seja, a uma distância superior a 50 km da foz do Rio Doce (Figura 2f e Figura 2g). Ao longo da coluna d'água, essa pluma de baixa salinidade atingiu até 3 m de espessura (Figura 2g). Apesar desta última campanha estar associada ao máximo de vazão registrado em todo o período destacado, a maior área de abrangência (3.195 m^2) da pluma de baixa salinidade ($S \leq 35$) sobre a plataforma continental não esteve associado a este evento, sendo registrada no dia 27 de dezembro de 2022 (Figura 2e). Nesta data, em específico, a vazão estava na condição de Inundação ($> 2.379 \text{ m}^3/\text{s}$) (Figura 2a e Figura 2c). Inicialmente, sob o efeito do vento NE (Figura 2d), a pluma foi direcionada para o sul da foz, entretanto, registrou-se a inversão na direção do vento por cerca de 2,6 dias (Figura 2d), que resultou na extensão da pluma de baixa salinidade até Barra Nova, prevista pela modelagem numérica hidrodinâmica (Figura 2e). O fato desse espalhamento ter ocorrido ao sul e ao norte da foz, sob uma elevada vazão, foi responsável para que esse dia contemplasse a maior área de todo o período, ainda que a maior vazão tenha ocorrido em janeiro. O registro de 27 de salinidade na superfície do Fundeio 4 (sem registros para F3) confirma o alcance da pluma de baixa salinidade prevista pela modelagem numérica ao norte da foz (Figura 2c). De forma geral, nas séries temporais de salinidade superficial registradas nos fundeios é possível notar que a diminuição dos valores ($S \leq 35$) estiveram estritamente associadas à condição Úmida ($> 646 \text{ m}^3/\text{s}$) e à passagem de sistemas transientes que resultam na inversão da direção dos ventos e consequentemente na advecção da pluma de baixa salinidade proveniente do Rio Doce para Norte (Figura 2b e Figura 2c). Para o período analisado, ventos S e SE foram capazes de transportar a pluma para as regiões onde estão localizados o F3 (Setor Foz Norte) e o F4 (Degredo - Setor Norte), enquanto que sob a ação da tensão de cisalhamento decorrente de ventos E e SO a pluma chegou apenas ao F3 (Figura 2b e Figura 2c).

3 REFERÊNCIAS

- AURIN, D. *et al.* Spatially resolving ocean color and sediment dispersion in river plumes, coastal systems, and continental shelf waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 137, p. 212-225. 2013.
- BASTOS, A. C.; QUARESMA, V. S.; MARANGONI, M. B.; D' AGOSTINI, D. P.; BOURGUIGNON, S. N.; CETTO, P. H.; SILVA, A. E.; AMADO FILHO, G. M.; MOURA, R. L.; COLLINS, M. Shelf morphology as an indicator of sedimentary regimes: A synthesis from a mixed siliciclastic-carbonate shelf on the eastern Brazilian margin. **Journal of South American EarthSciences**. v.63, p.125-136. 2015.
- BATTJES, J. A.; JANSSEN, J. P. F. M. Energy Loss and Set-Up Due to Breaking of Random Waves. **Coastal Engineering**. 1978
- BOSBOOM, J.; STIVE, M. J. F. **Coastal dynamics I: lecture notes CIE4305**. DELFT. 2012
- CERC. **Coastal Engineering Research Center (CERC). Shore Protection Manual (SPM)**. US Army. EUA. 1984

CHAPMAN, D.C. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. **J. Phys. Oceanogr.** 15, 1060–1075. 1985.

DELFT3D-FLOW. Delft3D-FLOW, User Manual. Deltares: Delft. The Netherlands. 725 p. 2023.

DELFT3D-WAVE. Delft3D-WAVE, User Manual. Deltares: Delft. The Netherlands. 219 p. 2023.

DOGLIOTTI, A. I. *et al.* A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 157-168. 2015.

EGBERT, G. D.; EROFEEVA, S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, 19 (2), 183–204. 2002.

FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. Relatório Semestral de Evolução do PMBA/Fest - Síntese Integrativa entre Ambientes. RT-42. Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 204 pag. 2023.

FLATHER, R. A. A tidal model of the northwest European continental shelf. **Memories de la Societe Royale des Sciences de Liege**, 6 (10), pp. 141-164. 1976.

GORDON, H. R.; McCLUNEY, W., R. Estimation of the depth of the sunlight penetration in the sea for remote sensing. **Applied Optics**, v. 14, n. 2. 1975.

GUTKNECHT E. *et al.* Coupled physical/biogeochemical modeling including O₂-dependent processes in the eastern boundary upwelling systems: application in the Benguela. **Biogeosciences**, 10 (5), 3359-3591, 2013.

HERSBACH, H. *et al.* The ERA5 Global Reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146, 1999-2049. 2020.

HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model). Consortium for data assimilative modeling HYCOM+NCODA Global 1/12o analysis [online]. Lodz: HYCOM. Disponível em: <http://www.hycom.org/dataserver/glb584analysis/>. 2011.

KOMAR, P. D.; GAUGHAN, M. Airy wave theories and breaker height prediction. **Proc. 13th Coastal Engineering Conf. ASCEM**, 405–418. 1973.

LONGUET-HIGGINS, M. S. Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves, 2. **Journal of Geophysical Research**, 75(33), 6690–6801. 1970a

LONGUET-HIGGINS, M. S. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 1. **J Geophys Res**, 75(33), 6778–6789. 1970b

McDOUGALL, T. J.; BARKER, P. M. Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox, 28 pp. SCOR/IAPSO WG127, ISBN 978-0-646-55621-5.

McTAGGART, K. E.; JOHNSON, G. C.; JOHNSON, M. C.; DELAHOYDE, F. M.; SWIFT, J. H. Notes on CTD/O₂ data acquisition and processing using Sea-Bird hardware and software (as available). The GO-

SHIP Repeat Hydrography Manual: A Collection of Expert Reports and Guidelines, IOCCP Report 15.:10pp. 2010.

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data; 2018 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. doi: data/10.5067/AQUA/MODIS/L2/OC/2018. 2018.

OLIVEIRA, K. S. S.; QUARESMA, D. S. V. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 78, p. 101-115, 2017.

ORLANSKI, I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. **J. Comp. Sci.** 21(3), 251–269. 1976.

OSADCHIEV, A. A.; ZAVIALOV, P. O. Lagrangian model for surface-advected river plume. **Cont. Shelf Res.** 58, 96–106, 2013.

PEREIRA, A.F.; BELEM, A.L.; CASTRO, B.M.; GEREMIAS, R. Tide-topography interaction along the Eastern Brazilian Shelf. **Continental Shelf Research** 25 (12–13), 1521–1539. 2005.

RAYMOND, W.H.; KUO, H.L. A radiation boundary condition for multi-dimensional flows. **Quart. J. R. Met. Soc.** 110, 535–551. 1984.

RODRIGUEZ, H. N.; MEHTA, A. J. Longshore transport of fine-grained sediment. **Continental Shelf Research**, 20(12–13), 1419–1432. 2000.

RRDM. Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual – Anexo 4 Praias. RT-20, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 2019a.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual – Anexo 3 Marinho – Modelagem Numérica. RT-19D, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 246 pag. 2019b.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Semestral de Evolução (RSE). RT-35, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 1070 pag. 2020.

RRDM, Rede Rio Doce Mar, Relatório Semestral de Evolução (RSE). RT-37, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 143 pag. 2021.

SOUZA, R. B. Oceanografia por satélites. Oficina de Textos, 2005.

SEA-BIRD ELECTRONICS. Seasoft V2: SBE Data Processing CTD Data Processing and Plotting Software for Windows XP, Windows Vista, or Windows 7. User's Manual. 2013.

VIEIRA, F. V.; BASTOS, A. C.; QUARESMA, V. S.; LEITE, M. D.; COSTA Jr, A.; OLIVEIRA, K. S. S.; DALVI, C. F.; BAHIA, R. G.; HOLZ, V. L.; MOURA, R. L.; AMADO FILHO, G. M. Along-Shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. **Continental Shelf Research**, v. 187, 103964. 2019.

WARNER, J.C. *et al.* Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method. **Ocean Model.** 8, 81–113. 2005.