

**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- 46/ JUN 24

RA2023 PMBA/Fest

Vitória,

Junho de 2024

EQUIPE TÉCNICA

Prof. Dr. Renato David Ghisolfi

Prof. Dra. Susana Beatriz Vinzon

Prof. Dr. Marcos Nicolas Gallo

Dr. Gustavo Vaz de Melo

Dr. Marcelo Di Lello

Dr. Rafael Afonso do Nascimento Reis

Dra Sabrina Aparecida Ramos da Fonseca

MSc. Diego Luiz Fonseca

MSc. Júlia Tavares Salviato

MSc. Tayná Rosa Martins Paiva

MSc. Thiago Fagundes Leão

Gabriela Corrêa Brasileiro

Dominique Joelle Silva

Juca Damásio

Lucas Oliveira

Maria Júlia Veenings

Thiago Campos Carlos

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	4
2	METODOLOGIA	4
2.1	COLETA	4
2.2	PROCESSAMENTO	5
2.2.1	Sensoriamento remoto.....	5
2.2.2	Modelagem numérica hidrodinâmica	6
2.2.3	Modelagem numérica de transporte de sedimentos.....	7
2.2.4	Estimativa da Deriva Litorânea	9
2.3	ANÁLISE.....	10
2.3.1	Dados <i>in situ</i>	10
2.3.2	Sensoriamento Remoto.....	10
2.3.3	Modelagem numérica	11
2.4	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS.....	12
3	RESULTADOS DOS INDICADORES	13
3.1	TURBIDEZ/ CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO NA COLUNA D'ÁGUA .	14
3.2	SALINIDADE NA SUPERFÍCIE DA COLUNA D'ÁGUA.....	23
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO	29
5	ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS	32
6	REFERÊNCIAS	33

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

A malha e frequência amostral do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) passou por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para atendimento 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 monitoradas 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 monitoradas 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 METODOLOGIA

A metodologia apresentada contempla o escopo em vigência no momento de entrega deste relatório, ou seja, as amostragens e análises previstas para o Novo Ciclo do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática – PMBA submetidas à Fundação Renova através do FORMULÁRIO DE APRESENTAÇÃO DE PLANO DE TRABALHO em agosto de 2022 (e dezembro de 2022 para o Tema Ecotoxicologia). Após a descrição da metodologia implementada, será apresentado um breve descritivo sobre as modificações metodológicas (parâmetros, análise de parâmetros ou grupo de parâmetros, dentre outros) que ocorreram ao longo da evolução do PMBA/Fest a fim de determinar os indicadores.

2.1 COLETA

A amostragem *in situ* é composta por dois conjuntos de dados, compreendendo amostragens espaciais, considerando pontos distribuídos na plataforma continental, e amostragens temporais, realizadas em estações fixas (fundeios). Os perfis verticais de temperatura, salinidade (estimada a partir da condutividade), turbidez, fluorescência e oxigênio dissolvido são obtidos por um equipamento CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) do modelo SBE 19plus V2 SeaCAT (*Sea Bird Electronics*) nas estações amostrais da malha do Marinho Integrado com frequência de amostragem trimestral. Esses dados passam por um pré-processamento que envolve o auxílio do *software* disponibilizado pelo próprio fabricante do equipamento (SEA-BIRD ELECTRONICS, 2013) e o MATLAB® (e.g.,

McTAGGART *et al.*, 2010). Assim, é assegurado que os dados não apresentarão valores discrepantes e/ou descontinuidades nas análises posteriores. Por fim, são estimadas outras propriedades oceanográficas a partir da temperatura, condutividade e pressão com o auxílio do pacote de rotinas *GSW Oceanographic Toolbox* desenvolvido por McDougall e Barker (2011).

Por outro lado, as séries temporais de medidas de ondas, correntes, temperatura, salinidade, fluorescência e turbidez foram obtidas durante a Transição em quatro linhas de fundeio: duas ao norte da foz do Rio Doce e outras duas ao sul. Vale ressaltar que para o Novo Ciclo do PMBA/Fest as linhas de fundeios foram reduzidas somente para as duas ao norte da foz. Cada linha de fundeio contempla uma medição junto ao fundo e outra próxima à superfície (aproximadamente a 1 m do leito marinho) e outra próxima à superfície (aproximadamente 0,5 m de profundidade na coluna d'água) dos parâmetros físico-químicos provenientes de equipamentos CTD do modelo SBE HydroCAT-EP (*Sea Bird Electronics*) em intervalos de 20 min. As medições de ondas são realizadas a cada hora e as de correntes a cada 20 min, ambas através de equipamentos ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*) colocados próximo ao fundo do modelo Signature1000 (Nortek Group) para os fundeios ao norte da foz e do modelo Signature500 (Nortek Group) para os fundeios ao sul da foz. Os dados são extraídos mensalmente dos equipamentos através da realização de atividade embarcada de coleta e manutenção. Esses dados passam por um pré-processamento que envolve o auxílio do *software* disponibilizado pelo próprio fabricante do equipamento (SignatureWaves64) e o MATLAB®, cujo são retirados os dados espúrios e as análises sequenciais.

Além das amostragens espaciais e temporais realizadas na coluna d'água, descritas acima, foi realizada uma campanha em dezembro de 2023 prevista no plano de trabalho como subsídio à modelagem numérica de transporte de sedimento. Nesse campo foram realizadas amostragens de sedimento de fundo na região que compreende a extensão do banco lamoso com o intuito de verificar as características do sedimento de fundo, quanto sua granulometria e densidade, utilizando uma draga tipo Van Veen, testemunho raso e um densímetro modelo *DensiTune* da marca STEMA, respectivamente.

Assim, os indicadores salinidade superficial e turbidez na coluna d'água são monitorados tanto nos perfis verticais como nas séries temporais dos fundeios. Neste novo ciclo está sendo realizado o processo de calibração dos turbidímetros com o intuito de transformar o sinal de turbidez em concentração de sedimento (massa/volume), tarefa realizada em laboratório com amostras de sedimentos coletadas no local dos fundeios.

2.2 PROCESSAMENTO

2.2.1 Sensoriamento remoto

Para essas análises são selecionados dados diários obtidos pelo sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), um a bordo do satélite Aqua e outro a bordo do satélite Terra (NASA, 2018). O processamento consiste na conversão de arquivos nível 1A de processamento em nível 2 e

posteriormente em nível 3, ($L1A > L1B > L2 > L3b > L3m$) utilizando o *software* SeaDAS, disponibilizado pela NASA. Nesse processamento é feita a correção atmosférica, detecção de nuvens, o cálculo dos campos de concentração de clorofila-a ([chlor-a]) e a quantificação da temperatura da superfície do mar (TSM).

Os dados de [chlor-a] são provenientes de uma análise mista das reflectâncias na banda do espectro correspondente ao vermelho, azul e verde e a profundidade da coluna d'água onde é inferido esse dado pode variar de pouco menos de um metro em mares costeiros com alta turbidez a até mais de 30 metros em oceanos profundos de baixa turbidez (GORDON & McCLUNEY, 1975; SOUZA, 2005). Já a quantificação da TSM é resultante da radiação emitida nos primeiros milímetros da coluna d'água (SOUZA, 2005).

O cálculo da turbidez superficial é feito com o *software* MATLAB® utilizando uma equação, já testada na região, proposta por Dogliotti e outros (2015), que utiliza dados de reflexão da luz nos comprimentos de onda de 645 nm (banda da cor vermelha do espectro visível) e 859 nm (reflectância no comprimento de onda no infravermelho próximo) em ambientes marinhos de alta e baixa turbidez a uma distância mínima de 750 metros da costa com resolução espacial de 250 m (DOGLIOTTI *et al.*, 2015; AURIN *et al.*, 2013).

A presença de nuvens sobre o oceano durante a obtenção dos dados pelo satélite é o principal limitante comum a todas as medidas realizadas com radiação refletida ou emitida impedindo, dessa forma, as suas quantificações.

2.2.2 Modelagem numérica hidrodinâmica

O modelo ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) é utilizado para evidenciar processos costeiros de submesoescala e mesoescala ao longo da plataforma continental do Espírito Santo e oceano adjacente.

Dois domínios numéricos com distintas resoluções espaciais são utilizados para as simulações hidrodinâmicas. No domínio de maior área (Grade 1), com resolução espacial implementada igual a $1/24^\circ$ (aproximadamente 4,6 km), cobrindo a região entre 49° e 27° W e entre 8° e 27° S. Aninhada a Grade 1, é utilizada a técnica de *downscaling two-way* numa segunda grade (Grade 2), que apresenta resolução espacial de $1/120^\circ$ (0,9 km). A Grade 2 abrange a plataforma continental do Espírito Santo entre o Banco de Abrolhos e o sul do Estado do Espírito Santo (41° e $36,4^\circ$ W e $16,7^\circ$ e $21,5^\circ$ S).

A elevação da superfície é parametrizada pela condição limite de Chapman (modo explícito) (CHAPMAN, 1985), enquanto que as parametrizações *radiation/nudging* e Flather (2D momentum) (FLATHER, 1976) são utilizadas para as componentes baroclínica e barotrópica, respectivamente. O modo *radiation* utilizado é resolvido por Orlanski (1976) e Raymond e Kuo (1984) e reproduz o fluxo de entrada e saída ao longo do contorno, bem como em diferentes profundidades da mesma localização horizontal. Um relaxamento para os traçadores climatológicos de temperatura e salinidade (T-S) é

aplicado em 5 dias no interior do domínio. A difusão horizontal harmônica ($10 \text{ m}^2/\text{s}$) é utilizada para *momentum* e os traçadores (temperatura e salinidade). Os traçadores são misturados ao longo das superfícies geopotenciais e o *momentum* é misturado ao longo dos níveis sigma. Uma camada de esponja para difusividade de 30 pontos de grade é incluída nos limites abertos da Grade 1 e 2, enquanto o coeficiente de viscosidade horizontal é mantido constante em todo o domínio ($A_h = 50 \text{ m}^2/\text{s}$). A mistura turbulenta vertical é o *Generic Length Scale* (GLS: k-kl) para os parâmetros de fechamento turbulento (WARNER *et al.*, 2005). A tensão de cisalhamento de fundo é parametrizada segundo a lei quadrática de arrasto do fundo, com coeficiente de arrasto igual a $C_d = 3 \times 10^{-3}$.

A discretização vertical adotada é de 40 camadas sigma com os parâmetros de estiramento de superfície e fundo prescritos como 6,5 e 2,5, respectivamente. A batimetria foi obtida a partir da Carta Batimétrica Geral dos Oceanos (do inglês, *General Bathymetric Chart of the Oceans* - GEBCO) com resolução espacial de 30 segundos de arco (GEBCO, 2024). As condições de forçamento de superfície incluem vento, umidade, pressão, temperatura do ar, precipitação e dados de radiação obtidos do ERA 5 - *Copernicus Climate Change Service* (C3S), quinta geração de reanálises atmosféricas de ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) (HERSBACH *et al.*, 2020), com resolução temporal de 1 hora e 31 km de resolução espacial. A forçante de maré é obtida do banco de dados global TPXO 9.0 (EGBERT & EROFEEVA, 2002), que fornece amplitudes e fases dos dez principais constituintes harmônicos de maré com resolução espacial de $1/4^\circ$ $1/4^\circ$, utilizados nos limites abertos da grade grossa (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_f e M_m). O *Hybrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM Global $1/12^\circ$, aproximadamente 9,5 km de resolução horizontal) juntamente com a reanálise do sistema de Assimilação de Dados Oceânicos Acoplados à Marinha (NCODA) (HYCOM, 2011) fornece as condições iniciais e diárias dos limites (temperatura, salinidade, elevação e velocidades).

2.2.3 Modelagem numérica de transporte de sedimentos

A hidro-morfodinâmica na plataforma continental e zona costeira são simuladas através do modelo numérico computacional DELFT3D-4 (Delft3D-FLOW, 2023; Delft3D-WAVE, 2023). O domínio modelado é estruturado sobre uma malha em coordenadas esféricas, com limite externo acompanhando a borda da plataforma continental. A malha é composta por 54.120 células de resolução espacial variável. No trecho do entorno da foz do Rio Doce, a malha recebeu um refinamento, com resolução espacial em torno de 130 m. Fora desta área detalhada, a resolução espacial é em média de 450 m.

A batimetria implementada no modelo foi extraída da digitalização das cartas náuticas da Marinha do Brasil. A porção na costa do Espírito Santo já havia sido digitalizada anteriormente (BASTOS *et al.*, 2015) e foi disponibilizada à equipe do Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LDSC/UFRJ). Já a porção da costa do sul da Bahia foi digitalizada utilizando-se as cartas nº 22700, 1310, 1311 e 1312.

Em relação às forçantes hidrodinâmicas, são considerados o efeito da maré, das ondas, do vento e da pressão atmosférica. Como condição de contorno de maré são prescritas as 10 principais constantes M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , O_1 , K_1 , Q_1 , P_1 , M_4 , MN_4 . As informações de fase e amplitude são interpoladas para os pontos nos contornos a partir da informação do modelo global FES2014 (CARRERE *et al.*, 2016; LYARD *et al.*, 2016). A simulação de ondas de gravidade na plataforma interna e região costeira foi realizada pelo módulo de ondas do DELFT3D, que utiliza o modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore). Na modelagem das ondas de gravidade são utilizadas condições de contorno geradas pelo modelo de ondas do ECMWF. Os dados disponibilizados de ondas (altura significativa: H_s ; período de pico: T_p ; e, direção média: Dir), de vento (componentes u e v da velocidade) e pressão atmosférica FORAM advindos de uma reanálise global (Hersbach *et al.*, 2020). Os dados do ERA5 são disponibilizados numa grade regular com resolução espacial de 0,25 graus e resolução temporal horária. Em relação às parametrizações sub-grade e da tensão de atrito de fundo, para o cálculo da mistura horizontal é adotado um coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal constante no domínio de $1 \text{ m}^2/\text{s}$ e para o cálculo da tensão de atrito no fundo utilizou-se a formulação de Chèzy, com um valor do coeficiente $C = 65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ constante no domínio.

A modelagem de sedimento representou seus parâmetros e processos integrados na vertical. Os sedimentos finos modelados no Delft3D-4 foram classificados por sua origem, uma classe representou os sedimentos finos advindos do Rio Doce e a outra os sedimentos finos ressuspensos dos depósitos lamosos na plataforma continental interna. A série temporal horária do aporte de sedimentos do Rio Doce foram extraídos da curva-chave de sedimento em suspensão da estação fluviométrica P21 do Tema Bacia de Integração do Ambiente Dulcícola do PMBA/Fest em Linhares-ES. A caracterização sedimentológica e o mapeamento dos depósitos lamosos da plataforma continental foram obtidos dos estudos de Bastos e outros (2015) e Vieira e outros (2019), além dos resultados da amostragem *in situ* realizada em dezembro de 2023. Com base nos resultados descritos pelos autores supracitados junto aos obtidos no campo, o banco lamoso apresenta um alto teor de lama em toda a sua extensão chegando até valores acima de 90% próximo da foz, apresentando uma densidade de $1600 \text{ kg}/\text{m}^3$, aproximadamente, tendo o seu limite mais ao sul situado na região em frente ao Porto Marítimo Portocel (Comboios, Aracruz - ES), apresentando alto teor de areia e biodetritos. A velocidade de queda adotada para os sedimentos finos foi de $0,125 \text{ mm}/\text{s}$, obtida após as simulações de calibração (Vinzón *et al.*, 2024). O transporte de sedimentos suspensos foi calculado resolvendo a equação de advecção-difusão (balanço de massa) para o sedimento suspenso (DELFT3D-FLOW, 2023). O coeficiente de mistura vertical para sedimento fino foi igual ao coeficiente de mistura de fluido vertical calculado pelo modelo (DELFT3D-FLOW, 2023). A erosão e deposição de sedimentos sobre leito foi calculado através da formulação de Partheniades-Krone (DELFT3D-FLOW, 2023). As validações das modelagens hidrodinâmica, ondas e transporte de sedimento fino em suspensão foram realizadas através da comparação os resultados simulados com os dados coletados nos fundeios (nível d'água, correntes, ondas e turbidez).

2.2.4 Estimativa da Deriva Litorânea

Para estimar as vazões do transporte litorâneo geradas pelas correntes longitudinais, devido à quebra das ondas, é seguida a metodologia de Rodriguez e Mehta (2000). Calcula-se para cada perfil do litoral (dimensão longitudinal, y) a velocidade média das correntes litorâneas, $V(y)$, e a área de influência, definida pela largura da zona de surfe e a profundidade de quebra das ondas (d_b). Para determinar $V(y)$ é utilizado um modelo analítico-paramétrico com base nos trabalhos de Longuet-Higgins (1970a; 1970b), uma vez que o modelo numérico utilizado não consegue reproduzir as principais feições hidrodinâmicas na zona de surfe devido à discretização da malha. O modelo considera o balanço entre forças de atrito - F_y (condições físicas da praia como sedimento e declividade) e o gradiente (normal à praia) da componente tangencial da tensão de radiação - S_{xy} (obtido a partir das condições de ondas na arrebentação). A partir deste balanço pode ser estimada a distribuição da corrente litorânea na zona de surfe, com a forma do perfil de velocidade *cross-shore* (dimensão transversal, x) dependente do grau de difusão lateral considerado, o que permite representar a variação da velocidade tanto na zona *offshore* quanto *onshore*. Como indicado por Longuet-Higgins (1970a), o perfil de correntes linear pode ser modificado considerando o efeito de mistura lateral ou difusão devido à turbulência.

Os cálculos foram realizados em 9 perfis de praia ao longo do litoral, sendo três ao sul da desembocadura do Rio Doce e seis ao norte do Rio Doce. Esses pontos coincidem com a localização dos perfis de praia monitorados pelo Tema Praias do Ambiente Costeiro (FEST, 2023), sendo os perfis S4 à S6, ao sul e N1 à N6, ao norte (Figura 1d). Os perfis de praia localizados mais ao sul (S1 a S3) não foram considerados nos cálculos da vazão litorânea, pois se encontram em região compostas por terraço de abrasão, que controla a incidência das ondas na praia alterando, assim, a dinâmica de correntes no sistema praial, uma vez que, boa parte da energia das ondas se dissipa ao se romperem nos afloramentos rochosos. As informações sobre as características da praia para cada perfil, como declividade, granulometria e azimuth, foram obtidas dos levantamentos realizados na região praial (RRDM, 2019a). Considerando um coeficiente de difusão máximo de $0,02 \text{ m}^2/\text{s}$ (BOSBOOM & STIVE, 2012), calculados coeficientes de mistura (P) para os diferentes perfis de praia considerados, resultando um valor médio de 0.15, o que reduz a velocidade máxima da corrente litorânea (V_{\max}) em aproximadamente 40%.

A altura e ângulo de incidência das ondas, utilizadas no cálculo da componente tangencial da tensão de radiação, foram extraídas dos resultados da modelagem numérica, em cada perfil de praia para a profundidade de 10 m, aproximadamente. Logo, foi utilizada a teoria linear de ondas (CERC, 1984) para modificar a altura das ondas por empinamento e de direção por refração até a zona de quebra, considerando contornos batimétricos paralelos à linha de costa. Para determinar o índice e profundidade de quebra ($h(y)$) são utilizadas formulações paramétricas (BATTJES & JANSSEN, 1978; KOMAR & GAUGHAN, 1973). Com a declividade de cada perfil e a profundidade de quebra, é determinada a largura da zona de surfe ($B(y)$). O produto da velocidade longitudinal e a área de influência para cada perfil permite o cálculo ou estimativa das vazões de deriva litorânea, responsáveis pelo transporte de sedimentos ao longo do litoral.

2.3 ANÁLISE

2.3.1 Dados *in situ*

Os dados *in situ* obtidos pela perfilação de CTD são analisados por meio de seções horizontais e verticais e de mapas, de modo que auxiliam na compreensão de como a dinâmica oceanográfica vigente na realização das campanhas do Marinho Integrado condiciona o padrão de distribuição do material de rejeito no ambiente marinho. Os dados obtidos nos pontos de fundeio são analisados tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo, ressaltando as diferenças entre a circulação da superfície e do fundo e a comparação entre os dados obtidos para cada um dos pontos de fundeio. A compreensão da dinâmica local em diferentes escalas temporais permite definir os eventos hidrológicos e de aumento da energia das ondas que são avaliados com a finalidade de caracterizar os principais processos físicos que atuam na região da foz do Rio Doce e adjacências.

2.3.2 Sensoriamento Remoto

Os dados diários de Clorofila-a, Temperatura da Superfície do Mar e as estimativas de Turbidez são processados e mapeados para fornecer uma análise da variabilidade espaço-temporal da influência da descarga continental na produtividade primária, das feições térmicas que condicionam a dispersão da pluma do Rio Doce e da distribuição da turbidez superficial do oceano, permitindo inferir a área de alcance da pluma de sedimentos do Rio Doce diariamente e sazonalmente, bem como a dispersão dos sedimentos ressuspensos do fundo com a passagem de sistemas transientes. Imagens de cor verdadeira diárias também são utilizadas na identificação visual (qualitativa) da dispersão de sedimentos durante dos eventos hidrológicos e de ressuspensão por ondas. A presença de nuvens sobre o oceano durante a obtenção dos dados pelo satélite é o principal limitante comum a todas as medidas realizadas com radiação refletida ou emitida impedindo, dessa forma, as suas quantificações.

Para a filtragem inicial dos dados foi analisada a região da desembocadura do Rio Doce durante todo o período, descartando os dias que apresentaram uma presença de nuvem superior a 90% na região. A partir disso, o cálculo de recorrências (%) levou em consideração o número de vezes que a Turbidez ultrapassa um determinado limiar de FNU (2 e 5 FNU), dividido pelo número de observações totais validas em cada um dos pontos amostrados. Por observações validas, consideram-se pontos com observações sem a presença de nuvem, que são descartadas, logo, o número total de observações varia de ponto a ponto. Dessa forma, os dados válidos representaram 36,5% do conjunto de dados referente a todos os períodos chuvosos do PMBA/Fest, enquanto que para os períodos secos esse valor foi de 54,3%.

2.3.3 Modelagem numérica

Mapas dos campos termohalinos e de velocidades resultantes dos experimentos numéricos hidrodinâmicos são confeccionados a fim de compreender eventos específicos (instantâneos) e padrões sazonais e anuais (estatísticas). A modelagem numérica hidrodinâmica visa o entendimento sinóptico das diferentes condicionantes ambientais existentes na plataforma continental que conferem alterações diárias, sazonais e anuais no espalhamento da pluma proveniente do Rio Doce no ambiente marinho. Para a determinação da pluma de baixa salinidade oriunda do Rio Doce no Ambiente Marinho, considerou-se o valor de salinidade superficial igual ou inferior a 35, uma vez que este representa o limite adotado por Pereira e colaboradores (2005) como representativo de Água Costeira, que é a massa d'água originada a partir da diluição da água oceânica pela água dos rios aportada na plataforma continental. A partir dos resultados de simulações numéricas para os diferentes períodos chuvosos e secos, e para os eventos de Inundação do Rio Doce, foram contabilizados o número de dias em que os valores de salinidade superficial estiveram dentro do limite supracitado. Deste modo, foram calculadas as frequências de recorrência (%) da pluma de baixa salinidade sobre a plataforma continental, e as áreas de abrangência da pluma no Ambiente Marinho, que foram determinadas considerando a região de valores de recorrência iguais ou superiores à 10%.

As comparações dos resultados das simulações numéricas do transporte de sedimentos com os dados de turbidez coletados são apresentadas tanto em forma pontual, na forma de séries temporais, e regional, quanto na forma de mapas, permitindo a visualização da variação espaço-temporal do indicador. As séries temporais são obtidas para os locais relevantes, como nos pontos onde são realizadas as medições *in situ* (fundeios), assim como em locais importantes para a descrição dos processos apontados. Os mapas são selecionados de forma a ilustrar eventos específicos ou períodos de tempo de interesse (como os meses dos períodos chuvosos e secos de cada ano ou as datas das campanhas) para a obtenção de correntes residuais. A modelagem numérica do transporte de sedimentos permite compreender a dispersão da descarga sedimentar proveniente do Rio Doce e/ou que estejam já depositados na plataforma continental adjacente, a fim de identificar o destino do material de rejeito no ambiente marinho. O foco dessa modelagem é a análise dos papéis dos diferentes processos hidrodinâmicos específicos para o transporte de sedimentos finos, como por exemplo tensões de cisalhamento no fundo, correntes residuais de maré, ondas, entre outros. O cálculo da deriva litorânea permite evidenciar sua importância frente a outras correntes residuais, permitindo comparações sazonais e interanuais e em cenários específicos, mostrados através de mapas de estimativas de vazões de deriva (residuais anuais e/ou para os períodos chuvosos ou secos analisados).

Os resultados sazonais de concentração de sedimentos obtidos pelo modelo foram apresentados pela recorrência de 50% (mediana) de valores iguais ou maiores a 1 mg/L durante os seis meses relativos ao período chuvoso ou seco de cada ano. Por outro lado, os resultados por eventos (Eventos de Inundação do Rio Doce ou de ressuspensão de sedimentos do baco lamoso por ondas) se restringiram apenas ao período de ocorrência do evento (dias ou semanas). Os resultados de transporte de

sedimento em suspensão oriundo do banco lamoso foram expressos em termos de média por duração do evento (dias ou semanas).

Na análise das vazões litorâneas foram calculados valores médios (ou residuais) e levadas em consideração informações estatísticas como a amplitude dos valores médios para cada período (chuvoso e seco) e o valor médio para cada ano. Desta forma, os resultados foram apresentados como a amplitude de variação deste processo numa escala sazonal e anual, podendo inferir sobre a direção preferencial da vazão litorânea na escala de tempo considerada. Cabe ressaltar que a vazão litorânea resulta da dinâmica de correntes originada dentro da zona de surfe e que a mesma responde imediatamente às modificações do clima de ondas. Ou seja, ainda que as estimativas estatísticas demonstrem um sentido e intensidade preferencial, a corrente litorânea apresenta variações ao longo do tempo.

2.4 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

Ao longo da evolução do PMBA/Fest a modelagem numérica biogeoquímica prevista no primeiro Plano de Trabalho foi realizada e apresentada no RA2019 para avaliar o impacto na porção biológica, geológica e química do ambiente marinho receptor final do material de rejeito. Na ocasião foi apresentada a distribuição do sedimento superficial e de fundo associados à vazão do Rio Doce simulada pelo modelo *Surface-Trapped River Plume Evolution* (STRiPE) (OSADCHIEV & ZAVIALOV, 2013), bem como a distribuição dos parâmetros biogeoquímicos sobre a plataforma continental simulada pelo modelo biogeoquímico *Eastern Boundary Upwelling Systems* (BioEBUS) (GUTKNECHT *et al.*, 2013). Além disso, os resultados simulados de nutrientes (nitrato e amônio), campos de fitoplâncton e zooplâncton, campos de clorofila-a e oxigênio dissolvido foram entregues via *Dropbox* e o mapa da distribuição de sedimento de fundo foi apresentado no (RRDM, 2019b). A partir do período de Transição, essa metodologia foi alterada para a modelagem numérica de transporte de sedimentos que permitiu a análise da dinâmica dos sedimentos finos na plataforma continental adjacente associada aos processos de dispersão e ressuspensão (maré, vento local, ondas), além da descarga sólida do Rio Doce. Também se passou a considerar os resultados de modelos de ondas para a deriva litorânea utilizando tanto modelos paramétricos quanto para cenários específicos com acoplamento de modelo de sedimentos. É importante salientar que, mesmo havendo alteração metodológica, a meta foi alcançada em conjunto com os demais Temas que compõe o Ambiente Marinho.

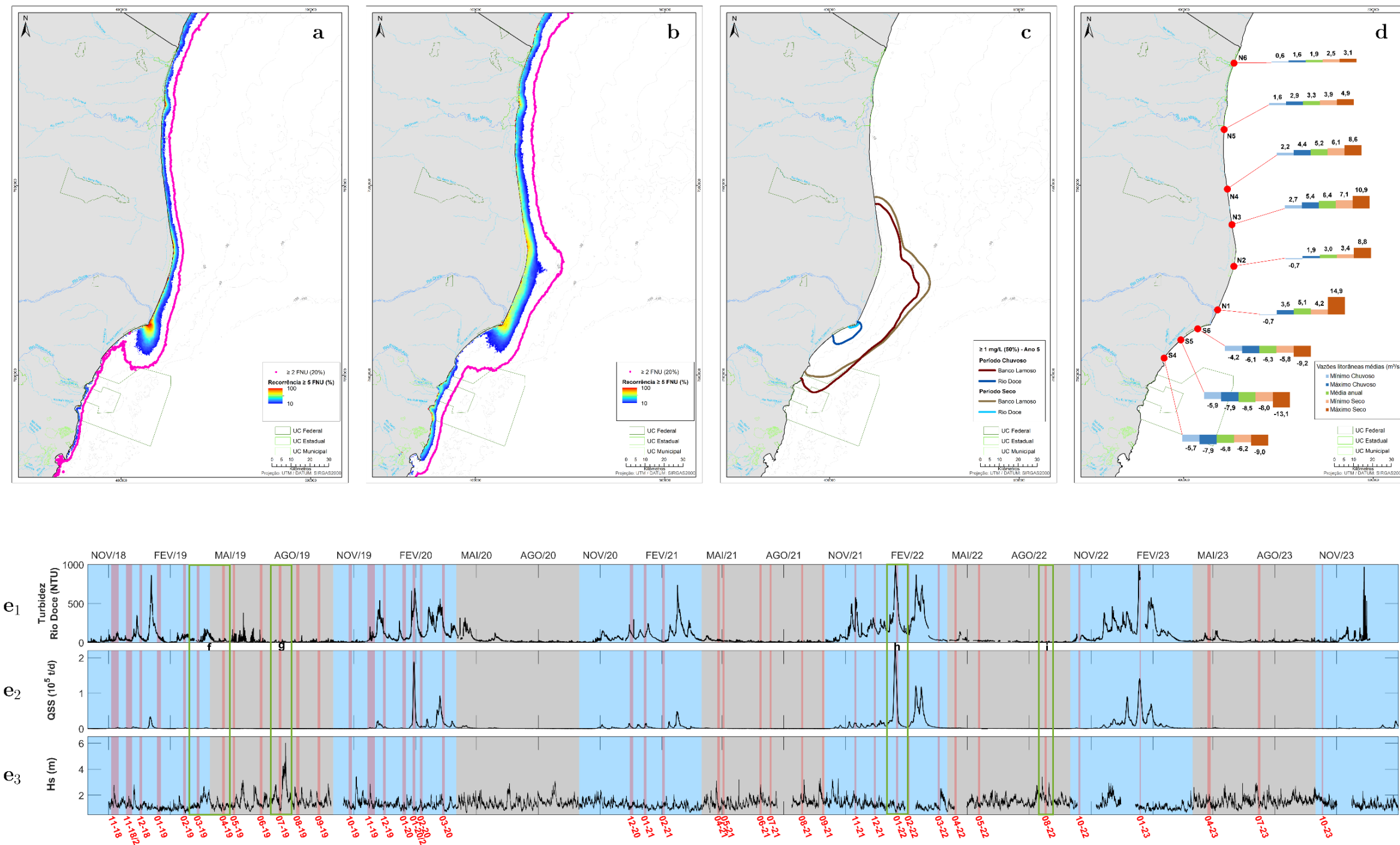
3 RESULTADOS DOS INDICADORES

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 de todo monitoramento 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).

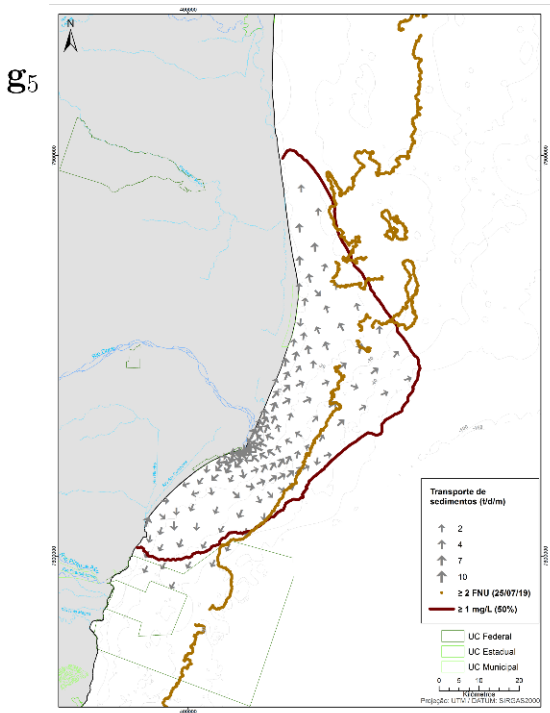
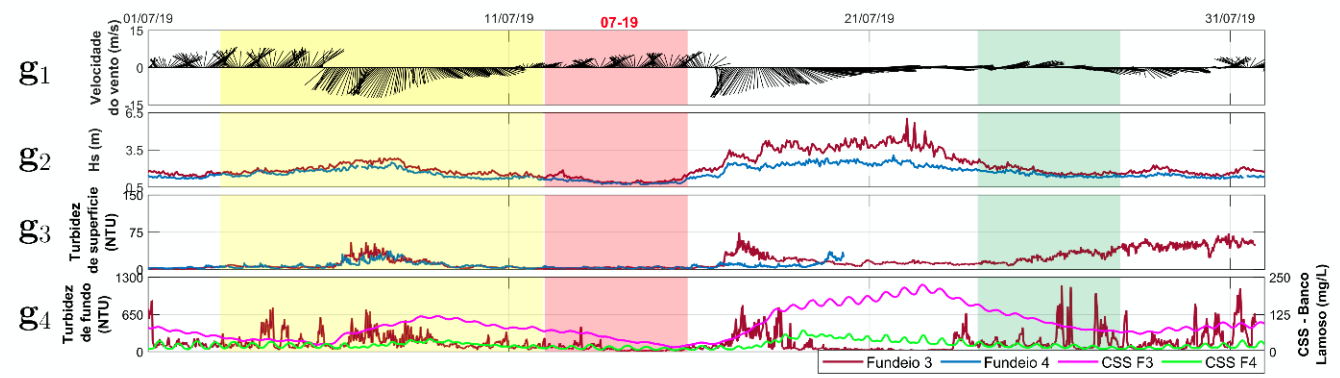
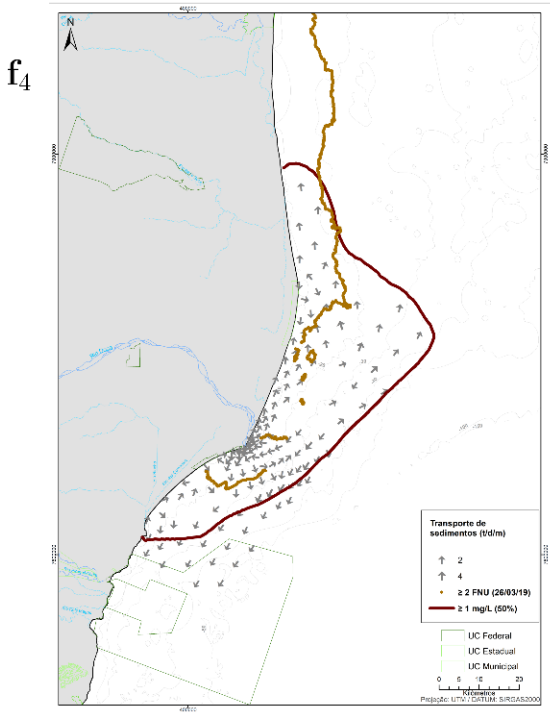
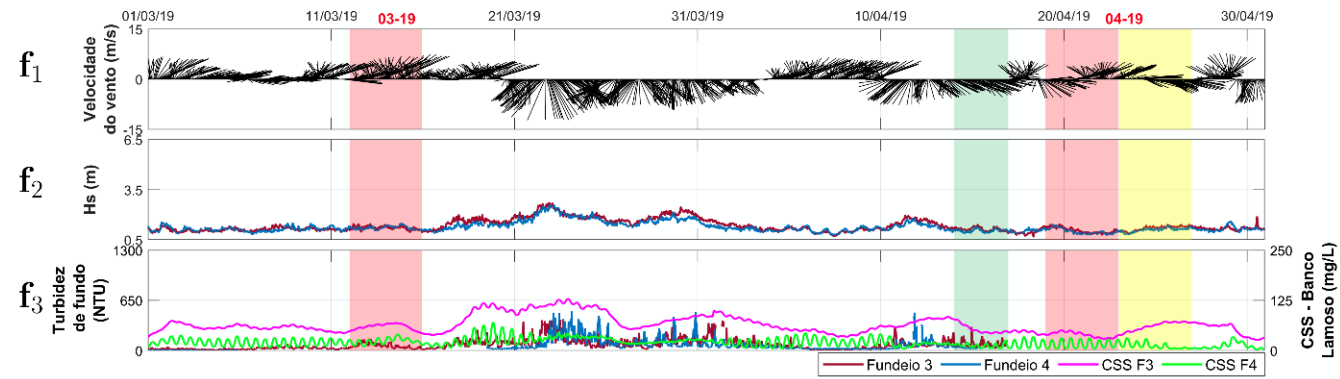
Os indicadores do PMBA/Fest vêm se consolidando ao longo do monitoramento e, seguindo a proposta estabelecida desde o Relatório Anual de 2022 (RA2022), a apresentação dos resultados será exclusivamente a partir da apresentação dos indicadores, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua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

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

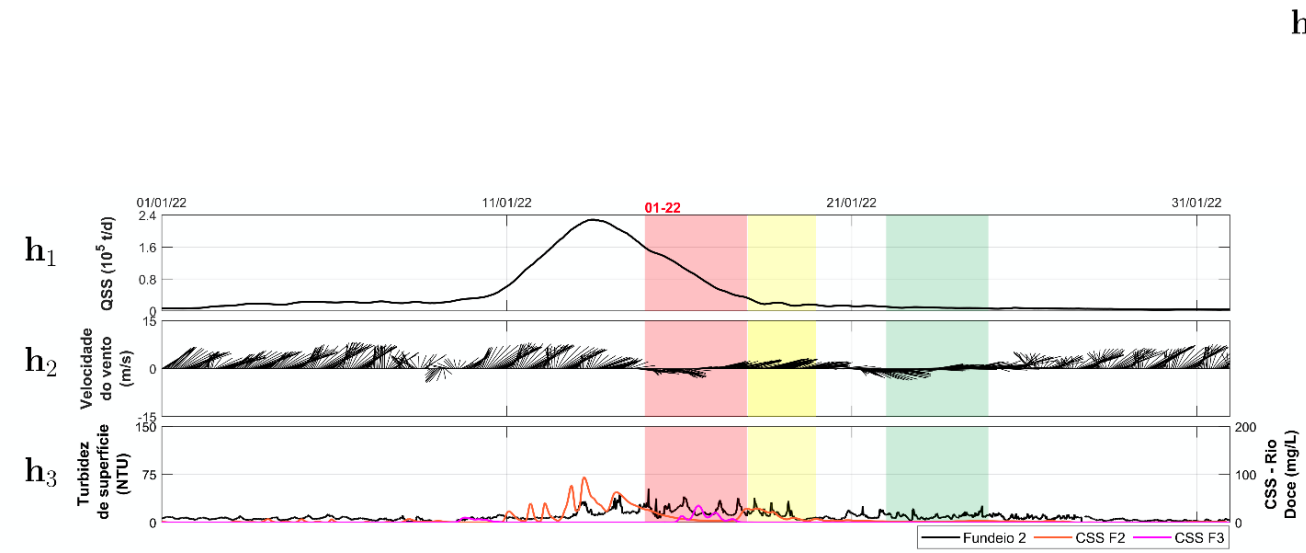
Figura 1: Turbidez/Concentração de sedimento em suspensão na coluna d'água



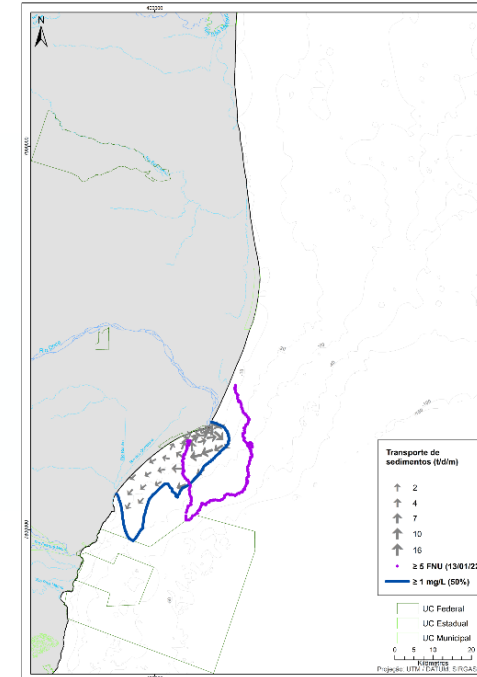
Continuação da Figura 1: Turbidez/Concentração de sedimento em suspensão na coluna d'água



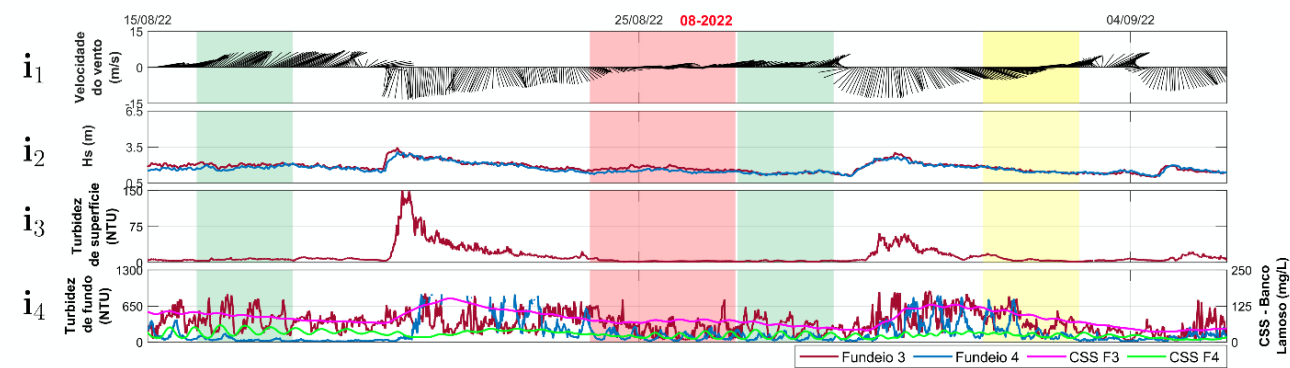
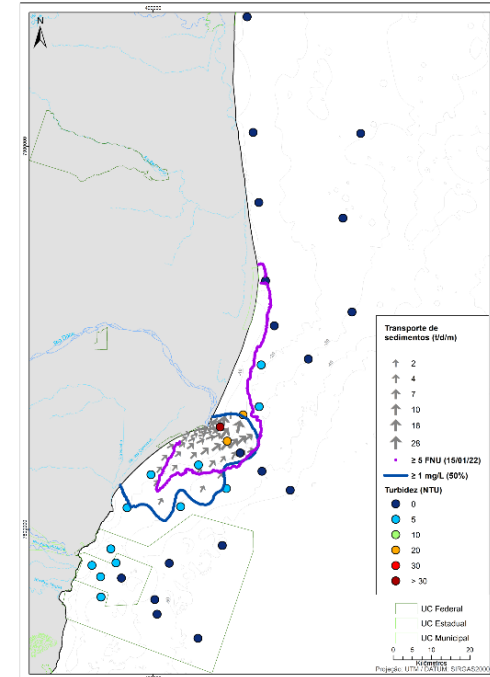
Continuação da Figura 1 Turbidez/Concentração de sedimento em suspensão na coluna d'água



h₄

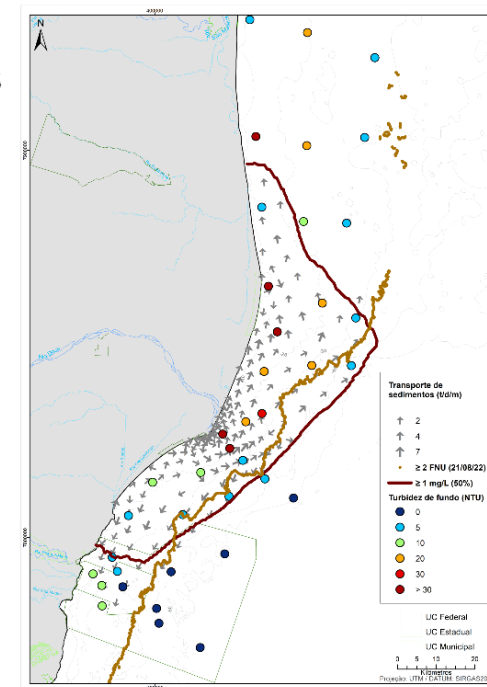


h₅



CSS - Banco Lamoso (mg/L)

i₅



1a. Distribuição espacial da frequência de ocorrência de turbidez superficial ≥ 5 FNU a partir dos dados provenientes do satélite AQUA disponíveis para os períodos chuvosos dos Anos 1 ao 5 sem cobertura de nuvens e/ou dados espúrios (36,5%). A linha rosa delimita a área na qual a frequência de ocorrência da turbidez superficial ≥ 2 FNU foi igual ou superior a 20%. **1b.** Distribuição espacial da frequência de ocorrência de turbidez superficial ≥ 5 FNU a partir dos dados provenientes do satélite AQUA disponíveis para os períodos secos dos Anos 1 ao 5 sem cobertura de nuvens e/ou dados espúrios (54,3%). A linha rosa delimita a área na qual a frequência de ocorrência da turbidez superficial ≥ 2 FNU foi igual ou superior a 20%. **1c.** Distribuição espacial da concentração de sedimento em suspensão a partir de simulação numérica para o Ano 5 do PMBA/Fest (outubro de 2022 a setembro de 2023). As isolinhas azul escuro (período chuvoso) e azul claro (período seco) representam a recorrência de 50% (mediana) de valores ≥ 1 mg/L da pluma modelada do Rio Doce para cada período. As isolinhas marrom escuro (período chuvoso) e marrom claro (período seco) representam a recorrência de 50% (mediana) de valores ≥ 1 mg/L da pluma modelada da ressuspensão do banco lamoso para cada um dos períodos. **1d.** Resumo estatístico das vazões litorâneas residuais (2019-2023). As vazões litorâneas indicam a capacidade de transporte calculada na zona de surfe diante dos perfis de praia distribuídos ao longo da linha de costa. Os valores indicam os mínimos e máximos das vazões médias durante os períodos chuvosos (em escala de azul) e secos (em escala de marrom), representando a amplitude de variação da vazão litorânea em cada perfil. Para os cálculos dos valores médios da vazão (verde) foram considerados todo o período de simulação compreendido entre os Anos 1 e 5 de realização do PMBA/Fest. Os valores positivos representam vazões para norte e negativos para sul ao longo da costa. **1e.** Séries temporais obtidas para todo o período de execução do PMBA/Fest (outubro/2018 a janeiro/2024): (1) Variação horária de turbidez no Rio Doce (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); (2) Variação horária da descarga sólida em suspensão do Rio Doce (QSS - t/d) na estação P21 (Linhares - ES) recalculada a partir da última curva-chave fornecida pelo Tema Bacia de Integração do Ambiente Dulcícola do PMBA/Fest; (3) Variação temporal da Altura Significativa de Ondas – Hs (m) medida no ponto de fundeio localizado no subsetor Foz Norte (Fundeio 3). As lacunas nas séries temporais indicam ausência de dados. 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. Os retângulos verdes destacam os eventos mais importantes de incremento nos valores de turbidez durante o PMBA/Fest apresentados a seguir em ordem cronológica. **1f.** Evento de ressuspensão de sedimentos do banco lamoso ocasionado pela passagem da Tempestade Tropical IBA (23 a 28 de março de 2019): (1) Variação 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; (2) Variação temporal da Hs (m) nos pontos de fundeios localizados no Subsetor Foz Norte (vermelho – Fundeio 3) e no Setor Norte (azul – Fundeio 4); (3) Variação temporal da Turbidez (NTU) medida no fundo nos pontos de fundeios localizados no Subsetor Foz Norte (vermelho – Fundeio 3) e no Setor Norte (azul – Fundeio 4) e da concentração de sedimentos em suspensão ressuspensa do banco lamoso simulada pelo modelo (CSS banco lamoso – mg/L) (linha rosa para o Fundeio 3 e verde para o

Fundeio 4). Todas as séries temporais correspondem ao período entre 1º de março a 30 de abril de 2019. Os períodos de realização das campanhas de coletas de dados *in situ* do Ambiente Marinho são destacados pelas faixas verticais vermelhas (Setor Foz), amarela (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz) e verde (Setor Norte). (4) Área de abrangência da turbidez superficial ≥ 2 FNU (isolinha marrom clara) obtida através de sensoriamento remoto para o dia 26 de março de 2019 (MODIS/Aqua). Área de recorrência de 50% (mediana) para concentrações ≥ 1 mg/L da pluma dos sedimentos ressuspensos do banco lamoso (isolinha marrom escura) a partir de resultados de simulações numéricas realizadas entre 21 de março e 02 de abril de 2019. As setas cinzas representam o transporte médio dos sedimentos provenientes do banco lamoso calculado por unidade de largura (t/d/m) a partir de resultados de simulações numéricas realizadas para esse evento. **1g.** Evento de ressuspensão de sedimentos do banco lamoso ocasionado pelo Evento das Grandes Ondas (17 a 23 de julho de 2019): (1) Variação horária de ventos (m/s - notação meteorológica) provenientes da reanálise do ECMWF para o ponto 39,75°O e 19,75°S; (2) Variação temporal da Hs (m) nos pontos de fundeios localizados no Subsetor Foz Norte (vermelho – Fundeio 3) e no Setor Norte (azul – Fundeio 4); (3) Variação temporal da Turbidez (NTU) medida em superfície nos pontos de fundeios localizados no Subsetor Foz Norte (vermelho – Fundeio 3) e no Setor Norte (azul – Fundeio 4). A lacuna na série temporal indica ausência de dados; (4) Variação temporal da Turbidez (NTU) medida no fundo no ponto de fundeio localizado no Subsetor Foz Norte (vermelho – Fundeio 3) e da CSS banco lamoso (mg/L) simulada pelo modelo (linha rosa para o Fundeio 3 e verde para o Fundeio 4). Todas as séries temporais correspondem ao período entre 1º a 31 de julho de 2019. Os períodos de realização das campanhas de coletas de dados *in situ* do Ambiente Marinho são destacados pelas faixas verticais vermelha (Setor Foz), amarela (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz) e verde (Setor Norte). A descontinuidade dessas faixas indica a interrupção da coleta de dados *in situ* devido às condições adversas. (5) Área de abrangência da turbidez superficial ≥ 2 FNU (isolinha marrom clara) obtida através de sensoriamento remoto no dia 25 de julho de 2019 (MODIS/Aqua). Área de recorrência de 50% (mediana) para concentrações ≥ 1 mg/L da pluma dos sedimentos ressuspensos do banco lamoso (isolinha marrom escura) a partir de resultados de simulações numéricas realizadas entre 18 e 24 de julho de 2019. As setas cinzas representam o transporte médio de sedimentos provenientes do banco lamoso calculado por unidade de largura (t/d/m) a partir de resultados de simulações numéricas realizadas para esse evento. **1h.** Evento de maior QSS ao longo dos cinco anos do PMBA/Fest (13 de janeiro de 2022) associado à campanha 01-22 do Marinho Integrado: (1) Variação horária de QSS (t/d) na estação P21 (Linhares - ES) recalculada a partir da última curva-chave fornecida pelo Tema Bacia de Integração do Ambiente Dulcícola do PMBA/Fest; (2) Variação horária de ventos (m/s - notação meteorológica) provenientes da reanálise do ECMWF para o ponto 39,75°O e 19,75°S; (3) Variação temporal da Turbidez (NTU) medida em superfície no ponto de fundeio localizado no Subsetor Foz Sul (em preto – Fundeio 2) e da concentração de sedimentos em suspensão da pluma do Rio Doce (CSS Rio Doce – mg/L) simulada pelo modelo (linha laranja para o Fundeio 2 e rosa para o Fundeio 3). Todas as séries temporais correspondem ao intervalo entre 1º a 31 de janeiro de 2022. Os períodos de realização das campanhas de coletas de dados *in situ* do Ambiente Marinho são destacados pelas faixas verticais vermelha (Setor Foz), amarela (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz) e verde

(Setor Norte). (4) Área de abrangência da turbidez superficial ≥ 5 FNU obtida via sensoriamento remoto (MODIS/Aqua) para o dia 13 de janeiro de 2022 (isolinha roxa). Área de recorrência de 50% (mediana) para concentrações ≥ 1 mg/L da pluma do Rio Doce (isolinha azul) a partir de resultados de simulações numéricas realizadas para o dia 13 de janeiro de 2022. As setas cinzas representam o transporte médio de sedimentos provenientes do banco lamoso calculado por unidade de largura (t/d/m) a partir de resultados de simulações numéricas realizadas para o mesmo dia. (5) Área de abrangência da turbidez superficial ≥ 5 FNU obtida via sensoriamento remoto (MODIS/Aqua) para o dia 15 de janeiro de 2022 (isolinha roxa). Área de recorrência de 50% (mediana) para concentrações ≥ 1 mg/L da pluma do Rio Doce (isolinha azul) a partir de resultados de simulações numéricas realizadas para o dia 15 de janeiro de 2022. As setas cinzas representam o transporte médio de sedimentos provenientes do banco lamoso calculado por unidade de largura (t/d/m) a partir de resultados de simulações numéricas realizadas para o mesmo dia. Os círculos em escala de cores representam a distribuição da turbidez (NTU) superficial registrada durante a campanha 01-22 do Marinho Integrado. **1i. Evento de ressuspensão de sedimentos do banco lamoso associado à campanha 08-22 do Marinho Integrado (09 de agosto a 02 de setembro de 2022):** (1) Variação horária de ventos (m/s - notação meteorológica) provenientes da reanálise do ECMWF para o ponto 39,75°O e 19,75°S; (2) Variação temporal da Hs (m) nos pontos de fundeios localizados no Subsetor Foz Norte (em vermelho – Fundeio 3) e no Setor Norte (em azul – Fundeio 4); (3) Variação temporal da Turbidez (NTU) medida em superfície no ponto de fundeio localizado no Subsetor Foz Norte (em vermelho – Fundeio 3); (4) Variação temporal da Turbidez (NTU) medida no fundo nos pontos de fundeios localizados no Subsetor Foz Norte (vermelho – Fundeio 3) e no Setor Norte (azul – Fundeio 4) e da CSS banco lamoso (mg/L) simulada pelo modelo (linha rosa para o Fundeio 3 e verde para o Fundeio 4). Todas as séries temporais abordam o período entre 15 de agosto a 05 de setembro de 2022. Os períodos de realização das campanhas de coletas de dados *in situ* do Ambiente Marinho são destacados pelas faixas verticais vermelha (Setor Foz), amarela (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz) e verdes (Setor Norte). A descontinuidade dessas faixas indica a interrupção da coleta de dados *in situ* devido às condições adversas. (5) Área de abrangência da turbidez superficial ≥ 2 FNU obtida através de sensoriamento remoto (MODIS/Aqua) no dia 21 de agosto de 2022 (isolinha marrom clara). Área de recorrência de 50% (mediana) para concentrações ≥ 1 mg/L da pluma dos sedimentos ressuspensos do banco lamoso (isolinha marrom escura) a partir de resultados de simulações numéricas desenvolvidas para o período de realização da campanha 08-22 do Marinho Integrado. As setas cinzas representam o transporte médio de sedimentos provenientes do banco lamoso calculado por unidade de largura (t/d/m) a partir de resultados de simulações numéricas para o período da campanha. Os círculos em escala de cores representam a distribuição da turbidez (NTU) de fundo medida durante esta campanha.

O indicador Turbidez está associado à concentração de material particulado em suspensão que é aportado pelo Rio Doce na plataforma continental do Espírito Santo e/ou que é ressuspendido do banco lamoso adjacente à sua foz. A análise deste indicador permitiu compreender a dinâmica da dispersão dos sedimentos no ambiente marinho, a partir da variabilidade das forçantes hidrológicas e meteoceanográficas atuantes. Ao longo de todo o monitoramento, observou-se que os períodos chuvosos se caracterizaram pelo incremento nos valores de turbidez e da descarga sólida em

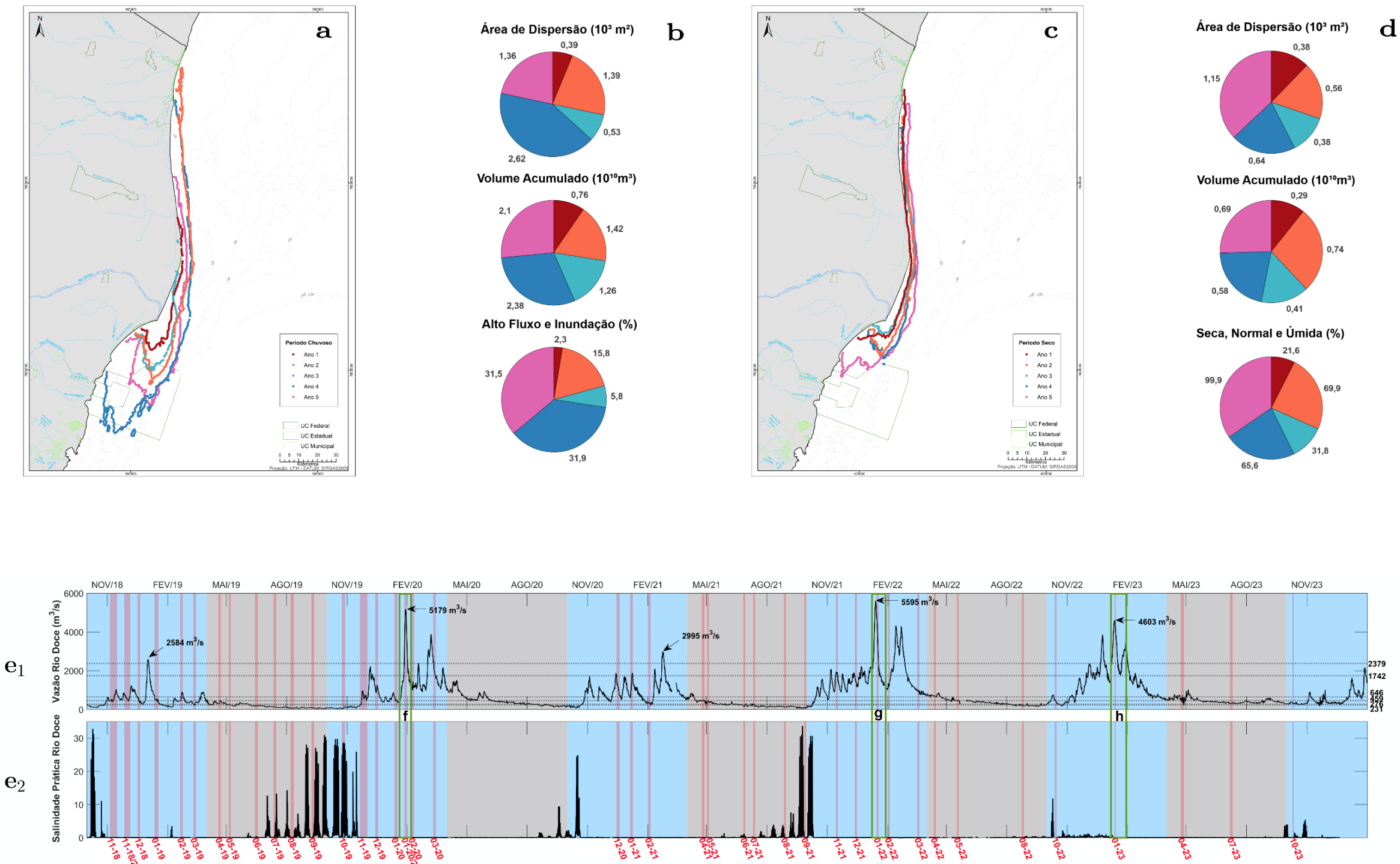
suspensão no Rio Doce (Figura 1e₁ e 1e₂). Durante estes períodos, os valores de turbidez ≥ 5 FNU estimados por sensoriamento remoto foram observados até próximos à isóbata de 30 m no Setor Foz. Os valores máximos estiveram associados à desembocadura do Rio Doce, onde houve recorrência superior a 80% (Figura 1a). A modelagem de transporte de sedimentos mostrou que durante o período chuvoso do Ano 5 a pluma do Rio Doce foi dispersada, preferencialmente, para o sul da sua foz com alcance de cerca de 14 km e que a área dessa pluma se estendeu por até 99 km² (Figura 1c). Esse comportamento esteve associado à predominância de ventos N-NE durante esses períodos. A maior descarga de sólidos em suspensão calculada para os cinco anos de execução do PMBA/Fest (210.061 t/d no dia 13 de janeiro de 2022) (Figura 1e₂) precedeu à campanha 01-22 do Marinho Integrado durante o período chuvoso do Ano 4 (Figura 1h₁). Durante este evento que se estendeu por 9 dias, a turbidez superficial medida *in situ* registrou 128 NTU na estação de coleta mais próxima da foz do Rio Doce (Figura 1h₅), enquanto no Subsetor Foz Sul houve aumento nos valores de turbidez durante cerca de 7 dias (Figura 1h₃). No dia da máxima descarga de sólidos em suspensão, a turbidez estimada via sensoriamento remoto foi ≥ 5 FNU desde a foz do Rio Doce até o norte da APA Costas das Algas (Figura 1h₄). A simulação numérica deste evento mostrou a formação de uma extensa pluma de material particulado em suspensão, com uma área de 160 km² e indicou que a pluma simulada alcançou inicialmente o subsetor Foz Sul (Figura 1h₄). Nesta localidade, a simulação apresentou concentrações superficiais relacionadas ao Rio Doce de até 94 mg/L (Figura 1h₃), em concordância com a turbidez superficial medida *in situ* que registrou valores de até 53 NTU (Figura 1h₃). Posteriormente, a partir do dia 15 (Figura 1h₅), a pluma simulada se espalhou para norte, chegando ao subsetor Foz Norte com concentrações de até 35 mg/L (16 de janeiro de 2022) (Figura 1h₃). Essa informação pode ser confirmada por resultados obtidos a partir do sensoriamento remoto, com o registro de turbidez superficial ≥ 5 FNU próximo à Degredo - ES (15 de janeiro de 2022), localizado no subsetor Foz Norte (Figura 1h₅). O amplo alcance tanto para sul quanto ao norte da foz foi uma resposta à inversão na direção dos ventos atuantes na região da foz do Rio Doce que ocorreu durante este evento. Ventos N-NE-E e correntes O-SO precederam à campanha (Figura 1h₂) resultando no direcionamento preferencial do transporte de sedimentos para SO (Figura 1h₄), mas, nos dias de realização das coletas de dados hidrográficos na foz do Rio Doce, houve a entrada de um sistema frontal que ocasionou a inversão dos ventos e das correntes (Figura 1h₂) e, consequentemente, a simulação do transporte de material ressuspensionado apresentou direção preferencial para N-NO. Dentre os períodos secos investigados, quando o aporte fluvial do Rio Doce foi reduzido em relação aos períodos chuvosos, o máximo valor estimado para a descarga de sólidos em suspensão foi de 9.000 t/d no Ano 2 (Figura 1e₂) que correspondeu somente a 2% do máximo registrado no período chuvoso. A máxima frequência de ocorrência dos valores de turbidez ≥ 5 FNU foi de 60% na foz do Rio Doce (Figura 1b), apresentando uma redução gradual da ocorrência até a localidade de Barra Seca, situada no Setor Norte. Além da redução da descarga continental, foi evidenciada a ocorrência dos maiores valores de turbidez no fundo (Figura 1f₃, 1g₄ e 1i₄) devido à ressuspensão do sedimento depositado nos bancos lamosos na plataforma continental adjacente à foz do Rio Doce. Eventualmente, a depender das condições hidrodinâmicas atuantes, também foram registrados aumentos simultâneos dos valores de turbidez na porção superficial da coluna d'água (Figura 1g₃ e 1i₃). Comparado aos períodos chuvosos, a isolinha

de 20% de recorrência de turbidez ≥ 2 FNU estimada por sensoriamento remoto indicou que os períodos secos apresentaram uma maior extensão dessa área, atingindo a isóbata de 20 m próximo a Degredo – ES (Figura 1b), em decorrência das sucessivas passagens de sistemas frontais na região, que promovem maior ressuspensão de sedimentos. A área da ressuspensão de sedimentos resultante de simulação numérica para o período seco do Ano 5 se estendeu por até 2.087 km² na plataforma continental (Figura 1c). No geral, ondas com Hs acima de 1 m foram capazes de promover a ressuspensão (Figura 1e₃), mas os eventos mais significativos estiveram associados à alta energia de ondas, sendo os principais registrados no Ano 1 do monitoramento: Tempestade Tropical Iba (Figura 1f) e Evento de Grandes Ondas (Figura 1g). A Tempestade Tropical Iba (Evento Iba) ocorreu na segunda quinzena de março de 2019 e foi antecedido por um evento de entrada de frente fria (Figura 1f₁). Já o Evento de Grandes Ondas ocorreu na segunda quinzena de julho de 2019 e foi mais severo em relação à Hs (Figura 1e₃). Durante o Evento Iba, embora os valores de Hs não tenham sido os maiores da série medida durante o PMBA/Fest (Figura 1e₃ e 1f₂), a duração por cerca de 15 dias de Hs com valores acima de 1,5 m (máximo de 3 m), combinados com altos Tp (> 9 s) ocasionou uma constante remobilização do fundo (Figura 1f₃). Neste evento a turbidez superficial estimada por sensoriamento remoto (≥ 2 FNU) se estendeu por todo o Setor Norte (Figura 1f₄), enquanto as medições nos pontos de fundeio mostraram um aumento da turbidez no fundo (máximo de ~750 NTU no Subsetor Foz Norte e ~1.700 NTU no Setor Norte) entre a segunda quinzena de março e a primeira quinzena de abril (Figura 1f₃). Por outro lado, o Evento de Grandes Ondas (Figura 1e₃) foi caracterizado pela ocorrência de ondulações remotas com Hs variando entre 3 e 6 m (de 17 a 23 de julho) (Figura 1g₂). O registro de turbidez de fundo chegou a 814 NTU (Figura 1g₄) e o de superfície a, aproximadamente, 75 NTU (Figura 1g₃) no subsector Foz Norte. Após o dia 24 de julho a altura significativa das ondas diminuiu (1,5 a 2 m), mas ainda foram consideradas ondas de alta energia (Figura 1g₂). Durante este evento, a turbidez superficial ≥ 2 FNU, calculada via sensoriamento remoto alcançou a isóbata de 30 m sobre o Banco de Abrolhos. Ao serem considerados os resultados das simulações numéricas, estimou-se que a área de ressuspensão de sedimentos com concentrações ≥ 1 mg/L chegou 2.339 km² (Figura 1g₅) no Evento de Grandes Ondas e cerca de 2159 km² no Evento Iba (Figura 1f₄). Em ambos os eventos foram registradas correntes N-NE forçadas pelos ventos SO transportando o material em suspensão (Figura 1f₄ e 1g₅), porém este transporte foi superior durante Evento de Grandes Ondas em relação à Tempestade Tropical Iba, sobretudo, devido às elevadas concentrações de material ressuspensionado durante o primeiro evento. Nos anos seguintes, os máximos de Hs durante os períodos secos mantiveram-se acima de 3 m (exceto no Ano 5 – 2,9 m), mas não ultrapassaram 3,5 m (Figura 1e₃). Dentre as campanhas realizadas pelo Marinho Integrado, a campanha 08-22 destacou-se por ocorrer simultaneamente à sucessivas passagens de sistemas frontais atmosféricos, aumento significativo de Hs (registros acima de 2,5 m) (Figura 1i₂), ventos predominantemente S-SE (Figura 1i₁) e corrente N. É importante ressaltar que a coleta de dados *in situ* foi interrompida por essas condições adversas. Valores acima de 10 NTU foram registrados próximo ao fundo na amostragem *in situ* nos pontos mais costeiros (até 20 m de profundidade) do Setor Foz Central e do Setor Norte e em todas as estações do subsector Foz Norte (Figura 1i₅). Já no fundeio do subsector Foz Norte, a turbidez de fundo ultrapassou 800 NTU (Figura 1i₄) e 1.200 NTU no fundeio do Setor Norte (Figura 1i₄). A manutenção de elevados

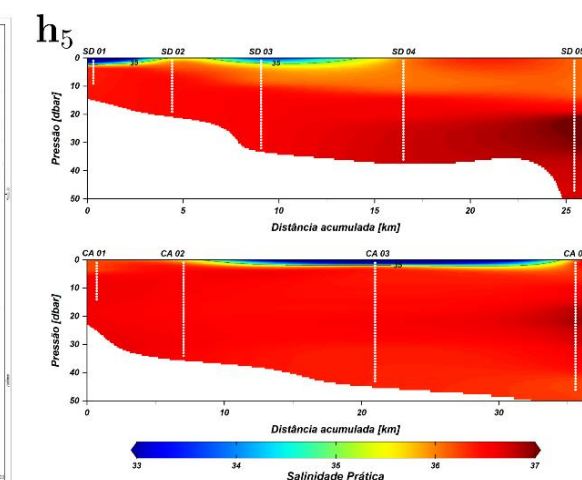
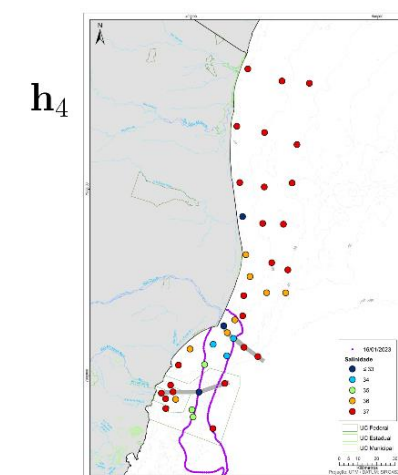
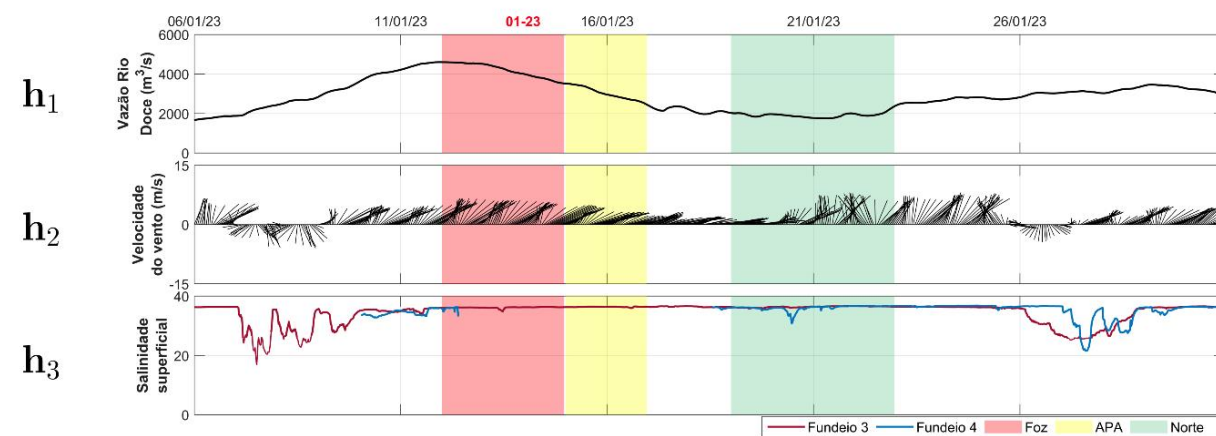
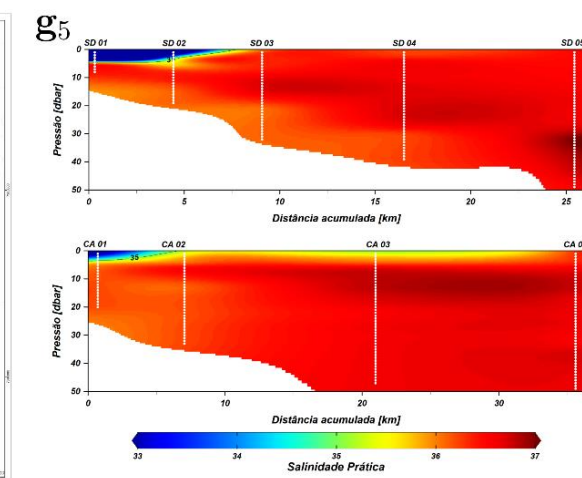
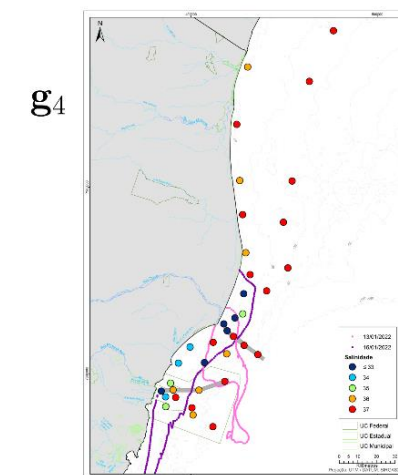
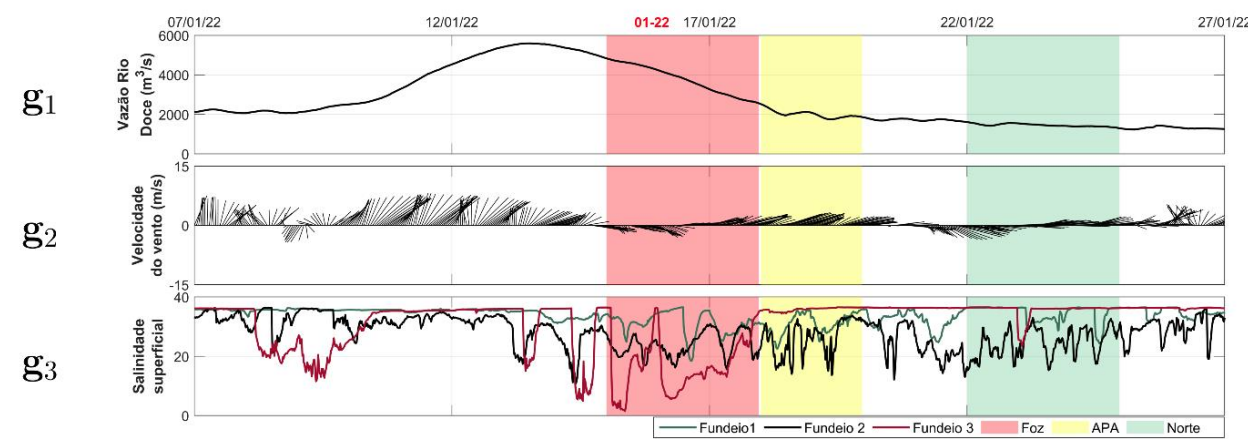
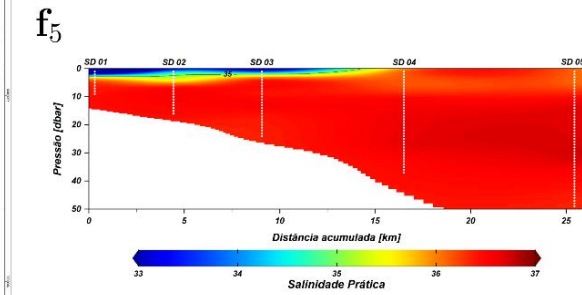
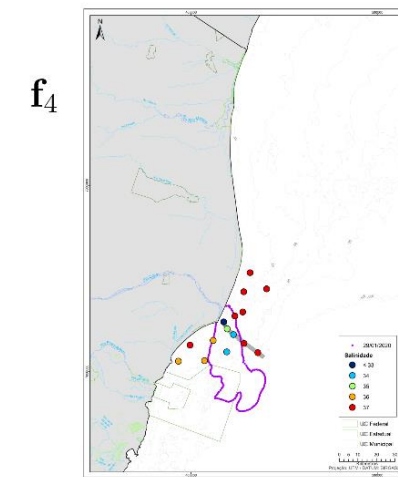
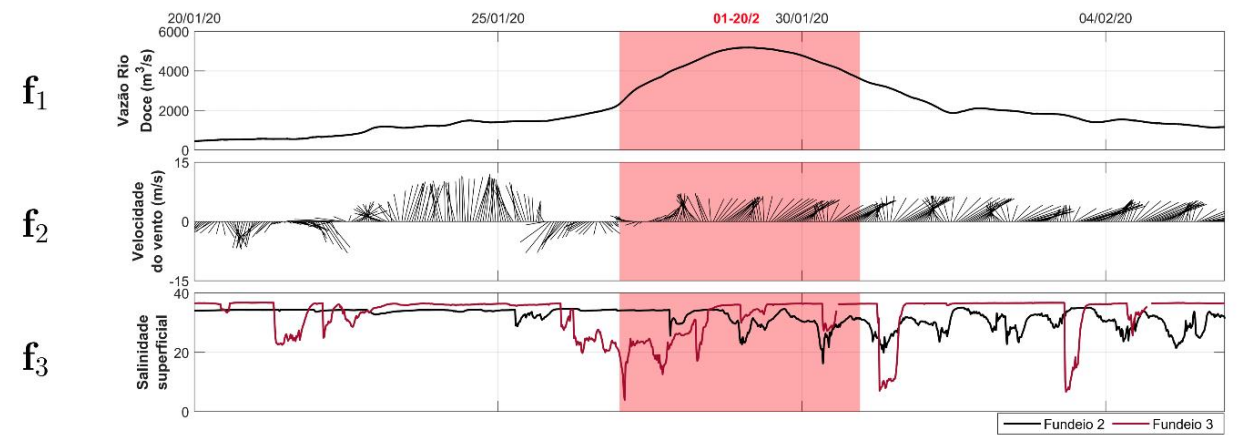
valores de Hs fez com que fossem registrados altos valores de turbidez também em superfície, acima de 60 NTU e máximo em ~160 NTU em 20 de agosto de 2022 no subsetor Foz Norte (Figura 1i₃). O limite *offshore* da turbidez superficial calculada via sensoriamento (≥ 2 FNU) foi observado entre as isóbatas de 30 m e 40 m em toda a plataforma continental adjacente à foz do Rio Doce no dia 21 de agosto (Figura 1i₅). Nesse mesmo dia, a pluma de ressuspensão de sedimentos finos gerados pela simulação numérica se dispersou por 2.139 km² e seu limite sul alcançou a isóbata de 40 m, no Setor APA Costa das Algas (Figura 1i₅). Nesse dia, a simulação do transporte de material ressuspendido apresentou direção preferencial para N-NO (Figura 1i₅), associado às correntes forçadas por ventos S (Figura 1i₁). A partir dos resultados descritos anteriormente, constatou-se que a dinâmica de sedimentos em suspensão na região da plataforma continental adjacente ao Rio Doce é controlada não só pelo aporte fluvial, que apresenta comportamentos diferenciados entre os períodos chuvoso e seco, como também pela incidência das ondas e do vento atuante. Os sedimentos finos, sejam oriundos diretamente pela vazão fluvial ou mesmo da ressuspensão do banco lamoso, são também transportados paralelamente à linha de costa sendo, portanto, capturados pela deriva litorânea, processo este controlado pela ação das ondas, dentro de uma faixa estreita que compreende a zona de surfe do sistema praiar. Uma vez incorporado ao sistema de correntes que se desenvolvem nesta faixa, os sedimentos finos são transportados pela deriva litorânea em um sentido e com intensidade que são determinados pelo clima de ondas vigente. A deriva litorânea apresenta uma alta variabilidade no seu comportamento, uma vez que, responde prontamente ao clima de ondas. Com isso, a análise do papel exercido pela deriva litorânea na redistribuição dos sedimentos finos se fez em termos de valores médios considerando a sazonalidade local. De forma geral, a deriva litorânea se direcionou para norte no Subsetor Foz Norte e para sul no Subsetor Foz Sul, relacionados, principalmente, à orientação da linha de costa e independente da direção do vento no local (Figura 1d). Ainda que atuando em uma faixa estreita próximo à linha de costa, a vazão litorânea apresentou a mesma ordem de grandeza da vazão do Rio Doce nos períodos secos (Figura 1d), ressaltando a importância do transporte de sedimentos dentro desta região. Durante o período seco, as ondas apresentaram uma energia maior em relação ao período chuvoso, resultando em uma vazão residual da deriva litorânea maior, variando de 3 a 10 m³/s (Figura 1d), enquanto no período chuvoso ela variou de 0,5 a 7 m³/s (Figura 1d), aproximadamente. Além disso, em condições de eventos extremos, a vazão litorânea atingiu valores muito superiores às condições médias. Nas seções ao norte da desembocadura, a vazão litorânea alcançou valores próximos a 30 e 50 m³/s nos eventos Iba e de Grande Ondas, descritos anteriormente. Uma evidência importante deste transporte pode ser constatada no teor de lama nas cotas de 5 e 10 metros diante dos perfis localizados no Subsetor Norte, onde o percentual de lama atingiu cerca de 90% (RRDM, 2020b), ressaltando o transporte de sedimentos finos nesta direção.

3.2 SALINIDADE NA SUPERFÍCIE DA COLUNA D'ÁGUA

Figura 2: Salinidade na superfície da coluna d'água



Continuação da Figura 2: Salinidade na superfície da coluna d'água



2a. Área de recorrência igual ou superior a 10% dos valores de salinidade ≤ 35 a partir dos resultados obtidos através de simulações numéricas para cada um dos cinco períodos chuvosos investigados durante o monitoramento PMBA/Fest. O valor de salinidade superficial de 35 é representativo da ocorrência de Água Costeira (Pereira et al., 2005), a massa d'água originada a partir da diluição da água oceânica pela água dos rios aportada à plataforma continental. **2b.** Valores anuais da área de abrangência da recorrência $\geq 10\%$ para salinidade superficial ≤ 35 (superior), volume acumulado de água aportado pelo Rio Doce na plataforma continental (meio) e o percentual do tempo de permanência da vazão nas condições de Alto Fluxo e Inundação relativo aos cinco períodos chuvosos monitorados (inferior). A escala de cores adotada para representar os diferentes Anos do PMBA/Fest foi a mesma do mapa ao lado (Figura 2a). **2c.** Área de recorrência igual ou superior a 10% dos valores de salinidade ≤ 35 , a partir dos resultados obtidos através de simulações numéricas para cada um dos cinco períodos secos investigados durante o monitoramento PMBA/Fest. **2d.** Valores anuais da área de abrangência da recorrência $\geq 10\%$ para salinidade superficial ≤ 35 (superior), volume acumulado de água aportado pelo Rio Doce na plataforma continental (meio) e o percentual do tempo de permanência da vazão nas condições Seca, Normal e Úmida relativo aos cinco períodos secos monitorados (inferior). A escala de cores adotada para representar os diferentes Anos do PMBA/Fest foi a mesma do mapa ao lado (Figura 2c) **2e.** Séries temporais relativas ao período de execução do PMBA/Fest (outubro/2018 a janeiro/2024): (1) Variação horária de vazão do Rio Doce (m^3/s) medida na estação P21 (Linhares - ES) do Ambiente Dulcícola; (2) Variação horária de salinidade prática calculada a partir da condutividade elétrica (uS/cm) e temperatura *in situ* ($^{\circ}\text{C}$), medidas na estação automática RDO-16 Boia (Linhares - ES) do Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos da Fundação RENOVA (PMQQS). 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. Os valores de vazão destacados referem-se aos maiores valores registrados para cada um dos períodos chuvosos investigados. Os retângulos verdes destacam os eventos mais importantes de Inundação durante o PMBA/Fest apresentados a seguir em ordem cronológica. **2f.** Evento de Inundação associado à campanha 01-20/2 do Marinho Integrado (período chuvoso do Ano 2): (1) Variação horária de vazão do Rio Doce (m^3/s) medida na estação P21 (Linhares - ES) do Ambiente Dulcícola; (2) Variação horária de ventos (m/s - notação meteorológica) provenientes da reanálise do *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) para o ponto $39,75^{\circ}\text{O}$ e $19,75^{\circ}\text{S}$; (3) Variação temporal da salinidade medida na superfície nos pontos de fundeios localizados no Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (em preto – Fundeio 1) e no Subsetor Foz Norte (em vermelho – Fundeio 3). Todas as séries temporais referem-se ao período entre 20 de janeiro e 05 de fevereiro de 2020. O período de realização da campanha de coleta de dados *in situ* 01-20/2 do Ambiente Marinho no Setor Foz é destacado pela faixa vertical vermelha. (4) Área de abrangência da salinidade superficial ≤ 35 obtida através de simulação numérica para o dia 29 de janeiro de 2020 (delimitada pela isolinha roxa). Os círculos em escala de cores representam a distribuição da salinidade superficial medida no Setor Foz durante a

campanha 01-20/2 do Marinho Integrado; (5) Seção de salinidade prática no subsetor Foz Central obtida pela perfilagem de CTD na campanha 01-20/2 do Marinho Integrado, cuja localização está indicada pelo sombreado cinza no mapa ao lado (Figura 2f₄). **2g.** Evento de Inundação associado à campanha 01-22 do Marinho Integrado (período chuvoso do Ano 4): (1) Variação horária de vazão do Rio Doce (m³/s) medida na estação P21 (Linhares - ES) do Ambiente Dulcícola; (2) Variação horária de ventos (m/s - notação meteorológica) provenientes da reanálise do ECMWF para o ponto 39,75°O e 19,75°S; (3) Variação temporal da salinidade medida na superfície nos pontos de fundeios localizados no Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (em verde – Fundeio 1), no Subsetor Foz Sul (em preto – Fundeio 2) e no Subsetor Foz Norte (em vermelho – Fundeio 3). Todas as séries temporais referem-se ao período entre 07 a 27 de janeiro de 2022. Os períodos de realização da campanha de coleta de dados *in situ* 01-22 do Ambiente Marinho são destacados pelas faixas verticais vermelha (Setor Foz), amarela (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz) e verde (Setor Norte). (4) Área de abrangência da salinidade superficial ≤ 35 obtida através de simulação numérica para os dias 13 (isolinha rosa) e 16 de janeiro de 2022 (isolinha roxa). Os círculos em escala de cores representam a distribuição da salinidade superficial medida durante a campanha 01-22 do Marinho Integrado, nos Setores Foz, APA e Norte; (5) Seções de salinidade prática no subsetor Foz Central (superior) e no Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (inferior) obtidas pela perfilagem de CTD na campanha 01-22 do Marinho Integrado, cujas localizações estão indicadas pelos sombreados cinzas no mapa ao lado (Figura 2g₄). **2h.** Evento de Inundação associado à campanha 01-23 do Marinho Integrado (período chuvoso do Ano 5): (1) Variação horária de vazão do Rio Doce (m³/s) medida na estação P21 (Linhares - ES) do Ambiente Dulcícola; (2) Variação horária de ventos (m/s - notação meteorológica) provenientes da reanálise do ECMWF para o ponto 39,75°O e 19,75°S; (3) Variação temporal da salinidade medida na superfície nos pontos de fundeios localizados no Subsetor Foz Norte (em vermelho – Fundeio 3) e no Setor Norte (em azul – Fundeio 4). Todas as séries temporais referem-se ao período entre 06 a 30 de janeiro de 2023. O período de realização da campanha de coleta de dados *in situ* 01-23 do Ambiente Marinho é destacado pelas faixas verticais vermelha (Setor Foz), amarela (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz) e verde (Setor Norte). (4) Área de abrangência da salinidade superficial ≤ 35 obtida através de simulação numérica para o dia 16 de janeiro de 2023 (isolinha roxa). Os círculos em escala de cores representam a distribuição da salinidade superficial medida durante a campanha 01-23 do Marinho Integrado, nos Setores Foz, APA e Norte. (5) Seções de salinidade prática no subsetor Foz Central (superior) e no Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (inferior) obtidas pela perfilagem de CTD na campanha 01-22 do Marinho Integrado, cujas localizações estão indicadas pelos sombreamentos cinzas no mapa ao lado (Figura 2h₄).

A salinidade superficial foi considerada um indicador direto do aporte fluvial proveniente do Rio Doce que, por sua vez, é um indicador indireto de áreas potencialmente impactadas por materiais dissolvidos e particulados associados ao rejeito de mineração proveniente do Rompimento da Barragem de Fundão (Mariana – MG) no Ambiente Marinho. A área de abrangência desse indicador dependeu da variabilidade das forçantes hidrológicas e meteoceanográficas para os diferentes períodos ao longo de todo o monitoramento. Ao serem analisados, os campos superficiais de salinidade obtidos a partir de simulações numéricas para os diferentes períodos secos e chuvosos, observou-se que os valores de

salinidade ($S \leq 35$) associados ao 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 2a e 2c). De modo geral, os períodos secos apresentaram as menores áreas de influência da pluma de baixa salinidade no Ambiente Marinho e também os menores volumes acumulados de água doce proveniente do Rio Doce na plataforma continental, em comparação aos períodos chuvosos (Figura 2c e 2d). Dessa forma, as áreas de recorrência das plumas de baixa salinidade obtidas através de resultados de simulações numéricas ficaram predominantemente confinadas ao Setor Foz e na região costeira do Setor Norte (Figura 2c), condicionados pela dinâmica meteoceanográfica decorrente da atuação de ventos do quadrante sul. O máximo valor registrado para a vazão fluvial durante os períodos secos foi de $1.514 \text{ m}^3/\text{s}$ no Ano 2, enquanto no Ano 1 o Rio Doce não ultrapassou a condição de vazão Normal e permaneceu por cerca de 70% do tempo na condição de Seca Extrema (Figura 2e₁). Isto conferiu ao Ano 1 o menor volume de água doce destinado à plataforma continental ($2,9 \times 10^9 \text{ m}^3$) (Figura 2d). Consequentemente, nesse mesmo ano foi observada uma intrusão salina no Rio Doce entre o final de junho a meados de novembro de 2019 (Figura 2e₂). No Ano 5 foi registrada a maior área de dispersão da pluma de baixa salinidade no Ambiente Marinho ($1,15 \times 10^3 \text{ m}^2$) dentre os períodos secos analisados, apesar de o volume de água doce aportado na plataforma continental ($\sim 6,9 \times 10^9 \text{ m}^3$) ter sido semelhante ao registrado no Ano 2 ($\sim 7,4 \times 10^9 \text{ m}^3$) (Figura 2d). Este fato foi associado tanto a uma maior dispersão da pluma de baixa salinidade para as regiões localizadas ao sul da desembocadura do Rio Doce, visto que no Ano 5 foram registrados ventos mais intensos de N-NE, quanto ao fato de a vazão permanecer nas condições Seca, Normal e Úmida durante todo este período (99,9% do tempo) (Figura 2d), isto é, não ocorrendo condições de Baixo Fluxo e Seca Extrema como nos anos anteriores (Figura 2e₁). Como resultado, neste ano houve a menor intrusão da cunha salina à montante do Rio Doce (máximo de 5,4), registrada entre o final de setembro e início de novembro de 2023 (Figura 2e₂). Por outro lado, os períodos chuvosos amostrados foram caracterizados pelo predomínio de vazões nas condições de Alta Vazão (Úmido, Alto Fluxo e Inundação) em função da frequência, intensidade e duração dos eventos de precipitação na bacia hidrográfica do Rio Doce (Figura 2e₁). Nestes períodos também houve o predomínio de ventos N-NE e correntes de SO-S que favoreceram o maior espalhamento modelado de águas de baixas salinidades para os Setores Foz Central, Foz Sul e APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (Figura 2a). No período chuvoso do Ano 4, a condição de vazão do Rio Doce variou entre Alto Fluxo e Inundação durante 31,9% do tempo. Esta frequência foi superior aos demais anos investigados (Figura 2b). Adicionalmente, também foi registrado o maior volume acumulado de água doce ingressando à plataforma continental ($2,38 \times 10^{10} \text{ m}^3$), assim como a maior área de recorrência da pluma de baixa salinidade modelada no ambiente marinho ($2,62 \times 10^3 \text{ m}^2$) (Figura 2b). Baseando-se nos quatro primeiros anos do monitoramento, observou-se uma relação direta entre a área de abrangência da pluma de baixa salinidade modelada e o volume de água aportado à plataforma continental (Figura 2b). Contudo, o período chuvoso do Ano 5 evidenciou a importância das condições meteoceanográficas vigentes nessa relação, visto que, apesar de no Ano 5 ter ocorrido o segundo maior volume aportado de todo o período ($2,10 \times 10^{10} \text{ m}^3$), devido a uma permanência elevada na condição de Alta Vazão (72% do tempo), foi no Ano 2 que foi registrada a segunda maior área ($1,39 \times 10^3 \text{ m}^2$) de abrangência da

pluma de baixa salinidade no Ambiente Marinho (Figura 2b). Neste período do Ano 2 também foi registrada a maior frequência de ventos S-SO (30,2% do tempo) e, consequentemente, o carreamento da água proveniente do Rio Doce para o Setor Norte, com baixos valores de salinidade estimados até próximo a localidade de Conceição da Barra – ES (Figura 2a). Entre os períodos chuvosos, houve três grandes eventos de Inundação do Rio Doce associados às campanhas do Marinho Integrado ao longo dos cinco anos de execução do PMBA/Fest (Figura 2e₁). O registro do maior valor da série temporal de vazão (5.595 m³/s - 13 de janeiro de 2022) precedeu a realização da campanha 01-22 do Marinho Integrado durante o período chuvoso do Ano 4 (Figura 2e₁). Os baixos valores de salinidade amostrados *in situ* (≤ 35) foram observados nos 3 primeiros metros de profundidade desde os pontos mais costeiros no Setor APA Costa das Algas até o Subsetor Foz Norte (Figura 2g₄ e 2g₅), e 4 m no ponto mais próximo da foz (Figura 2g₅). Além disso, observou-se nas séries temporais de salinidade superficial valores próximos de 20 no Subsetor Foz Sul e inferiores a 10 no Subsetor Foz Norte entre os dias 13 e 18 de janeiro (Figura 2g₃). No mesmo período, a salinidade superficial medida no fundeio localizado no Setor APA Costa das Algas atingiu 18,4 e se manteve baixa por 9 dias consecutivos (Figura 2g₃). O amplo alcance sobre a plataforma continental, tanto para sul quanto ao norte da foz, observado através de resultados de simulação numérica ocorreu porque durante o evento na condição de Alto Fluxo houve inversão na direção dos ventos atuantes na região da foz do Rio Doce (Figura 2g₄). Ventos N-NE e correntes O-SO precederam à campanha, mas nos dias de realização das coletas de dados hidrográficos na foz do Rio Doce, houve a entrada de um sistema frontal que ocasionou a inversão dos ventos e das correntes (Figura 2g₂), implicando no empilhamento da pluma do Rio Doce na costa (Figura 2g₅). Importantes eventos de Inundação também foram observados nos períodos chuvosos do Ano 2 (campanha emergencial 01-20/2, 5.179 m³/s) e do Ano 5 (campanha 01-23, 4.603 m³/s). No Ano 2, os valores de salinidade ≤ 35 foram observados nos Subsetores Foz Central e Foz Sul em até 2 m de profundidade (Figura 2f₄ e 2f₅). Nas séries temporais provenientes dos pontos de fundeio, os baixos valores de salinidade chegaram a um mínimo de 4 no dia 27 de janeiro de 2020 no Subsetor Foz Norte e de ~16 no Subsetor Foz Sul no dia 30 do mesmo mês (Figura 2f₃). O registro de menor salinidade no Subsetor Foz Norte foi observado durante uma condição de Alto Fluxo associado a ocorrência de vento S anterior à condição de Inundação (Figura 2f₁, 2f₂ e 2f₃). Durante e após o maior pico de vazão, o vento retornou à direção N-NE favorecendo o registro de menores valores de salinidade no Subsetor Foz Sul (Figura 2f₁, 2f₂ e 2f₃), como mostrado pela pluma modelada do dia 29 de janeiro de 2020 (Figura 2f₄). A distribuição de salinidade para o período chuvoso do Ano 5 mostrou que os baixos valores foram reportados superficialmente nos Subsetores Foz Central e Foz Sul e nas regiões mais profundas (cerca de 30 m) do Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (Figura 2h₄). Ao longo da coluna d'água, a profundidade máxima foi encontrada no Subsetor Foz Sul com apenas 2 m, e ainda mais rasa (1 m) e distante da costa no Setor APA Costa das Algas (Figura 2h₅). Nas séries temporais, os menores registros de salinidade observados no Subsetor Foz Norte e no Setor Norte estiveram relacionados a ocorrência de vento S e S-SE concorrentes às condições de Alta Vazão, em momentos anteriores e posteriores a realização da campanha 01-23 do Marinho Integrado (Figura 2h₁, 2h₂ e 2h₃). Assim, não foram observados valores significativos de diminuição de salinidade ao norte da foz do Rio Doce durante a execução da campanha. Da mesma forma, a pluma de baixa salinidade modelada para o dia

16 de janeiro de 2023 se apresentou orientada para SO descolada da costa ultrapassando o Setor APA Costa das Algas, com um limitado alcance ao Subsetor Foz Norte (Figura 2h4). Em todos os casos de eventos de Inundação houve uma relação direta entre o aumento da vazão e a diminuição da salinidade, principalmente no Setor Foz. Contudo, a depender das inversões das correntes decorrentes da passagem de sistemas meteorológicos transientes, o alcance da água menos salina chegou às porções da plataforma continental mais ao norte da foz do Rio Doce, contrariando o alcance mais ao sul relacionado aos ventos predominantes de N-NE. Essas variações ressaltam principalmente a importância das forçantes meteoceanográficas a partir do momento em que a água proveniente do Rio Doce alcança o Ambiente Marinho.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO

Ao longo dos cinco anos do PMBA/Fest, o Tema Modelagem Numérica avaliou as forçantes hidrológicas e meteoceanográficas no intuito de identificar e caracterizar a hidrodinâmica marinha, a fim de subsidiar os demais Temas que fazem parte do PMBA/Fest no entendimento e interpretação dos seus resultados. Concomitantemente, foi dado destaque à descrição espaço-temporal da turbidez/concentração de sedimento em suspensão na coluna d'água e da salinidade superficial. Apesar de serem considerados indicadores indiretos de áreas potencialmente impactadas pelo material proveniente do Rompimento da Barragem, estas análises permitiram compreender a dinâmica da dispersão da pluma do Rio Doce e/ou da ressuspensão do material lamoso depositado na plataforma continental.

Os eventos hidrológicos que aconteceram na bacia do Rio Doce acarretaram em aumentos significativos da vazão fluvial, aumentando, também, o aporte de material com rejeitos de mineração à plataforma continental associados à descarga continental. No ambiente marinho, a pluma do Rio Doce é advectada em resposta às condições hidrodinâmicas costeiras, isto é, ventos N-NNE-NE e correntes S-SSO-SO resultam no deslocamento da pluma para sul, paralela e desacoplada à costa, e ventos SSE-S-SSO e correntes NNO-N-NNE deslocam a pluma para norte, próxima à costa. As maiores áreas de influência do aporte fluvial ocorreram durante eventos que combinaram elevadas vazões, simultâneas às inversões de ventos associadas às passagens de sistemas transientes.

O material particulado em suspensão que chega à plataforma continental proveniente do aporte fluvial sofre floculação e sedimenta no leito marinho. Uma vez que esse sedimento fino de origem terrígena se encontra depositado nos bancos lamosos na plataforma continental (Bastos *et al.*, 2015; Vieira *et al.*, 2019), a ressuspensão é promovida quando a tensão de fundo gerada sobretudo por ondas e maré supera um valor crítico capaz de romper a coesividade do depósito lamoso ou quando ocorre uma variação brusca de pressão na coluna d'água devido à turbulência. A tensão oscilatória (orbital) de fundo gerada por ondas de gravidade superficiais com Hs maiores do que 2 m foi o principal mecanismo de ressuspensão do sedimento fino do banco lamoso adjacente à foz do Rio Doce. A ressuspensão por ondas é sensível aos maiores Hs, maiores Tp, Dp de SSE-SE-ESE e o tempo de duração desses

eventos. A energia das ondas deixa os materiais particulados e dissolvidos em suspensão para serem transportados pela ação de correntes geradas pela tensão de cisalhamento do vento e pelas correntes residuais de maré, distribuindo os sedimentos em suspensão na plataforma continental interna. Esses sedimentos ainda podem ser captados pela deriva litorânea que transporta o sedimento para regiões além da foz do Rio Doce.

A vazão fluvial e a ressuspensão por ondas interferem de duas formas distintas na turbidez e na salinidade superficial: como eventos crônicos (contínuos) ou agudos (pontuais), que geram respostas distintas dos indicadores no ambiente. Entende-se como eventos agudos os picos de vazão devido ao aumento da precipitação na bacia que ocorrem durante os períodos chuvosos (de outubro a março) e os aumentos de energia de ondas devido à passagem de sistemas transientes mais frequentes durante os períodos secos (de abril a setembro). A divisão em dois períodos sazonais foi uma adaptação da climatologia da vazão estabelecida para a bacia hidrográfica do Rio Doce (Oliveira e Quaresma, 2017) devido ao padrão de variabilidade dos indicadores durante o período de monitoramento.

De modo geral, nos períodos chuvosos foram registrados episódios de aumentos da vazão fluvial em função da frequência, intensidade e duração dos eventos de precipitação na bacia hidrográfica do Rio Doce, houve predomínio nas condições de Alta Vazão (Úmido, Alto Fluxo e Inundação), que resultou em um acréscimo na carga sedimentar transportada pelo Rio Doce. Nestes períodos, quando caracteristicamente houve predomínio de ventos NNE-NE e correntes de SO-SSO-S, foram observados incrementos na turbidez superficial e diminuição dos valores de salinidade superficial nos setores Foz Central, Foz Sul e APA Costa das Algas. O período chuvoso foi caracterizado, também, pela formação de um forte gradiente térmico muito evidente nas imagens de Temperatura da Superfície do Mar (TSM). Isto ocorreu devido à presença do processo de ressurgência costeira ao sul da foz do Rio Doce que se desenvolve em resposta à atuação da tensão de cisalhamento NE que resulta em um transporte de Ekman superficial em direção *offshore* e o afloramento da água mais fria e mais rica em nutrientes à superfície na porção interna/média da plataforma continental. A presença dessa massa de água oceânica e o gradiente vertical de densidade ocasionado pela vazão do Rio Doce, por vezes criaram condições de estratificação vertical na coluna d'água que interferiram na distribuição de sedimentos em suspensão.

Por outro lado, os períodos secos foram caracterizados pela redução da descarga continental e pelo aumento da frequência de passagem de sistemas transientes em relação aos períodos chuvosos. Dessa forma, as áreas de recorrência das plumas de turbidez e baixa salinidade obtidas através de resultados de sensoriamento remoto e simulações numéricas foram predominantemente observadas confinadas ao Setor Foz, podendo alcançar o subsetor Foz Norte e Setor Norte, como um fluxo estreito e acelerado fluindo próximo à costa. Durante este período, o processo de ressurgência costeira não ficou tão evidente nas imagens de TSM quanto no período chuvoso. No primeiro trimestre do período seco, a ressurgência foi caracterizada como imatura, isto é, não aflorou à superfície, enquanto no segundo trimestre o gradiente termohalino superficial foi enfraquecido em função da perda radiativa superficial líquida de calor do oceano para a atmosfera que tende a homogeneizar a temperatura superficial na região.

Os sistemas transientes também estiveram associados ao incremento de Hs, que foi o principal responsável pela ocorrência dos maiores valores de turbidez no fundo. As ondas atuam sobre a plataforma durante todo o ano, mas foi durante os períodos secos que ocorreram os eventos mais energéticos, ou seja, ondas de maiores Hs e Tp. Os períodos secos apresentaram uma maior recorrência de dias com ondas com altura significativa maior do que 2 m em comparação aos períodos chuvosos. O aumento da energia das ondas incidentes, principalmente de SSE-SE-ESE, atuou na ressuspensão do material depositado no fundo e o transporte desse material para áreas distantes. A depender das condições hidrodinâmicas atuantes foi possível registrar aumentos nos valores de turbidez em superfície derivados da ressuspensão de sedimentos de fundo, devido à intensificação da mistura vertical proporcionada pelo aumento da energia de ondas em eventos pontuais de intenso aumento de Hs (por exemplo, o Evento de Grande Ondas), ou sucessivos eventos menos intensos com maior duração (Tempestade Tropical Iba).

Independente do período (seco ou chuvoso) ou dos eventos analisados, parte da pluma de sedimentos se espalhou sobre a plataforma continental interna, onde correntes residuais de maré controlaram o transporte (RRDM, 2020a; Gabioux *et al.*, 2021). Próximo da região costeira, parte desta pluma pôde ser captada pela deriva litorânea. A influência da maré se tornou mais importante ao norte da foz, com ênfase na latitude de 18,5° S onde há o ponto de maior amplificação (RRDM, 2020a; Gabioux *et al.*, 2021). Já na porção sul, região de micromaré, foi observada pouca influência das marés nas correntes (menos de 10% da variabilidade da corrente foi explicada pela maré).

Nas análises realizadas foi identificado um complexo padrão de assimetria de maré, com mudanças latitudinais na região costeira (RRDM, 2020a; Gabioux *et al.*, 2021). Na plataforma continental, foi identificado um padrão de assimetria positivo nos níveis ao norte do Rio Doce e negativo ao sul. No entanto, as correntes residuais parecem não responder a esse padrão de assimetria de níveis na região entre a foz do Rio Doce e 18,0°S, em função da configuração geométrica. A dominância de correntes de enchente ao norte da desembocadura do Rio Doce pode ser um indicativo de como a maré contribuiria para o deslocamento de plumas de sedimentos na direção norte, junto com a ação de outras forças, como os ventos de quadrante sul principalmente durante eventos de frente fria e à deriva litorânea.

Dentro do contexto dinâmico da área costeira adjacente ao Rio Doce, a deriva litorânea atuou como um importante mecanismo de transporte de sedimentos em suspensão para outras regiões. De uma forma geral, independente da sazonalidade, a deriva litorânea se direcionou para norte no subsetor Foz Norte e para sul no subsetor Foz Sul, relacionados, principalmente, à orientação da linha de costa. Uma evidência deste transporte pôde ser verificada pelo teor de lama na antepraia, principalmente na cota batimétrica de 10 metros, nos pontos mais ao norte da desembocadura do Rio Doce, com percentuais em torno de 40 a 70%, chegando em alguns casos a mais de 90% (RRDM, 2020b). Ainda que atuando em uma faixa estreita próximo à linha de costa, a vazão litorânea apresentou a mesma ordem de grandeza da vazão do Rio Doce nos períodos secos, ressaltando a importância do transporte de sedimentos dentro desta região. Durante o período seco, as ondas apresentaram uma energia maior em relação ao período chuvoso, resultando em uma vazão residual da deriva litorânea maior. Apesar

da corrente com direção sul ser a mais persistente ao longo do ano, ela esteve associada com ondas com altura significativas menores do que 2 m, ventos NE de menor intensidade e carga de sedimento oriundo apenas do Rio Doce, resultando em um transporte do sedimento ressuspendido para o norte mais significativo do que para o sul. Além disso, em condições de eventos extremos (Tempestade Tropical Iba e Evento de Grande Ondas), a vazão litorânea atingiu valores muito superiores às condições médias. Ainda, é importante destacar que a direção do transporte litorâneo não é afetada, significativamente, pela direção do vento. Por exemplo, ao norte da desembocadura do Rio Doce, o transporte litorâneo ocorreu para norte com uma frequência anual de 70%, aproximadamente, e dentro deste período o vento NE atuou cerca de 64%, ou seja, com direção contrária ao transporte litorâneo (Vinzón *et al.*, 2023). Em resumo, a captura de sedimentos pelas correntes costeiras e deriva litorânea pode ser configurada como o processo mais relevante de transporte de sedimentos e rejeitos, tanto da pluma do Rio Doce quanto da ressuspensão de sedimentos do depósito da plataforma, para as imediações do Parque Nacional Marinho de Abrolhos.

Por fim, a compreensão da variabilidade espaço-temporal dos indicadores do Tema Modelagem se deu através do entendimento das diferentes forças e processos físicos atuantes na região costeira e na plataforma continental adjacente ao Rio Doce. É importante ressaltar que isto somente foi possível devido à compilação das análises fornecidas pelos dados obtidos *in situ*, sensoriamento remoto e resultados das modelagens numéricas. Os dados *in situ* amostrados nas campanhas do Marinho Integrado retrataram somente as condições oceanográficas instantâneas. Contudo, sabe-se que o comportamento dos indicadores investigados no âmbito do PMBA/Fest apresentou diferentes tempos de resposta às mudanças do ambiente que, por vezes, responderam às condições meteoceanográficas pretéritas à coleta de dados. Por isso, foram necessárias outras ferramentas para compreender a evolução espaço-temporal dos indicadores, inclusive nos intervalos entre as campanhas. Neste contexto, os Fundeios forneceram séries temporais em alta resolução de diversos parâmetros. Em outra abordagem, os dados obtidos por sensoriamento remoto permitiram uma análise sinótica da dinâmica do ambiente marinho. Por sua vez, as modelagens numéricas, tanto hidrodinâmica quanto de transporte de sedimentos, validadas com as medições *in situ* preencheram as lacunas observacionais das outras três ferramentas e permitiram a análise dos processos responsáveis pela dispersão dos indicadores. Logo, o emprego das diferentes ferramentas supracitadas subsidiou a integração dos resultados do Tema Modelagem com os gerados pelos demais Temas e Ambientes do PMBA/Fest.

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todos os itens previstos foram cumpridos integralmente para o Tema Modelagem Numérica.

6 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 Earth Sciences**. 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
- CARRERE, L.; LYARD, F.; CANCE, M.; GUILLOT, A. ; PICOT, N.: FES2014, a new tidal model - Validation results and perspectives for improvements, presentation to ESA Living Planet Conference, Prague 2016.
- 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 Anual do PMBA/Fest–RT-43, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 193 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.
- GABIOUX, M.; BRIGAGÃO, G.; ACHETE, F.; FONSECA, D.; GALLO, M.; VINZON, S.; MILL, G.; FONSECA, S.; GHISOLFI, R. Análise do comportamento da maré na costa norte do Espírito Santo (Brasil). XXXIX Congresso Latinoamericano de Hidráulica XXVI Congreso Nacional de Hidráulica. IAHR, AMH, Acapulco, Mexico. 2021.GEBCO, General Bathymetric Chart of the Oceans. Disponível em: <https://www.gebco.net/>. Acesso em: 12 de abril de 2024.

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.

LYARD, F.; CARRERE, L.; CANCE, M. ; GUILLOT, A.; PICOT, N.: FES2014, a new finite elements tidal model for global ocean, in preparation, to be submitted to Ocean Dynamics in 2016.

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. 2020a.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual - Evolução espaço-temporal na qualidade ambiental e na biodiversidade no ambiente costeiro – RT-36C. Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-Santense de Tecnologia. 422 pgs. 2020b.

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

SEA-BIRD ELECTRONICS. Seasoftware 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.

VINZÓN, S. B.; GALLO, M. N.; GABIOUX, M.; FONSECA, D.; ACHETE, F.; GHISOLFI R.; MILL, G.; FONSECA, S; QUARESMA, V. S.; OLIVEIRA, K. S.S.; BRIGAGÃO, G.; MACHADO, L. G. The role of waves in the transport of fine sediments and mine tailings from the Fundão dam failure, Doce River, Brazil. **International Journal of Sediment Research**, 39 (1): 44 – 60. 2024.

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