

**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

RT52/OUT 25

RSE2025 PMBA/FEST-UFES

Vitória,

Outubro de 2025

EQUIPE TÉCNICA

Prof. Dr. Renato David Ghisolfi (Coordenador)

Prof. Dra. Susana Beatriz Vinzón

Prof. Dr. Marcos Nicolás Gallo

Dra. Gabriela Verónica Buraschi

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. Gabriela Corrêa Brasileiro

MSc. Júlia Tavares Salviato

MSc. Tayná Rosa Martins Paiva

MSc. Thiago Fagundes Leão

Dominique Joelle Silva

Evelyn Leite Santos

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.....	6
2.2.1	Sensoriamento remoto.....	6
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.....	11
2.3.1	Dados <i>in situ</i>	11
2.3.2	Sensoriamento Remoto.....	11
2.3.3	Modelagem numérica	12
2.4	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS.....	13
3	RESULTADOS DOS INDICADORES	14
3.1	SALINIDADE NA SUPERFÍCIE DA COLUNA D'ÁGUA.....	15
3.2	TURBIDEZ/ CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO NA COLUNA D'ÁGUA .	20
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO	26
5	ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS	27
6	REFERÊNCIAS	28

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

A malha e frequência amostrais do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest-UFES) passaram por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para atender aos objetivos do Programa. Estas alterações foram orientadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) e aprovadas pelo Comitê Interfederativo (CIF), por meio de: (1) Ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição), (2) Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest-UFES” e (3) Ofício SEI Nº 32/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio, Nota Técnica nº 1/2024-CTBio/DIBIO/ICMBio e Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024.

As modificações implementadas encontram-se nos seguintes Materiais Suplementares, os quais contemplam todo o período de execução do PMBA/Fest-UFES: 1) MS – Malha amostral, que apresentam as estações amostrais executadas ao longo do tempo por todos os Anexos/Temas, separados por cada marco temporal histórico mencionado acima (“Ano 1”, “Transição”, “Novo Ciclo” e “Deliberação 803”); 2) Frequência amostral, o qual contempla o histórico da periodicidade amostral (seguindo os mesmos Anexos/Temas contemplados no item 1) e 3) MS – Mapas históricos das malhas amostrais, que apresenta os mapas das malhas amostrais (incluindo as estações) executadas por todos os Anexos/Temas.

Segue o detalhamento temporal, como forma de esclarecer a execução dentro dos marcos históricos: “Ano 1” (setembro de 2018 e setembro de 2019); “Transição” (outubro de 2019 e julho de 2022); “Novo Ciclo” (agosto de 2022 a setembro de 2024) e “Deliberação 803” (outubro de 2024 a março de 2026). O grupo da Ecotoxicologia é uma exceção a esta historicidade, pois iniciou a amostragem referente ao “Novo Ciclo” em janeiro de 2023 e segue com a “Deliberação 803”, na periodicidade já informada.

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-UFES a fim de determinar os indicadores.

2.1 COLETA

A amostragem *in situ* é composta por dois conjuntos de dados: amostragens em pontos definidos pelas campanhas do Marinho Integrado, e amostragens que constituem séries temporais realizadas em estações fixas (linhas de fundeio). Os perfis verticais de temperatura, salinidade (estimada a partir da

condutividade), turbidez, fluorescência e oxigênio dissolvido foram obtidos por um equipamento do tipo 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 passaram 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, assegurou-se que os dados não apresentariam valores discrepantes e/ou descontinuidades nas análises posteriores. Por fim, foram 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 parâmetros 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 as outras duas ao sul. Cada linha de fundeio contemplou uma medição junto ao fundo (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*). As medições de ondas foram realizadas a cada hora e as de correntes em intervalos de 20 min, ambas através de equipamentos ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*) instalados próximos ao fundo. O modelo do ADCP utilizado nas linhas de fundeio localizadas ao norte da foz foi o Signature1000 (Nortek Group), enquanto ao sul da foz do rio Doce o modelo utilizado foi o Signature500 (Nortek Group). Vale ressaltar que, para o Novo Ciclo do PMBA/Fest-UFES, as linhas de fundeio foram reduzidas para apenas duas ao norte da foz. Os dados foram extraídos mensalmente dos equipamentos através da realização de atividade embarcada de coleta e manutenção. Esses dados passaram por um pré-processamento que envolve o auxílio do *software* disponibilizado pelo próprio fabricante do equipamento (SignatureWaves64) e o MATLAB®, dos quais foram retirados os dados espúrios.

Além das amostragens previamente mencionadas, foi realizada uma campanha em dezembro de 2023, prevista no Plano de Trabalho como subsídio à modelagem numérica de transporte de sedimentos. Nesse campo foram realizadas amostragens de sedimentos de fundo na região que compreende a extensão do banco lamoso com o intuito de verificar as características do sedimento, quanto à sua granulometria e densidade, utilizando uma draga do tipo Van Veen, testemunho raso e um densímetro modelo *DensiTune* da marca STEMA.

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 foram 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 consistiu 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 foi aplicada 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*] foram provenientes de uma análise mista das reflectâncias na banda do espectro correspondente ao vermelho, azul e verde. A camada superficial onde foi 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 foi resultante da radiação emitida nos primeiros milímetros da coluna d'água (SOUZA, 2005).

O cálculo da turbidez superficial proposto por Dogliotti e outros (2015) foi feito com o *software* MATLAB®. Essa equação utilizou 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 foi 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*) foi utilizado para evidenciar os processos costeiros ao longo da plataforma continental do Espírito Santo e oceano adjacente.

Dois domínios numéricos com distintas resoluções espaciais foram utilizados para as simulações hidrodinâmicas. No domínio de maior área (Grade 1), a resolução espacial implementada foi igual a $1/24^\circ$ (aproximadamente 4,6 km), cobrindo a região entre 49° e 27° W e entre 8° e 27° S. Aninhada à Grade 1, foi utilizada a técnica de *downscaling two-way* numa segunda grade (Grade 2), que apresentou resolução espacial de $1/120^\circ$ (0,9 km). A Grade 2 abrangeu 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).

Condições numéricas específicas foram aplicadas aos limites espaciais do modelo. A elevação da superfície foi parametrizada pela condição limite de Chapman (modo explícito) (CHAPMAN, 1985), enquanto as parametrizações *radiation/nudging* e Flather (2D momentum) (FLATHER, 1976) foram

utilizadas para as componentes baroclínica e barotrópica, respectivamente. O modo *radiation* utilizado foi resolvido por Orlanski (1976) e Raymond e Kuo (1984) e reproduziu 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) foi aplicado em 5 dias no interior do domínio.

A difusão horizontal harmônica ($10 \text{ m}^2/\text{s}$) foi utilizada para *momentum* e os traçadores (temperatura e salinidade). Os traçadores foram misturados ao longo das superfícies geopotenciais e o *momentum* foi misturado ao longo dos níveis sigma. Uma camada esponja para difusividade de 30 pontos de grade foi incluída nos limites abertos da Grade 1 e 2, enquanto o coeficiente de viscosidade horizontal foi mantido constante em todo o domínio ($A_h = 50 \text{ m}^2/\text{s}$). A mistura turbulenta vertical foi parametrizada pelo modelo *Generic Length Scale* (GLS: k-kl) para os parâmetros de fechamento turbulento (WARNER *et al.*, 2005). A tensão de cisalhamento de fundo foi 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 foi de 40 camadas sigma com a prescrição dos parâmetros de estiramento de superfície e fundo 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 incluíram 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), disponibilizados numa grade regular com resolução espacial de $0,25^\circ$ e resolução temporal horária. A forçante de maré foi 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 $1/4^\circ$, utilizados nos limites abertos das grades (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 $9,5 \text{ km}$ de resolução horizontal) juntamente com a reanálise do sistema de Assimilação de Dados Oceânicos Acoplados à Marinha (NCODA) (HYCOM, 2011) forneceu as condições iniciais e diárias dos limites (temperatura, salinidade, elevação e velocidades).

2.2.3 Modelagem numérica de transporte de sedimentos

Para a simulação da hidro-morfodinâmica da plataforma continental e zona costeira foi utilizado o modelo numérico computacional DELFT3D (Delft3D-FLOW, 2023; Delft3D-WAVE, 2023). A grade do domínio modelado foi estruturada em coordenadas esféricas e apresentou como limite a borda da plataforma continental. A grade computacional é composta por 54.120 células com maior resolução espacial na região adjacente à foz do rio Doce, em torno de 130 m , enquanto para as demais áreas do domínio a resolução espacial foi em média de 450 m .

A batimetria implementada no modelo foi construída a partir da digitalização das cartas náuticas da Marinha do Brasil. Para a porção costeira do Espírito Santo, os dados foram digitalizados e gentilmente

cedidos por Bastos *et al.* (2015), enquanto para a região costeira localizada ao sul da Bahia digitalizou-se as cartas náuticas n° 22700, 1310, 1311 e 1312.

Em relação às forças hidrodinâmicas, considerou-se o efeito da maré, das ondas, do vento e da pressão atmosférica. Como condição de contorno de maré foram prescritas as 10 principais constantes harmônicas, sendo elas: 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 das constantes foram extraídas do modelo global FES2014 e interpoladas para os pontos nos contornos da grade computacional (CARRERE *et al.*, 2016; LYARD *et al.*, 2016).

As simulações das ondas de gravidade na plataforma continental interna e região costeira foram realizadas com o módulo de ondas do DELFT3D que, por sua vez, utiliza o modelo SWAN (Simulating WAves Nearshore). Para a modelagem das ondas foram utilizadas as condições de contorno produzidas por *Copernicus Climate Change Service* (C3S) do ECMWF. Os dados de altura significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção média (Dir) de ondas, assim como os dados das componentes do vento e da pressão atmosférica, foram extraídos do ERA5/ECMWF (Hersbach *et al.*, 2020).

Em relação às parametrizações da viscosidade turbulenta horizontal e da tensão de atrito de fundo, adotou-se um valor constante do coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal ($1 \text{ m}^2/\text{s}$) para o cálculo da mistura horizontal em todo o domínio modelado. Para o cálculo da tensão de atrito no fundo, utilizou-se a formulação de Chézy, na qual também se considerou um valor constante para o coeficiente em todo o domínio ($C = 65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$).

Para a integração dos resultados do transporte de sedimentos referentes aos períodos chuvosos investigados ao longo dos sete anos de execução do PMBA/Fest utilizou-se um modelo integrado na vertical (2DH). Os sedimentos finos modelados no Delft3D foram separados em 2 classes, sendo a primeira composta por sedimentos advindos do rio Doce e a segunda por sedimentos ressuspensos dos depósitos lamosos presentes na plataforma continental interna. A série temporal horária do aporte de sedimentos do rio Doce utilizada nas simulações foi calculada pelo Tema Bacia de Integração (Ambiente Dulcícola do PMBA/Fest-UFES) a partir da curva-chave de sedimentos em suspensão da estação fluviométrica P21 (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), assim como dos resultados das amostragens *in situ* realizadas em dezembro de 2023.

Considerando que o banco lamoso apresenta um alto teor de lama em toda a sua extensão, sendo este superior a 90% próximo à foz do rio Doce, a densidade considerada no modelo foi, aproximadamente, de $1600 \text{ kg}/\text{m}^3$. 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 em suspensão foi calculado a partir da equação advectivo-difusiva do módulo (DELFT3D-FLOW, 2023). O coeficiente de mistura vertical adotado para o sedimento fino foi igual ao coeficiente de mistura de fluido vertical calculado pelo modelo (DELFT3D-FLOW, 2023). A erosão e deposição de sedimentos sobre o leito foram calculadas através da formulação de

Partheniades-Krone (DELFT3D-FLOW, 2023). As validações das modelagens hidrodinâmica, de ondas e de transporte de sedimentos finos em suspensão foram realizadas através da comparação dos resultados das simulações e os dados coletados nas linhas de fundeio.

Especificamente para a análise do período chuvoso do Ano 7, além do modelo 2DH, foi implementado um modelo tridimensional (3D) do DELFT3D-4, com discretização vertical em 15 camadas sigma. O modelo 3D foi forçado com as mesmas forçantes hidrodinâmicas aplicadas ao modelo 2DH. Além disso, foram impostas condições de contorno de salinidade com valor constante igual a 36, no tempo e no espaço. O valor adotado para o aporte fluvial foi igual a zero. Adicionalmente, a condição de contorno de temperatura foi variável no espaço, apresentando gradiente latitudinal obtido a partir das simulações do modelo ROMS. Para a fronteira sul da grade, os valores variaram entre 17°C e 24°C, enquanto que para as fronteiras leste e norte a temperatura variou entre 22°C e 25°C. O aporte fluvial foi prescrito com temperatura constante de 24°C.

Os resultados referentes às concentrações de sedimentos obtidos via modelo 2DH foram representados pela recorrência de 50% (mediana) de valores iguais ou maiores a 1 mg/l durante os sete períodos chuvosos investigados ao longo do período de execução do PMBA/Fest-UFES. Por outro lado, para o período chuvoso do Ano 7, o modelo 3D foi empregado para investigar os eventos de alta vazão do rio Doce e de passagem de sistemas frontais, bem como o período de realização das campanhas do Marinho Integrado.

Os resultados de transporte de sedimentos em suspensão oriundos do banco lamoso foram expressos em termos de média por duração do evento (dias ou semanas). Para o período chuvoso do Ano 7, a pluma fluvial modelada do rio Doce foi representada considerando a primeira camada do modelo 3D (camada superficial), correspondente a 2% da coluna d'água e que está associada à descarga fluvial sólida. O modelo 3D também permitiu observar o material sedimentar ressuspensionado, visto que foram analisadas as concentrações de sedimentos finos da camada superficial, associadas aos depósitos lamosos localizados na plataforma continental interna. Adicionalmente, foram avaliadas as concentrações do material sedimentar colocado em ressuspensão próximo ao fundo (camada de fundo), correspondente à profundidade de 98% da coluna de água a partir da superfície. Visando melhor identificar os períodos de ressuspensão, também foi avaliada a série temporal de velocidades orbitais no fundo, oriunda da modelagem numérica de ondas.

2.2.4 Estimativa da Deriva Litorânea

Para estimar as vazões do transporte litorâneo geradas pelas correntes longitudinais devido à quebra das ondas, obedeceu-se a metodologia de Rodriguez e Mehta (2000). Para cada perfil do litoral (dimensão longitudinal, y) calculou-se 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 a determinação de $V(y)$ utilizou-se um modelo analítico-paramétrico com base nos trabalhos de Longuet-Higgins (1970a; 1970b). O modelo considerou o balanço entre forças de atrito (F_y), relacionadas às condições físicas da praia, tais como sedimento e declividade, e o gradiente, normal à praia, da componente tangencial da tensão de radiação (S_{xy}). Este último obtido a partir das condições de ondas

na arrebentação. A partir deste balanço, foi 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 permitiu 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 nove 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 são coincidentes com a localização dos perfis de praia monitorados pelo Tema Praias do Ambiente Costeiro (FEST, 2023). Os perfis S4 a S6 estão localizados ao sul da foz do rio Doce, enquanto os perfis N1 a N6 estão situados ao norte da foz do rio (Figura 2c). Os perfis de praia localizados mais ao sul (S1 a S3) não foram considerados nos cálculos da vazão litorânea, pois se encontram em região composta por terraços de abrasão, que controlam a incidência das ondas na praia e alteram, assim, a dinâmica de correntes no sistema praial. Nestes locais, uma parcela significativa da energia das ondas se dissipa quando estas se rompem nos afloramentos rochosos. As informações sobre as características da praia para cada perfil (azimute, diâmetro do grão (D_{90}) e declividade), foram obtidas dos levantamentos de campo realizados na região pelo Tema Praias do Ambiente Costeiro (RRDM, 2019a). Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos valores atualizados das variáveis mencionadas. Considerando um coeficiente de difusão máximo de $0,02 \text{ m}^2/\text{s}$ (BOSBOOM & STIVE, 2012), foram calculados coeficientes de mistura (P) para os diferentes perfis de praia considerados, resultando um valor médio de 0,15, o que reduziu a velocidade máxima da corrente litorânea (V_{\max}) em aproximadamente 40%.

Tabela 1: Valores dos parâmetros utilizados nas estimativas das vazões pela deriva litorânea.

Ponto	Azimute	D_{90} (m)	Declividade
S4	114,00	0,000871	0,03810
S5	138,43	0,001738	0,03333
S6	155,34	0,001738	0,03333
N1	110,80	0,001229	0,03500
N2	104,33	0,002457	0,05000
N3	82,39	0,004890	0,03333
N4	84,88	0,003990	0,04286
N5	88,90	0,005286	0,02308
N6	109,54	0,005286	0,02308

A altura e o ângulo de incidência das ondas, utilizados no cálculo da componente tangencial da tensão de radiação, foram extraídos 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 ($h(y)$) foram utilizadas formulações paramétricas (BATTJES & JANSSEN, 1978; KOMAR & GAUGHAN, 1973). A partir da declividade de cada perfil e a profundidade de quebra das ondas, determinou-se a largura da zona de surfe ($B(y)$). O produto da velocidade longitudinal e a

área de influência para cada perfil possibilitou 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 perfilagem de CTD foram analisados por meio de seções horizontais e verticais e de mapas. Já os dados obtidos nos pontos de fundeio foram 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 permitiu definir os eventos hidrológicos e de aumento da energia das ondas que foram avaliados com a finalidade de caracterizar os principais processos físicos que atuaram na região da foz do rio Doce e adjacências.

Em relação aos dados de turbidez (NTU) obtidos pelos turbidímetros presentes nos fundeios F3 e F4, foram realizadas conversões do seu sinal em concentração de sedimento em suspensão (CSS - mg/l) utilizando a seguinte curva de calibração:

$$CSS = (0,644 \pm 0,033) \times NTU + 7,646 \pm 0,582$$

A curva foi construída com 2301 pares de amostras (concentração de sedimentos determinada em laboratório e sinal do turbidímetro). As amostras utilizadas foram aquelas coletadas pelos mergulhadores durante as manutenções dos sistemas de fundeios e amostras coletadas pelo Marinho Integrado durante a realização das campanhas entre os anos de 2018 e 2025.

No intuito de analisar as variações da turbidez medidas nos fundeios (próximas ao fundo), foram realizadas comparações com a velocidade orbital gerada na propagação das ondas no ambiente marinho. À medida que a onda se propaga pelo oceano são gerados movimentos orbitais das partículas de água ao longo da coluna d'água, diminuindo seu diâmetro em direção ao fundo marinho e aumentando o deslocamento total durante o seu período até as regiões mais rasas. A velocidade orbital das partículas próximo ao fundo apresentou uma relação direta com a mobilização dos sedimentos, principalmente durante eventos com ondas de altura significativa acima de 1,5 m e/ou ondas de períodos longos (acima de 10 segundos).

2.3.2 Sensoriamento Remoto

Os dados diários de Clorofila-a, Temperatura da Superfície do Mar e as estimativas de Turbidez foram processados e mapeados para fornecer uma análise da variabilidade espaço-temporal da influência da descarga continental na produtividade primária, das feições térmicas que condicionaram a dispersão da pluma do rio Doce e da distribuição da turbidez superficial no oceano. Esta análise permitiu 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 foram utilizadas na identificação visual (qualitativa) da dispersão de sedimentos durante os eventos hidrológicos e de ressuspensão por ondas.

Para a filtragem inicial dos dados, foi analisada a região da desembocadura do rio Doce durante todo o período considerando as observações válidas, ou seja, 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 foi igual ou ultrapassou um determinado limiar de FNU (2 e 5 FNU), dividido pelo número de observações totais válidas em cada um dos pontos amostrados. Dessa forma, os dados válidos representaram 45% do conjunto de dados referente aos sete períodos chuvosos do PMBA/Fest-UFES próximo à desembocadura do rio Doce.

2.3.3 Modelagem numérica

Mapas dos campos termohalinos e de velocidades resultantes dos experimentos numéricos hidrodinâmicos foram confeccionados a fim de compreender eventos específicos (instantâneos) e padrões anuais (medidas estatísticas). A modelagem numérica hidrodinâmica visou o entendimento sinóptico das diferentes condicionantes ambientais existentes na plataforma continental que conferem alterações em diferentes escalas de tempo 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 (AC). A AC 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, foram calculadas as recorrências da pluma de baixa salinidade sobre a plataforma continental para os diferentes períodos chuvosos, isto é, 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 foram determinadas com isolinhas correspondentes aos valores de recorrência superiores a 10%.

As comparações entre os resultados das simulações numéricas do transporte de sedimentos com os dados de turbidez coletados, foram apresentadas tanto de modo pontual, na forma de séries temporais, quanto regional, na forma de mapas, permitindo a visualização da variação espaço-temporal desse indicador. As séries temporais foram obtidas para os locais relevantes, como nos pontos onde foram realizadas as medições *in situ* (fundeios), assim como em locais importantes para a descrição dos processos apontados. Os mapas foram selecionados de forma a ilustrar eventos específicos ou períodos de tempo de interesse (como os períodos chuvosos de cada ano ou as datas das campanhas). A modelagem numérica do transporte de sedimentos permitiu compreender a dispersão da descarga sedimentar proveniente do rio Doce e/ou de sedimentos que já estavam depositados na plataforma continental adjacente, a fim de identificar o destino do MLD no ambiente marinho. O foco dessa modelagem foi analisar os papéis dos diferentes processos hidrodinâmicos específicos para o transporte de sedimentos finos, como por exemplo tensões de cisalhamento no fundo, velocidades

orbitais, correntes residuais de maré, ondas, entre outros. O cálculo da deriva litorânea permitiu evidenciar sua importância frente a outras correntes residuais, permitindo comparações interanuais e em cenários específicos, mostrados através de mapas de estimativas de vazões de deriva (residuais para os períodos chuvosos analisados).

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 o valor médio para cada ano. Desta forma, os resultados foram apresentados como a amplitude de variação deste processo, podendo ser feitas inferências sobre a direção preferencial da vazão litorânea na escala de tempo considerada. Cabe ressaltar que a vazão litorânea, uma medida da capacidade de transporte pela deriva, resulta da dinâmica de correntes originadas dentro da zona de surfe e que a mesma responde imediatamente às modificações do clima de ondas. Ou seja, ainda que as estatísticas demonstrem um sentido e intensidade preferencial, a corrente litorânea apresenta variações ao longo do tempo.

Para quantificar a importância da vazão litorânea, no período chuvoso do Ano 7 foram construídas as séries de vazão de deriva, normalizada pela vazão do rio Doce (analisada em termos percentuais), e comparada sua predominância (para o sul ou para o norte) com atuação do vento.

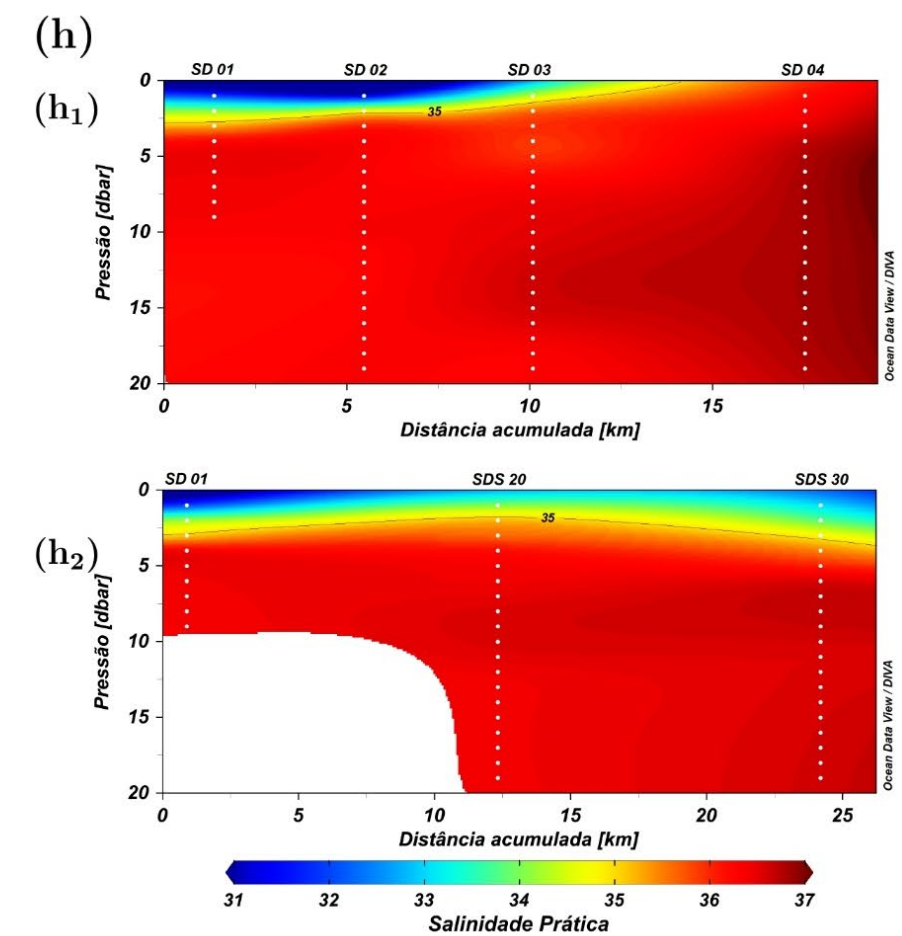
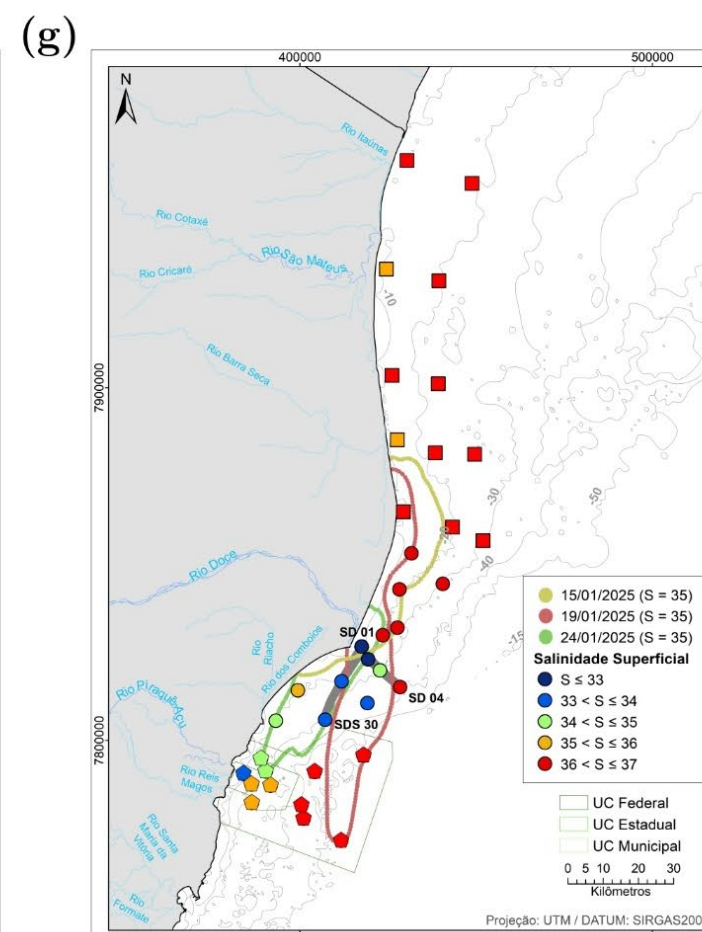
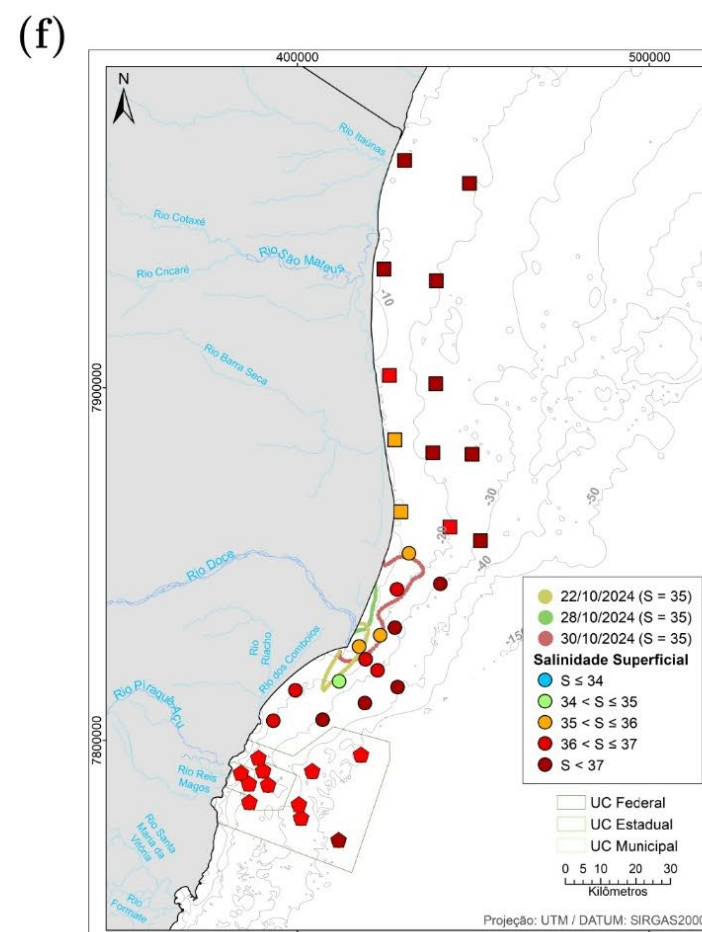
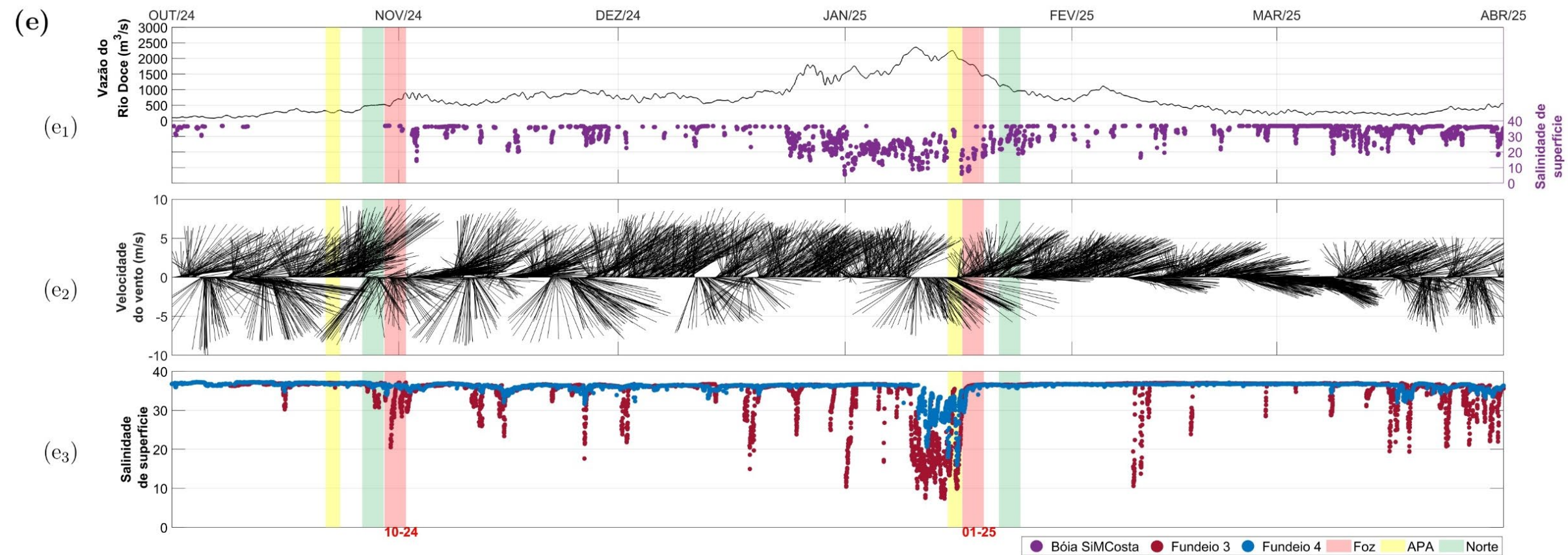
2.4 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

Ao longo da evolução do PMBA/Fest-UFES a modelagem numérica biogeoquímica prevista no primeiro Plano de Trabalho foi realizada e apresentada no RA2019 para avaliar o impacto do MLD na porção biológica, geológica e química do ambiente marinho. 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 em 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. Após o RA2024, a modelagem numérica de transporte de sedimentos foi implementada na versão tridimensional, com os primeiros resultados apresentados neste relatório para o período chuvoso do Ano 7. Passou-se a considerar também os resultados dos modelos de ondas para a deriva litorânea, utilizando tanto modelos paramétricos quanto para cenários específicos com acoplamento do modelo de sedimentos. É importante salientar que, mesmo havendo alterações metodológicas, a meta foi alcançada em conjunto com os demais Temas que compõem 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-UFES 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-UFES 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:



Distribuição espaço-temporal da salinidade superficial na plataforma continental próximo à desembocadura do rio Doce, abrangendo o período de realização do PMBA/Fest-UFES, de outubro de 2018 a março de 2025:

a. Área de recorrência superior a 10% dos valores de salinidade ≤ 35 a partir dos resultados obtidos através de simulações numéricas para cada um dos sete períodos chuvosos investigados durante o PMBA/Fest-UFES. A isolinha sólida em roxo representa a delimitação da área de recorrência relativa ao período chuvoso do Ano 7, enquanto as demais isolinhas indicam as áreas de recorrência dos seis primeiros períodos chuvosos investigados.

b. (b₁) Áreas de abrangência referente à recorrência superior a 10% da salinidade superficial ≤ 35 e; **(b₂)** volume acumulado de água aportado pelo rio Doce na plataforma continental ao se considerar as diferentes condições de vazão propostas por Oliveira e Quaresma (2017), ambos relativos aos sete períodos chuvosos monitorados.

c. (c₁) Rosa dos ventos para o período chuvoso do Ano 6; e **(c₂)** Rosa dos ventos para o período chuvoso do Ano 7.

d. Séries temporais referentes ao período de execução do PMBA/Fest-UFES (outubro/2018 a março/2025). As faixas verticais vermelhas destacam os períodos de realização das campanhas para coleta de dados *in situ* do Ambiente Marinho no Setor Foz. As áreas azuis e cinzas indicam os períodos chuvosos e secos, respectivamente.

(d₁) Variação horária de vazão do rio Doce (m³/s) medida na estação P21 (Linhares - ES) do Ambiente Dulcícola. 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.

(d₂) Variação horária da salinidade do rio Doce observada na estação RDO16 (Linhares - ES) do Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimento (PMQQS).

(d₃) Variação temporal da salinidade superficial medida a cada 20 minutos no Fundeio 3 (F3), localizado no Setor Foz Norte.

e. Séries temporais referentes ao período chuvoso do Ano 7 do PMBA/Fest-UFES (outubro/2024 a março/2025) abrangendo as campanhas 10-24 e 01-25 do Marinho Integrado. Os períodos de realização das campanhas de coleta de dados *in situ* são destacados pelas faixas verticais vermelha (Setor Foz), amarela (Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz) e verde (Setor Norte).

(e₁) Variação horária de vazão do rio Doce (m³/s) medida na estação P21 (Linhares - ES) do Ambiente Dulcícola (em preto) e da salinidade medida no ponto da boia do SiMCosta ES-1 (39,46°O e 19,41°S; em roxo);

(e₂) Variação horária de ventos (m/s, notação meteorológica – Norte positivo, Sul negativo) provenientes da reanálise do ECMWF/ERA5T para o ponto 39,75°O e 19,75°S;

(e₃) Variação temporal da salinidade superficial medida nos pontos de fundeio localizados no Subsetor Foz Norte (em vermelho – Fundeio 3) e Setor Norte (em azul – Fundeio 4).

f. Médias diárias da distribuição espacial da salinidade superficial (isohalina de 35) obtida através de simulação numérica para os dias 22 (amarela), 28 (verde) e 30 (vermelha) de outubro de 2024, quando estavam sendo realizadas as coletas nos setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, Norte e Foz, respectivamente. Os símbolos em escala de cores correspondem às medições instantâneas de salinidade superficial realizadas durante a campanha 10-24 do Marinho Integrado. Os círculos correspondem às medições realizadas no Setor Foz, os pentágonos no Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e os quadrados no Setor Norte.

g. Distribuição espacial da salinidade superficial (isohalina de 35) obtida através de simulação numérica

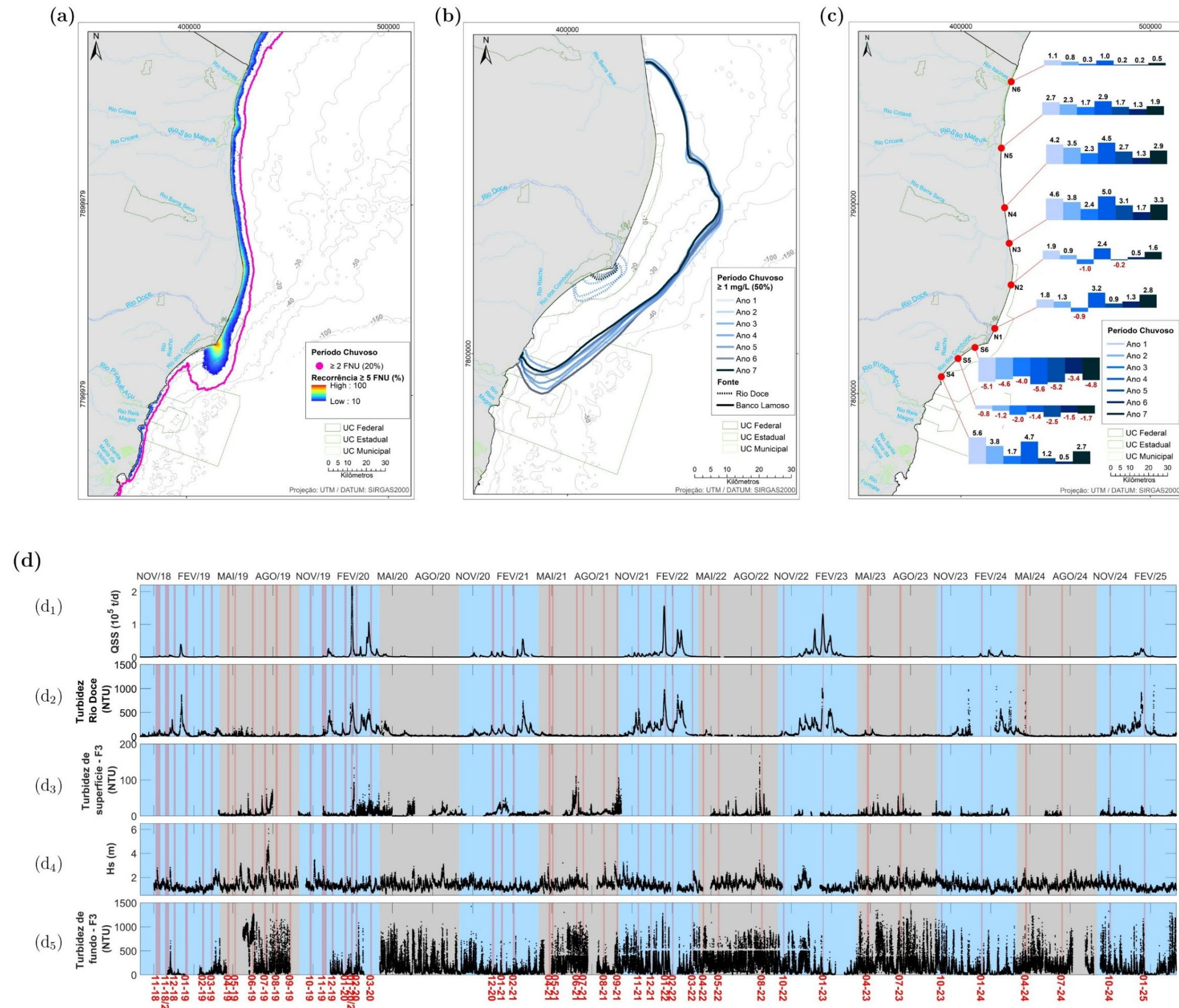
para os dias 15 (amarela), 19 (vermelha) e 24 (verde) de janeiro de 2025, quando estavam sendo realizadas as coletas nos setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, Foz e Norte, respectivamente. Os símbolos em escala de cores correspondem às medições de salinidade superficial realizadas durante a campanha 01-25 do Marinho Integrado. Os círculos correspondem às medições realizadas no Setor Foz, os pentágonos no Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e os quadrados no Setor Norte. **h.** Seções de salinidade prática obtida via perfilagem de CTD na campanha 01-25 do Marinho Integrado. **(h₁)** transecto no setor Foz Central com início no ponto SD 01 e final no ponto SD 04 medidos no dia 18 de janeiro de 2025 (gráfico superior) e **(h₂)** transecto no setor Foz Sul com início no ponto SD 01 e final no ponto SDS 30 medidos no dia 17 de janeiro de 2025 (gráfico inferior), ambos indicados pelostransectos sombreados em cinza na Figura 1g.

A salinidade superficial é um indicador indireto de áreas potencialmente impactadas pela parte dissolvida do MLD, disponibilizado no ambiente marinho a partir do Rompimento da Barragem de Fundão (Mariana, MG). Este indicador está associado ao aporte fluvial proveniente do rio Doce na plataforma continental, permitindo a compreensão da dinâmica da dispersão da pluma de baixa salinidade (salinidade ≤ 35) e, consequentemente, do MLD no ecossistema marinho. Para os diferentes períodos chuvosos monitorados durante o PMBA/Fest-UFES, foram estimadas as áreas do ambiente marinho sob influência do aporte proveniente do rio Doce que Figura 1 se estenderam tanto ao norte quanto ao sul da foz (Figura 1a). Durante os períodos chuvosos, quando há o predomínio de ventos N-NE e, consequentemente, correntes SO-S, as plumas de baixa salinidade aumentam a sua abrangência ao sul. Por isso, são observadas reduções na salinidade superficial nos setores Foz Central, Foz Sul e APA Costa das Algas (Figura 1a). Outro fator determinante neste resultado é a permanência da vazão do rio Doce nas condições de Alta Vazão (Úmido, Alto Fluxo e Inundação) (Figura 1b₂) em decorrência da frequência, intensidade e duração dos eventos de precipitação na sua bacia hidrográfica Figura 1. Durante o período chuvoso do Ano 7, observou-se que o aumento da vazão provocou a redução da salinidade no estuário do rio Doce, assim como nos anos anteriores (Figura 1d₁ e Figura 1d₂). Como consequência, sobre a plataforma continental foram observadas recorrentes medições de salinidade inferiores a 10 e momentos de inversão na direção dos ventos (Figura 1d₃), a uma distância de aproximadamente 10 km ao norte da foz do rio Doce (Fundeio 3). Além da relevância do aporte fluvial sobre a plataforma continental, o papel das forçantes meteoceanográficas na dispersão da pluma de baixa salinidade tem sido amplamente discutido (FEST, 2025), e sua influência sobre a área de recorrência tornou-se ainda mais evidente durante o período chuvoso do Ano 7. A descarga acumulada do rio Doce nesse período ($1,13 \times 10^{10} \text{ m}^3$) foi semelhante à observada no Ano 6 (Figura 1b₂). Da mesma forma, ambos os anos não registraram eventos classificados como Inundação (Figura 1b₂ e 1d₁). Apesar das semelhanças hidrológicas, a área de recorrência superior a 10% da pluma de baixa salinidade apresentou redução de aproximadamente 19% do Ano 6 para o Ano 7 (Figura 1b₁). Essa diferença não refletiu apenas a discreta diminuição de $7,98 \times 10^7 \text{ m}^3$ na descarga fluvial acumulada (Figura 1b₂), mas principalmente às condições meteorológicas. No Ano 7, houve a menor persistência dos ventos tanto do quadrante Norte quanto do Sul, sendo este último ano marcado por uma maior frequência de ventos fracos (velocidades $\leq 6 \text{ m/s}$) e inversões, evidenciadas pelo aumento da

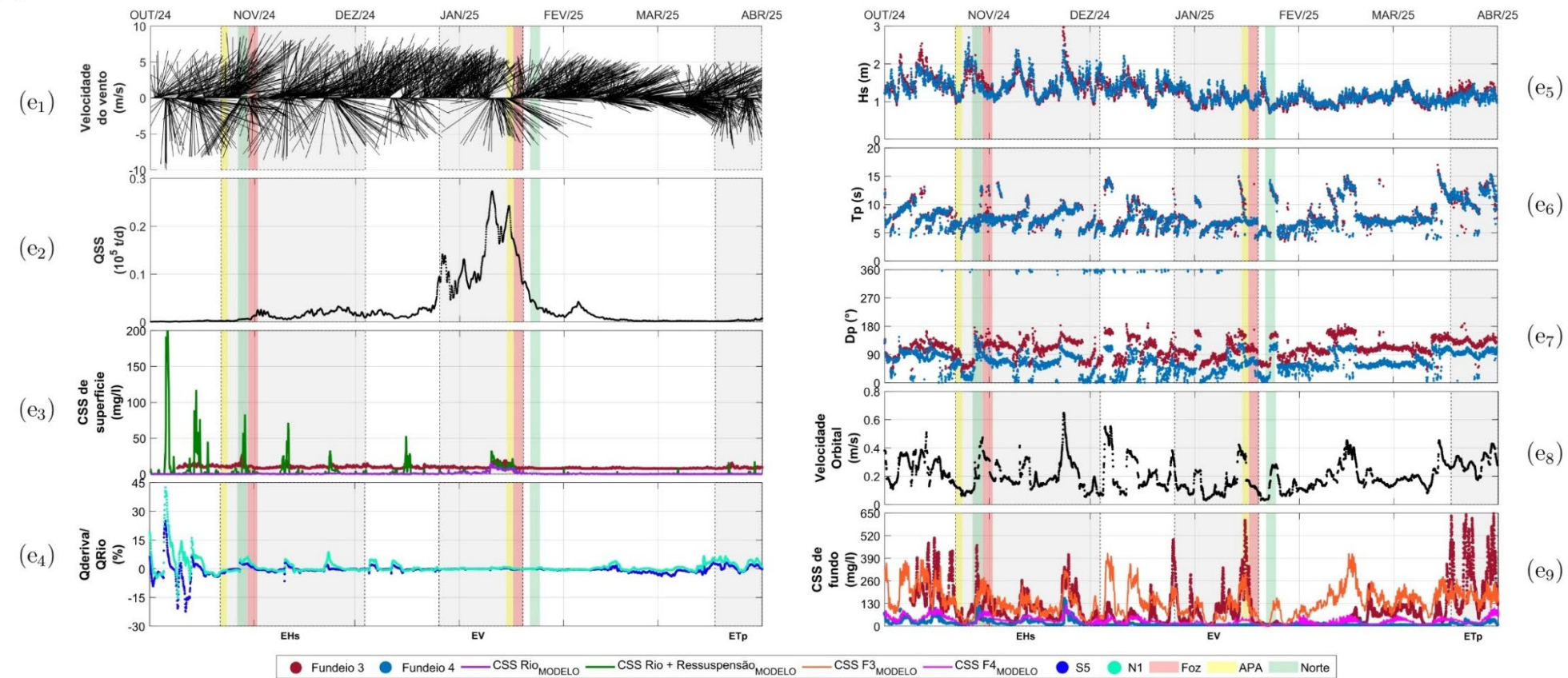
ocorrência de ventos Leste (Figura 1c₂). Esse cenário resultou em uma distribuição da recorrência da pluma de baixa salinidade caracterizada por um alcance ao norte da foz até a altura da Praia de Degredo (Linhares–ES) (Figura 1a). Além disso, a frequência de ventos NE com velocidade superior a 8 m/s foi inferior à observada no Ano 6 do monitoramento (Figura 1c₁ e Figura 1c₂). Como resultado, ao sul da foz do rio Doce não houve recorrência superior a 10% da pluma de baixa salinidade no Setor APA Costa das Algas, a área de abrangência permaneceu restrita ao Setor Foz Sul (Figura 1a). . A análise da variabilidade do vento se mostrou importante também para o entendimento dos campos superficiais de salinidade provenientes das campanhas do Marinho Integrado (Figura 1f e Figura 1g). Durante a realização da campanha 10-24, ventos N-NE predominavam enquanto as coletas eram realizadas no Setor APA Costa das Algas, mas ventos S atuaram durante as coletas nos Setores Foz e Norte (Figura 1e₂) resultando no direcionamento da pluma de baixa salinidade do rio Doce para o norte (Figura 1f). Esta inversão ficou evidenciada pela diminuição no valor de salinidade dos pontos costeiros do Setor Norte (Figura 1f), assim como na série temporal registrada no Setor Foz Norte (20,5; F3) (Figura 1e₃). A pluma de baixa salinidade restrita aos pontos costeiros (Figura 1f) se deve principalmente ao reduzido aporte fluvial durante a realização desta campanha (Figura 1e₁). A campanha 01-25, por outro lado, coincidiu com o evento hidrológico no qual a vazão permaneceu por 11 dias (07 a 18 de janeiro de 2025) na condição de Alto Fluxo ($> 1.742 \text{ m}^3/\text{s}$) (Figura 1e₁). Durante este evento, a vazão do rio Doce atingiu o valor máximo registrado para o período chuvoso do Ano 7 ($2.361 \text{ m}^3/\text{s}$) em 10 de janeiro de 2025 (Figura 1e₁). O efeito do aumento no aporte fluvial sobre a redução da salinidade no ambiente marinho foi continuamente registrado pela boia ES-1 (SiMCosta) (Figura 1e₁), localizada a aproximadamente 6 km em frente à foz do rio Doce sobre a isóbata de 20 m. Esses dados indicaram uma diminuição na salinidade durante todo o evento hidrológico (Figura 1e₁). Entretanto, a redução da salinidade superficial nos Setores Foz Norte (Fundeio 3) e Norte (Fundeio 4) foi observada apenas durante a inversão dos ventos que antecedeu a coleta no Setor Foz (Figura 1e₂ e Figura 1e₃). Sob influência de ventos sul, os valores mínimos de salinidade registrados nos setores previamente mencionados foram de 7,4 e 15,9, respectivamente (Figura 1e₂ e Figura 1e₃). Apesar desse episódio de inversão, os ventos permaneceram predominantemente N–NE durante as medições *in situ* realizadas nos Setores Foz e Norte (Figura 1e₂). Esse padrão explica a ausência de baixos valores de salinidade no Setor Norte (Figura 1g) e uma pluma de baixa salinidade com valor mínimo de 31,9 na estação amostral mais próxima da foz do rio Doce, ocupando até 3 m de profundidade nos Setores Foz Sul e Foz Central (Figura 1h₁ e Figura 1h₂).

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

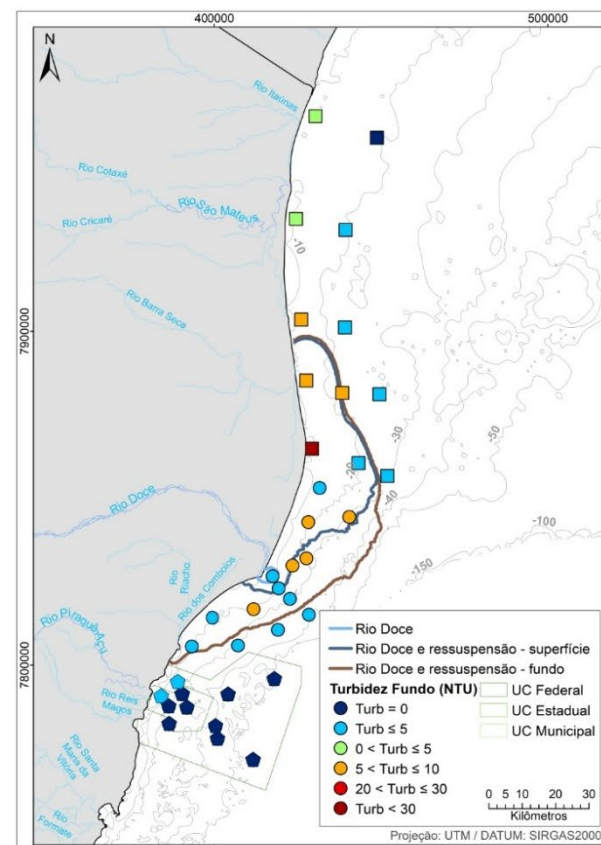
Figura 2: Turbidez/Concentração de sedimento em suspensão na coluna d'água.



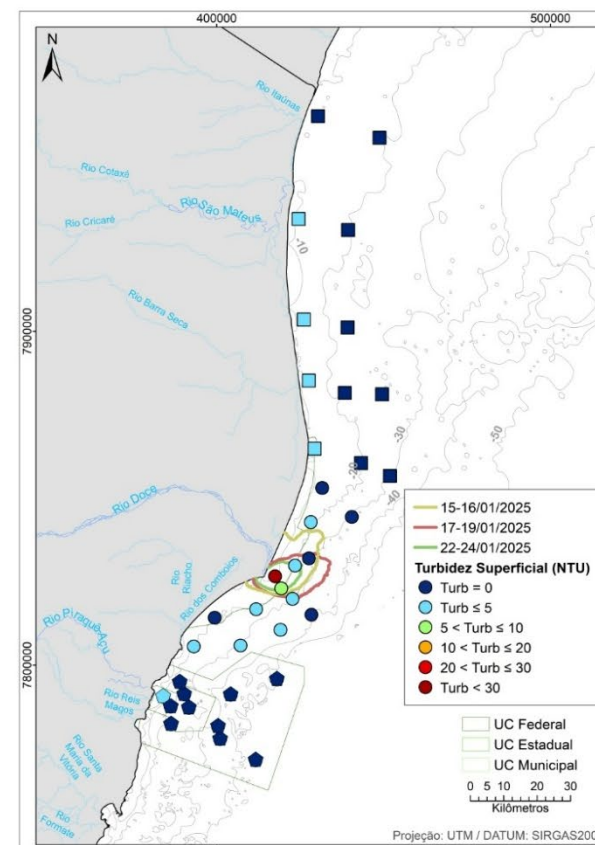
(e)



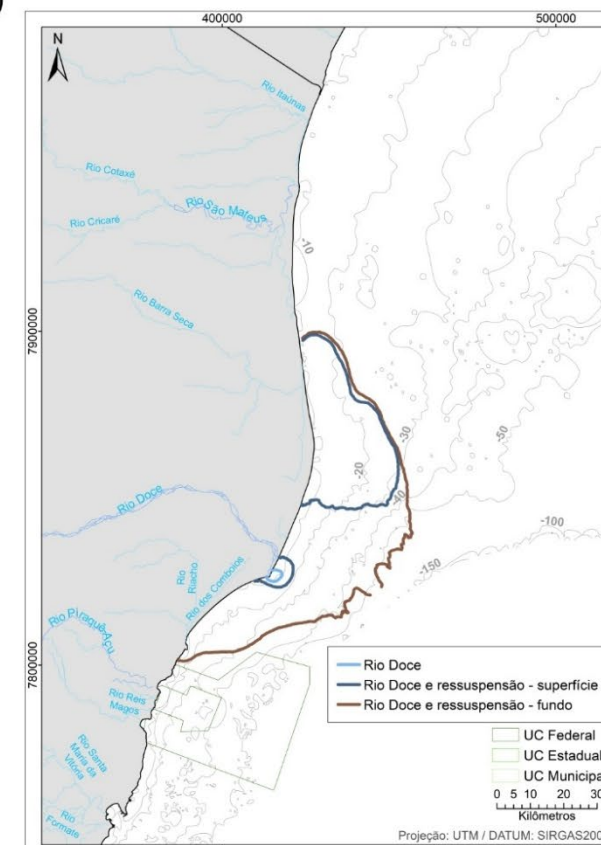
(f)



(g)



(h)



Distribuição espaço-temporal da turbidez/concentração de sedimento em suspensão (CSS) na plataforma continental próximo à desembocadura do rio Doce, abrangendo o período de realização do PMBA/Fest-UFES, de outubro de 2018 a março de 2025: **a.** Distribuição espacial da frequência de ocorrência de turbidez superficial ≥ 5 FNU a partir dos dados disponíveis provenientes do satélite AQUA para o período chuvoso dos Anos 1 ao 7 próximos à desembocadura do rio Doce. A linha rosa delimita a área na qual a frequência de ocorrência da turbidez superficial ≥ 2 FNU foi igual ou superior a 20%. **b.** Isolinhas de recorrência de 50% (mediana) dos valores de concentrações de sedimentos em suspensão ≥ 1 mg/l da pluma proveniente do rio Doce (linhas tracejadas) e da pluma originada a partir da ressuspensão de materiais do Banco Lamoso (linhas contínuas), considerando os ensaios numéricos realizados para os períodos chuvosos ao longo dos anos de execução do PMBA/Fest-UFES. **c.** Resumo estatístico das vazões litorâneas residuais obtidas através de simulações numéricas para os períodos chuvosos ao longo dos anos de monitoramento do PMBA/Fest-UFES, que indicam a capacidade de transporte calculada para a zona de surfe considerando os perfis de praia distribuídos ao longo da linha de costa. Os valores em preto representam vazões para norte e em vermelho para sul ao longo da costa. **d.** Séries temporais obtidas para todo o período de execução do PMBA/Fest-UFES. 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. **(d₁)** Variação horária da descarga de sólidos em suspensão do rio Doce (QSS - t/d), fornecida pelo Tema Integração Fluvio-Estuarina do Ambiente Dulcícola do PMBA/Fest-UFES, calculada para a estação P21 (Linhares - ES); **(d₂)** Variação temporal da Turbidez (NTU) medida na estação automática RDO-16 Boia (Linhares - ES) do Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos da Fundação Renova (PMQQS); **(d₃)** Variação temporal da Turbidez (NTU) medida em superfície no ponto de fundeio localizado no Subsetor Foz Norte (Fundeio 3); **(d₄)** Variação temporal da Altura Significativa de Ondas – Hs (m), medida no ponto de fundeio localizado no subsetor Foz Norte (Fundeio 3); **(d₅)** Variação temporal da Turbidez (NTU) medida no fundo do fundeio localizado no Subsetor Foz Norte (Fundeio 3). **e.** Séries temporais obtidas para o período chuvoso do Ano 7 do PMBA/Fest-UFES (outubro/2024 a março/2025): **(e₁)** Variação do vento (m/s - notação meteorológica) proveniente da reanálise do ERA5/ECMWF para o ponto 39,75°O e 19,75°S a cada 2 horas; **(e₂)** Variação horária de QSS (t/d) calculada para a estação P21 (Linhares - ES) fornecida pelo Tema Integração Fluvio-Estuarina do Ambiente Dulcícola do PMBA/Fest-UFES; **(e₃)** Variação temporal da Concentração de sedimentos em suspensão (CSS - mg/l) na superfície do ponto de fundeio localizado no Subsetor Foz Norte (Fundeio 3), estimada a partir da turbidez medida *in situ* (NTU) (em vermelho), da pluma modelada do rio Doce (2% da coluna d'água) (CSS Rio_{MODELO} – linha roxa) e do somatório de CSS de ressuspensão e do aporte da pluma do rio Doce modelados (CSS Rio + Ressuspensão_{MODELO} – linha verde). **(e₄)** Variação percentual da razão entre a vazão litorânea e a do rio Doce nas estações S5 (linha azul escuro) e N1 (linha azul claro) do Tema Praias do Ambiente Costeiro; **(e₅)** Variação temporal da altura significativa de ondas – Hs (m); **(e₆)** Variação temporal do período de pico de ondas – Tp (s); **(e₇)** Variação temporal da direção de pico de ondas – Dp (°). Todos os parâmetros de onda foram obtidos nos pontos de fundeio localizado no subsetor Foz Norte (em vermelho – Fundeio 3) e no

Setor Norte (em azul – Fundeio 4); **(e₈)** Variação temporal da velocidade orbital de ondas no Setor Foz Norte (m/s); **(e₉)** Variação temporal das Concentrações de sedimentos em suspensão (CSS - mg/l) no fundo dos pontos de fundeio localizados no Subsetor Foz Norte (F3) e no Setor Norte (F4), estimadas a partir da turbidez medida *in situ* (NTU) (vermelho – F3) e no Setor Norte (azul – F4) e da Concentração de sedimentos em suspensão modelada (98% da coluna d'água) (laranja – CSS F3_{MODELO} e rosa – CSS F4_{MODELO}). 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). Os eventos discutidos nesse relatório estão destacados pelas faixas verticais cinzas, sendo eles em ordem cronológica: Evento no qual a altura significativa se destacou (EHs), Evento no qual a vazão se destacou (EV) e Evento no qual o período de pico se destacou (ETp). **f.** Campanha 10-24: Área de abrangência da recorrência de 50% (mediana) considerando todo o período da campanha para valores de concentração ≥ 1 mg/l de sedimento em suspensão na superfície (2% da coluna d'água) devido à pluma modelada do rio Doce (azul claro), ao somatório da ressuspensão de sedimentos e da pluma do rio Doce (azul escuro) e, devido à ressuspensão no fundo (98% da coluna d'água - marrom). Os círculos correspondem às medições da turbidez (NTU) de fundo realizadas no Setor Foz, os pentágonos no Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e os quadrados no Setor Norte. Este período também foi associado ao evento em que a altura significativa se destacou (EHs). **g.** Campanha 01-25: Área de abrangência da recorrência de 50% (mediana) de valores de concentração ≥ 1 mg/l de sedimento suspensão da pluma modelada do rio Doce (2% da coluna d'água) para os dias 15-16 (amarela), 17-19 (vermelha) e 22-24 (verde) de janeiro de 2025, quando estavam sendo realizadas as coletas nos setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, Foz e Norte, respectivamente. Os círculos correspondem às medições de turbidez de superfície (NTU) realizadas no Setor Foz, os pentágonos no Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e os quadrados no Setor Norte. Este período também esteve associado a altos valores de vazão do rio Doce (EV). **h.** Evento quando o período de pico se destacou (ETp): Área de abrangência da recorrência de 50% (mediana) de valores de concentração ≥ 1 mg/L de sedimento em suspensão na superfície (2% da coluna d'água) devido à pluma modelada do rio Doce (azul claro), e ao somatório da ressuspensão de sedimentos e da pluma do rio Doce (azul escuro) e, devido à ressuspensão no fundo (98% da coluna d'água - marrom) modelados para o período de 18 a 31 de março de 2025. Neste período foi constatada a presença de ondas com períodos longos (> 10 s - ETp).

O indicador Turbidez está associado à concentração de sedimentos em suspensão, pois reflete tanto o aporte de sedimentos oriundos do rio Doce para a plataforma continental do Espírito Santo, quanto a ressuspensão de sedimentos do banco lamoso adjacente à sua foz. A análise desse parâmetro contribuiu para a compreensão da dinâmica de dispersão destes materiais na plataforma continental interna, auxiliando na investigação do destino do MLD. A principal variabilidade temporal observada na descarga de sólidos em suspensão do rio Doce (QSS) ocorreu em escala sazonal, uma vez que os maiores valores foram observados durante os períodos chuvosos (Figura 2d₁). Este resultado refletiu o claro controle sazonal do ciclo hidrológico da bacia do rio Doce, uma vez que mais de 95% da descarga sólida que alimentou a pluma do rio Doce foi produzida no período chuvoso (Figura 2d₁) caracterizada por um clima de ondas e ventos preferencialmente N-NE. Nos períodos chuvosos, valores de turbidez

≥ 5 FNU estimados via sensoriamento remoto foram observados até as proximidades da isóbata de 30 m no Setor Foz, com os maiores valores concentrados na desembocadura do rio, onde a recorrência ultrapassou 80% (Figura 2a). A modelagem do transporte de sedimentos da pluma do rio Doce para os períodos chuvosos indicou que as maiores áreas de recorrência com concentrações de sedimentos em suspensão ≥ 1 mg/l ocorreram no Ano 5 (89,9 km²), seguido pelo Ano 4 (78,5 km²) e Ano 3 (24,8 km²). Por outro lado, as menores áreas foram observadas no Ano 6 (6,9 km²), Ano 1 (9,5 km²), Ano 2 (9,6 km²) e Ano 7 (15,8 km²) (Figura 2b). Apesar dos picos de QSS nos Anos 6 e 7 terem sido comparáveis (Figura 2d₁), a área modelada no Ano 7 foi aproximadamente o dobro da registrada no Ano 6 (Figura 2b). As maiores QSS calculadas para o Ano 7, que se destacou por apresentar uma das menores áreas de abrangência da pluma entre os períodos chuvosos analisados, ocorreram entre os dias 26 de dezembro de 2024 e 19 de janeiro de 2025, com máximo de 27.340 t/d no dia 10 de janeiro de 2025 (Figura 2d₂ e 2e₂). No dia 12 de janeiro, a CSS de superfície alcançou 20 mg/l no fundeio F3 (Subsetor Foz Norte) (Figura 2e₃). Esse incremento representou cerca de 2,5 vezes a mediana calculada para todo o período chuvoso do Ano 7 (8,1 mg/l) e esteve associado à inversão do vento (Figura 2e₁) durante o período de elevação da QSS do rio Doce (Figura 2e₂).

Durante a realização da campanha 01-25 do Marinho Integrado, registrou-se o segundo maior pico de QSS do rio Doce (24.277 t/d) em 15 de janeiro (Figura 2e₁), e a CSS de superfície no fundeio F3 foi de 15 mg/l (Figura 2e₃). A análise da simulação da dispersão superficial da pluma de sedimentos do rio Doce ao longo do período 15 a 24 de janeiro de 2025, evidenciou variações espaciais significativas, refletindo a influência dos ventos sobre a pluma de descarga fluvial sólida nesse intervalo (Figura 2e₁). Durante a coleta de dados no Setor APA Costa das Algas (15-16 de janeiro de 2025) (Figura 2g), observou-se que a pluma superficial do rio Doce simulada atingiu uma maior área de abrangência (239 km²) comparada à área de recorrência estimada para todo o período chuvoso (15,8 km²), com dispersão predominantemente para o norte, evidenciando a influência de ventos provenientes do SE (Figura 2e₁). Durante o levantamento de campo do Setor Foz (17-19 de janeiro de 2025), ocorreu uma mudança na direção dos ventos (NO-NE) (Figura 2e₁) e a pluma recuou da sua dispersão para o norte, atingindo áreas mais *offshore*, principalmente em direção ao leste-nordeste da desembocadura do rio (Figura 2g), configurando uma área menor à anterior (202 km²). Por fim, durante a campanha do Setor Norte (22-24 de janeiro de 2025) (Figura 2g), os ventos permaneceram do setor NE (Figura 2e₁) e a pluma ficou restrita à região costeira adjacente à foz do rio Doce, apresentando a menor área de dispersão registrada no período da campanha 01-25 (78 km²) (Figura 2). Durante o período de ventos SO-S-SE (Figura 2e₁), a CSS de superfície no fundeio F3 evidenciou picos entre 15 e 20 mg/l (Figura 2e₃).

Posteriormente, com o início da atuação do vento NE (Figura 2e₁), não foram registradas elevações da CSS em superfície no fundeio F3, localizado ao norte da foz (Figura 2e₃). Outros picos de QSS do rio Doce foram registrados no início do período chuvoso do Ano 7. Um deles aconteceu no dia 26 de dezembro de 2024 (14.128,4 t/d) e outro no dia 02 de janeiro de 2025 (13.106,4 t/d) (Figura 2e₂). Durante esse período, os ventos permaneceram do N-NE (Figura 2e₁) e a CSS na superfície no fundeio F3 foi da ordem de 8-10 mg/l (Figura 2e₃). No entanto, a CSS simulada evidenciou a influência do regime de marés, destacando a ressuspensão do material do fundo durante os períodos de sizígia

(maiores amplitudes de maré), uma vez que a influência da pluma do rio Doce esteve praticamente ausente (Figura 2e₃). O período chuvoso do Ano 7 apresentou, em média, valores de Hs que não superaram 1,2 m (Figura 2e₅). Porém, nos dias 25 de outubro e 24 de novembro de 2024, os valores de Hs atingiram 2,5 m e 3 m, respectivamente, no ponto de fundeio localizado no Subsetor Foz Norte (Figura 2e₅). Dessa forma, esses eventos se destacaram em relação à ressuspensão de sedimentos pela energia de ondas, e o primeiro deles aconteceu associado à campanha 10-24 do Marinho Integrado (Figura 2f).

O aumento de Hs foi acompanhado pelo aumento da CSS de fundo (Figura 2e₉), de modo que o valor de CSS foi cerca de quarenta e oito vezes maior do que o valor mediano calculado para este período (9,6 mg/l) no fundeio F3 (464 mg/l) e dez vezes acima do valor mediano no fundeio F4 (100 mg/l; Figura 2e₉). O outro pico de Hs, o maior registrado durante o período chuvoso do Ano 7 (Figura 2e₅), atingiu uma CSS de 410 mg/l no fundo do fundeio F3 (Figura 2e₉). No Fundeio F4 observou-se o maior pico de CSS (160,5 mg/l) no dia 23 de novembro de 2024 (Figura 2e₉). Esses incrementos em termos de Hs estiveram associados a períodos de inversão do vento, associado à entrada de sistema frontal (Figura 2e₁). Os maiores valores de turbidez de fundo, medidos por perfilagem de CTD durante a campanha destacada, foram registrados principalmente nos pontos amostrais do Setor Foz Norte e nos pontos próximos à costa no Setor Norte (Figura 2f). Essa dispersão da pluma de sedimentos do banco lamoso e do aporte da pluma do rio Doce preferencialmente para o norte da foz do rio Doce abrangeu uma área recorrente de 1104 km² (Figura 2f), contrastando com a área significativamente menor de contribuição da pluma do rio Doce para esta campanha, estimada por meio da simulação numérica (17,7 km²; Figura 2f).

Durante o período chuvoso do Ano 7, observaram-se picos de CSS no fundo dos fundeios F3 e F4 no período entre 18 e 31 de março de 2025 (Figura 2e₉), mesmo os valores de Hs sendo menores que 1,5 m (Figura 2e₅). Isto pode ser explicado pela atuação de ondas com períodos longos ($T_p \geq 10$ s) (Figura 2e₆) que foram geradas por tempestades distantes da região costeira e que também transportaram mais energia ao longo da coluna d'água. Essa energia se propagou até o fundo marinho em águas rasas, aumentou a velocidade orbital das partículas próximo ao leito marinho (Figura 2e₈) e contribuiu para a ressuspensão dos sedimentos finos do depósito lamoso. A velocidade orbital próxima ao fundo, associada a ondas com períodos maiores que 10 s, permaneceu acima de 0,25 m/s durante este evento (Figura 2e₈). Este resultado reportou a importância de ondas com períodos longos e altura significativa em torno de 1 m, quando a velocidade orbital atingiu valor semelhante ao que ocorreu em eventos de aumento de Hs. O movimento oscilatório da órbita das partículas próximo ao fundo aumenta a instabilidade do sedimento de fundo, tornando-o mais susceptível a erosão (ALBERNAZ *et al.*, 2020; SOULSBY, 1997). As recorrências de 50% para concentrações iguais ou superiores a 1 mg/l da pluma modelada mostraram que ela foi gerada principalmente pela ressuspensão de sedimentos finos dos bancos lamosos presentes na plataforma continental e atingiu a superfície se juntando ao aporte da pluma do rio Doce, totalizando uma área de abrangência de 1.030 km² (Figura 2h). Com a atuação de ventos predominantes do quadrante S (Figura 2e₁), observou-se uma dispersão da pluma do rio Doce em direção ao norte da foz ocupando uma área de somente 10,6 km² (Figura 2h). A simulação 3D

apresentou uma área de abrangência de 2.539 km² da dispersão no fundo (Figura 2h) e no turbidímetro do fundeio F4, registraram-se picos máximos de CSS no fundo, entre 633,1 mg/l (18 de março) e 647 mg/l (30 de março) (Figura 2e₉). No entanto, no fundeio F3, os picos máximos de CSS no fundo foram entre 43,5 mg/L (22 de março) e 48,6 mg/L (29 de março) (Figura 2e₉). No contexto do destino dos sedimentos em suspensão, sejam oriundos da ressuspensão do banco lamoso ou mesmo pelo rio Doce, a deriva litorânea atuou como um processo físico de captação, redistribuição e transporte desses sedimentos para outras áreas dentro da faixa litorânea que compreende o sistema praial. Evidências deste transporte litorâneo foram constatadas pelo teor de lama (em torno de 80% na cota de 10 m) encontrado na região da antepraia ao norte da foz do rio Doce (FEST, 2024). As vazões litorâneas residuais relativas aos sete períodos chuvosos apontaram o transporte predominante para norte nas estações ao norte e para sul nas estações ao sul, ambos referenciados pela foz do rio Doce (Figura 2c).

Ainda que a direção do vento predominante tenha sido N-NE durante os períodos chuvosos, o transporte litorâneo residual seguiu em direção ao norte sem apresentar alguma alteração em função da ação do vento (Figura 2c). Este comportamento ressaltou o controle do clima de ondas e das características da praia na deriva litorânea. Especificamente para o período chuvoso do Ano 7, os valores da capacidade de transporte pela deriva litorânea em cada estação estiveram entre os três maiores valores durante este período (Figura 2c).

No intuito de avaliar a contribuição da vazão litorânea em termos de capacidade de transporte, ela foi comparada à vazão do rio Doce, um dos principais processos físicos que controla a dinâmica da área costeira adjacente à foz do rio Doce. Cabe ressaltar que não há interferência entre os dois processos físicos, já que a vazão da deriva litorânea é controlada pelo clima de ondas e a vazão do rio pelo regime pluviométrico na bacia de drenagem. Tomando os pontos S5 e N1 localizados ao sul e ao norte da desembocadura do rio Doce, respectivamente, a capacidade de transporte pela deriva litorânea ficou em torno de 1% da vazão do rio Doce durante praticamente todo o período chuvoso do Ano 7 (Figura 2e₄). O resultado desta comparação era esperado, pois durante o período chuvoso a vazão do rio Doce apresentou sua maior contribuição (Figura 1d₁). Ainda assim, cabe destacar que, durante eventos de ondas com maior energia associados a entrada de sistemas frontais (01 a 10 de outubro 2024) a importância relativa da deriva litorânea pode variar de 3 a 11%, aproximadamente (Figura 2e₄). A comparação entre as vazões supracitadas, em termos percentuais, reportou o papel da deriva litorânea como um importante mecanismo de transporte de sedimentos para regiões remotas.

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

Ao longo do monitoramento do PMBA/Fest-UFES, o Tema Modelagem Numérica focou na avaliação das forçantes hidrológicas e meteoceanográficas para caracterizar a hidrodinâmica marinha e apoiar a interpretação dos resultados dos outros temas. Também foi destacada a descrição espaço-temporal da

turbidez, concentração de sedimentos e salinidade superficial, que ajudaram na compreensão da dinâmica de dispersão da pluma do rio Doce e da ressuspensão de material lamoso na plataforma continental, especialmente em áreas afetadas pelo Rompimento da Barragem. A análise da variabilidade espaço-temporal foi possível graças à integração de dados *in situ*, sensoriamento remoto e modelagens numéricas, oferecendo uma visão abrangente dos processos dinâmicos na região costeira adjacente ao rio Doce.

A vazão fluvial e a ressuspensão por ondas interferiram 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 ocorreram 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).

Os eventos hidrológicos que ocorreram na bacia do rio Doce resultaram em aumentos expressivos da carga sedimentar transportada pelo rio, intensificando o aporte de MLD à plataforma continental. No ambiente marinho, a pluma do rio Doce foi advectada em função das condições meteorológicas e hidrodinâmicas costeiras: ventos NE e correntes SO deslocam a pluma para o sul, afastada da costa, enquanto ventos do quadrante sul e correntes NE deslocaram a pluma para o norte, próximo à costa. As maiores áreas de influência do aporte fluvial ocorreram durante eventos combinados de altas vazões e inversões de ventos, associadas à passagem de sistemas transientes.

O material particulado proveniente do aporte fluvial na plataforma continental ficou sujeito à floculação e deposição no leito marinho. A ressuspensão desse material ocorreu quando a tensão oscilatória de fundo gerada por ondas e correntes de maré superou o limite crítico necessário para romper a coesividade do depósito lamoso ou em situações de variações abruptas de pressão na coluna d'água induzidas por turbulência. Ondas de maior altura e período de pico, características dos períodos secos, foram as principais responsáveis pela ressuspensão dos sedimentos depositados no leito marinho e à manutenção desse material em suspensão, facilitando seu transporte por correntes costeiras geradas pela tensão de cisalhamento do vento, pelas correntes residuais de maré e pela deriva litorânea. Esses processos promoveram a redistribuição dos sedimentos na plataforma continental interna, com possibilidade de transferência para áreas além da foz do rio Doce.

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

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

6 REFERÊNCIAS

- ALBERNAZ, A.; et al. Improved calculation of nonlinear near-bed wave orbital velocity in shallow water: validation against laboratory and field data. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 2, p. 81, 2020.
- 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.; CANCELT, 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.
- FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. Relatório Anual do PMBA/Fest-RT-46, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 306 pag. 2024.
- FLATHER, R. A. A tidal model of the northwest European continental shelf. **Memories de la Societe Royale des Sciences de Liege**, 6 (10), pp. 141-164. 1976.

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

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

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

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

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

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

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

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 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. 2020.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual do PMBA/Fest – RRDM – Evolução espaço-temporal do Ambiente Marinho. RT-39D, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 1410 pag. 2022.

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.

SOULSBY, R. L. Dynamics of Marine Sands. London: Thomas Telford, 1997.

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

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.