

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

A3MMS1– Material Suplementar 1

Anexo 3 Marinho – Modelagem Numérica

RT-39 RRDM/FEV 22

RA2021 PMBA/Fest-RRDM

Vitória,

Fevereiro de 2022

SUMÁRIO

1	METODOLOGIA	4
1.1	DESCRIÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA COSTEIRA (DELFT3D)	4
1.2	ESTIMATIVAS DE DERIVA LITORÂNEA.....	9
1.3	VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	10

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Grade numérica refinada e detalhe da resolução na foz do Rio Doce com destaque para a posição dos quatro fundeios F1, F2, F3 e F4.	6
Figura 2: Batimetria obtida por interpolação das cartas náuticas da Marinha do Brasil.....	7
Figura 3: Localização do depósito lamoso. Área do depósito lamoso adaptado de Bastos <i>et al.</i> (2015) e Vieira <i>et al.</i> (2019).	8
Figura 4: Séries temporais da Altura Significativa (Hs) medidas e simuladas pelo modelo nos fundeios F1, F2, F3 e F4.....	12
Figura 5: Séries temporais da Direção medida e simulada pelo modelo nos fundeios F1, F2, F3 e F4.	13
Figura 6: Séries temporais do Período de Pico medidos e simulados pelo modelo nos fundeios F1, F2, F3 e F4.	14
Figura 7: Verificação da simulação dos componentes da velocidade da corrente nos fundeios F1, F2, F3 e F4, durante o período chuvoso.	15
Figura 8: Verificação dos dados de vento (ERA5) utilizados como condição de contorno do modelo hidrodinâmico.	16

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Detalhamento da resolução espacial da malha	5
Tabela 2: Estatística de comparação entre os dados medido e simulados pelo modelo nos quatro fundeios.	12

1 METODOLOGIA

1.1 DESCRIÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA COSTEIRA (DELFT3D)

As principais características da presente configuração, no que se refere ao domínio de modelagem, sistema de coordenadas utilizado para a geração da grade, batimetria, parametrizações sub-grade e tensão de atrito de fundo, entre outras, foram descritas no RSE_RT35 Relatório Semestral de Evolução do PMBA/FEST-RRDM Apêndice III – AMBIENTE MARINHO e no seu Material Suplementar A3MMS2, referido em diante como RSE_RT35. A seguir são apresentadas as principais características e as modificações realizadas na configuração inicial.

1. A malha numérica foi gerada em coordenadas esféricas e se caracteriza por apresentar largura variável com a latitude. Dessa forma buscou-se acompanhar a borda externa da plataforma continental que apresenta na sua porção mais estreita cerca de 24km na região da foz do Rio Doce chegando a 160km na divisa dos estados de Espírito Santo e Bahia. A partir da configuração original da malha (composta por 13.530 células - RSE_RT35), esta foi refinada a fim de melhor representar a propagação de maré e ondas no domínio. A malha agora é composta por 54.120 células de resolução espacial variável (Figura 1, Tabela 1).
2. Para a escolha da base de dados utilizada na geração da batimetria interpolada para a malha de cálculo foram avaliadas informações topográficas oriundas de modelos globais, como GEBCO ou ETOPO1. Contudo, a comparação de tais modelos globais com dados batimétricos levantados pelo PMBA próximo à foz do Rio Doce evidenciou a pouca representatividade dos dados modelados para a região, que é mormente rasa, aumentando o erro relativo de tais modelos. De modo a melhor refletir as reais condições da região, a batimetria implementada no modelo numérico adveio dos dados digitalizados das cartas náuticas da Marinha do Brasil (Figura 2). A porção na costa do Espírito Santo já havia sido digitalizada anteriormente (Bastos *et al.*, 2015) e foi repassada à equipe LDSC/UFRJ. Já a porção da costa do sul da Bahia foi digitalizada utilizando-se as cartas nº 22700, 1310, 1311 e 1312. A região objeto da modelagem numérica apresenta profundidades inferiores a 50 metros.
3. Dando continuidade aos testes descritos no RSE_RT35, foi implementado o módulo de sedimentos ainda numa representação integrada na vertical, a partir do módulo hidrodinâmico 2DH. Os primeiros testes com sedimentos consideraram o depósito lamoso frente ao Rio Doce, sobre a plataforma continental conforme apresentado na Figura 3. A área do depósito lamoso foi adaptada das classes propostas por Bastos *et al.* (2015) e Vieira *et al.* (2019), conforme apresentado no relatório do subprojeto Mapeamento de Habitats (RT-19E_A3M_Mapeamento de Habitats).

Tabela 1: Detalhamento da resolução espacial da malha

	Variação no sentido	
	Longitudinal	Latitudinal
setor Norte	Na costa: 500 a 900m No talude: 900 a 2700m	600 a 1300m
setor Rio Doce	Na costa: 75 a 300m No talude: 400 a 1000m	125 a 400m
setor Sul (nas proximidades da APA Costa da Algas)	Na costa: 200 a 250m No talude: 700 a 1400m	600 a 1000m

Figura 1: Grade numérica refinada e detalhe da resolução na foz do Rio Doce com destaque para a posição dos quatro fundeios F1, F2, F3 e F4.

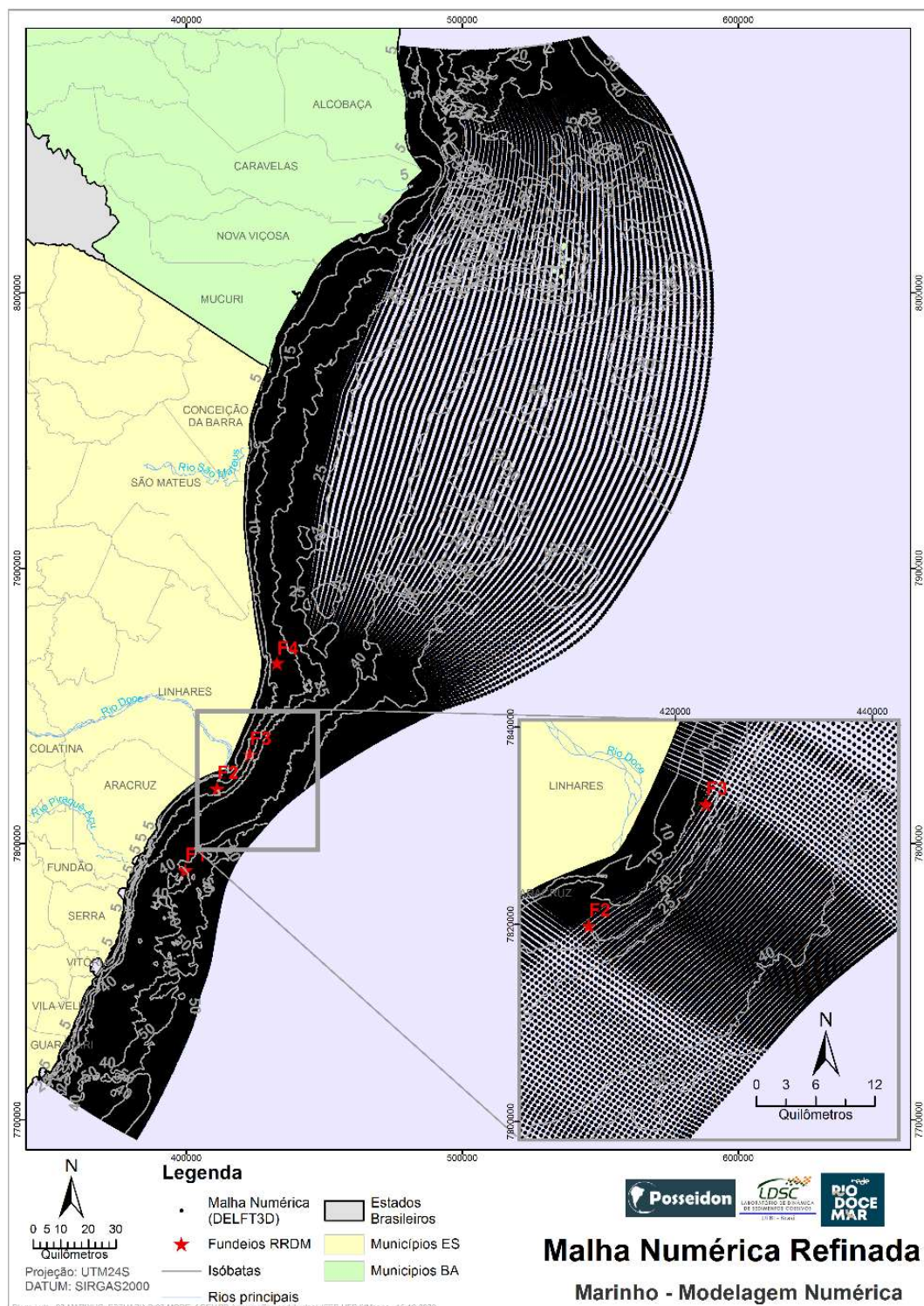


Figura 2: Batimetria obtida por interpolação das cartas náuticas da Marinha do Brasil.

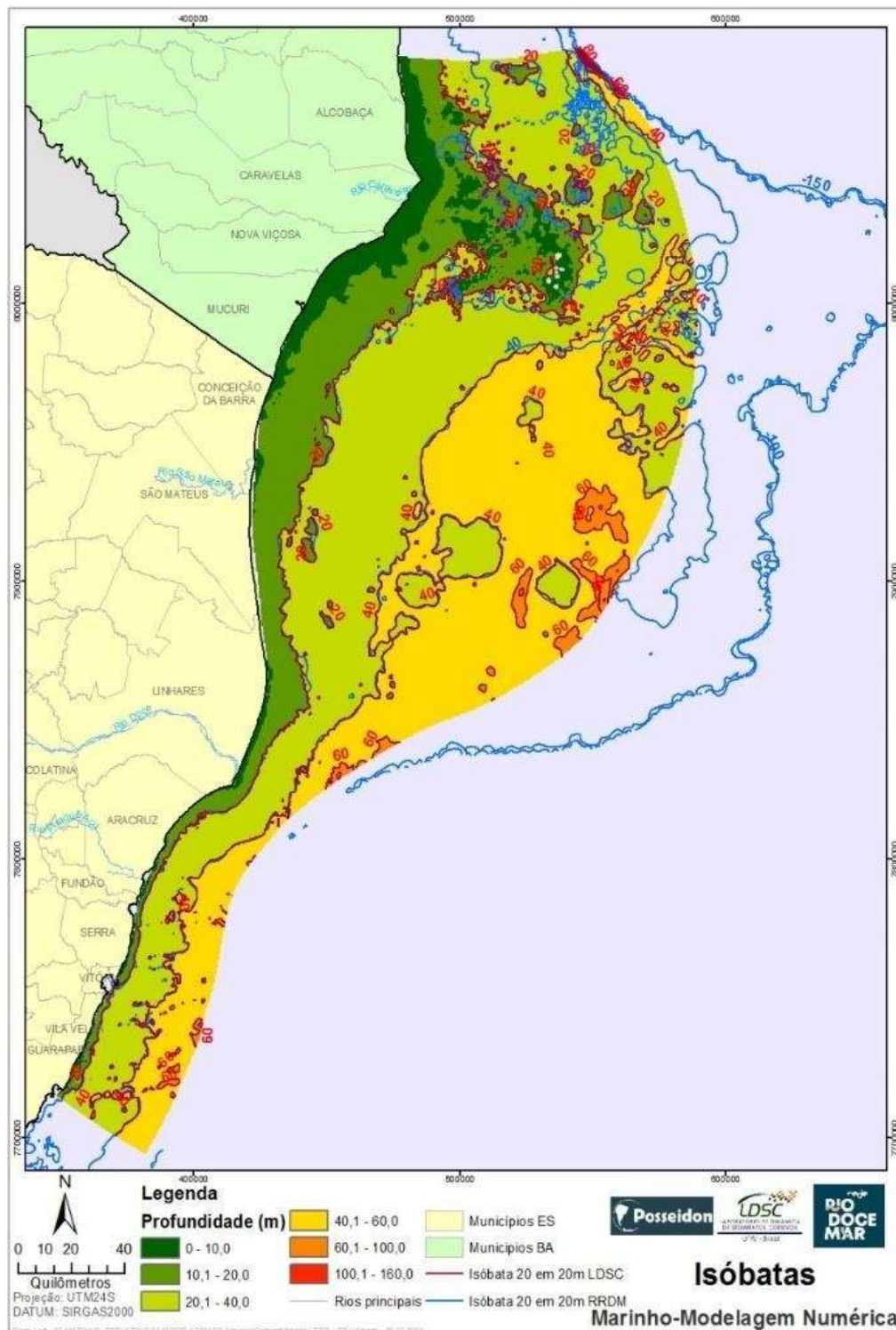
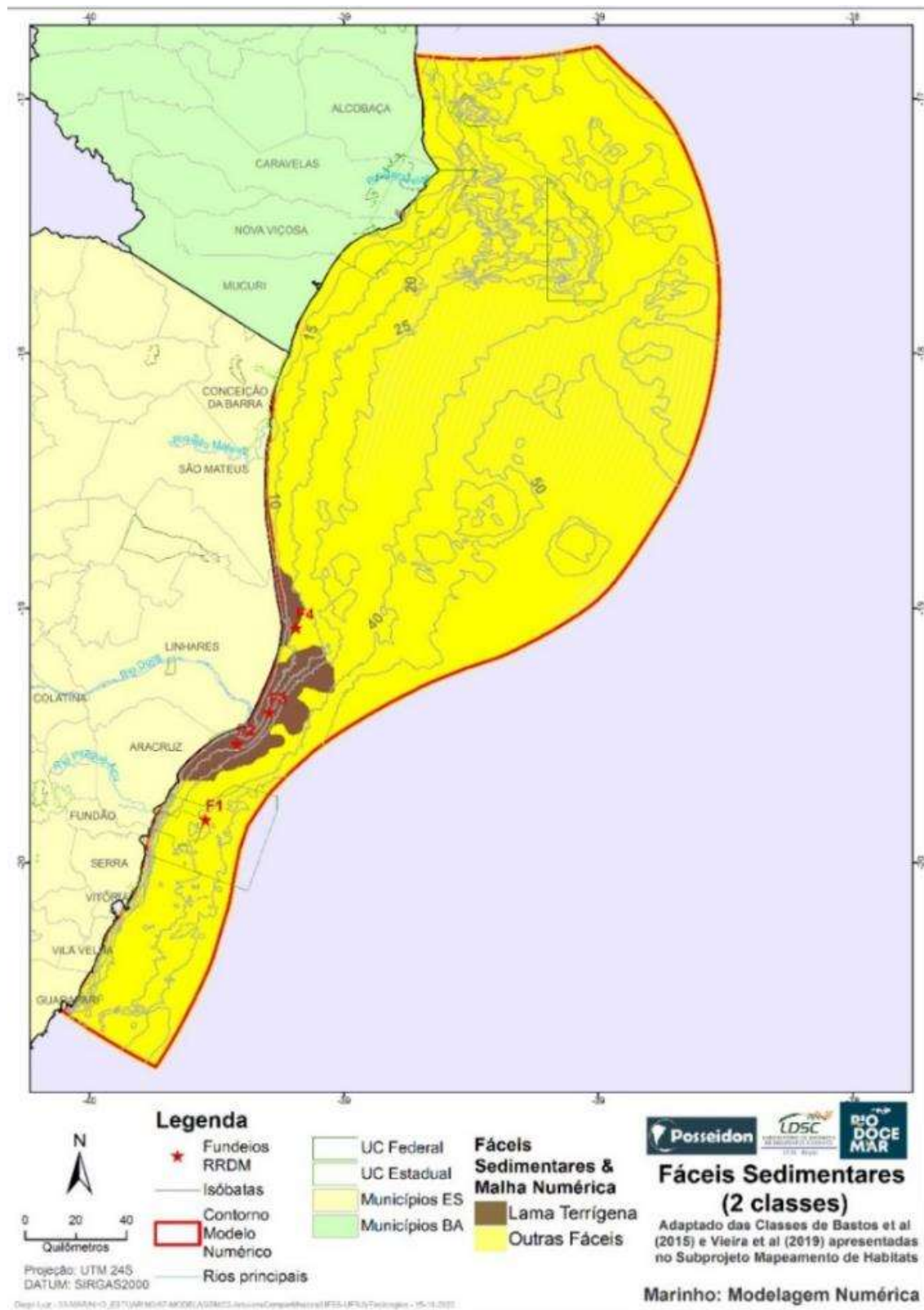


Figura 3: Localização do depósito lamoso. Área do depósito lamoso adaptado de Bastos *et al.* (2015) e Vieira *et al.* (2019).



Em relação às forçantes hidrodinâmicas, foram considerados o efeito da maré, das ondas, o efeito do vento e da pressão atmosférica. Como condição de contorno de maré foram 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 foram interpoladas para os pontos nos contornos a partir da informação do modelo global FES2014. Na modelagem das ondas de gravidade foram utilizadas condições de contorno geradas pelo modelo de ondas do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Os dados disponibilizados de ondas (altura significativa -Hs-, período de pico -Tp- e direção média -Dir-), de vento (componentes u e v da velocidade) e pressão atmosférica são advindos de uma reanálise global (ERA5). Os dados do ERA5 são disponibilizados numa grade regular com resolução espacial de 0,25 graus. No caso das ondas, a condição de contorno é de tipo paramétrica, sendo utilizados os valores de Hs, Tp e Dir, interpolados para os pontos do contorno leste. Na definição das direções de propagação foram consideradas 36 direções, com mínima frequência de 0,05 Hz e máxima de 1 Hz (em 24 bins de frequência). Tanto os dados de onda quanto os de vento e pressão atmosférica foram prescritos com intervalo temporal horário. Em relação às parametrizações sub-grade e da tensão de atrito de fundo, para o cálculo da mistura horizontal foi 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 utilizou-se a formulação de Chezy com um valor do coeficiente $C = 65$ constante no domínio. Sem aportes de água doce, foi considerado um campo homogêneo de densidade igual a 1025 kg/m^3 .

1.2 ESTIMATIVAS DE DERIVA LITORÂNEA

Para estimar as vazões do transporte litorâneo, foi seguida a metodologia de Rodriguez e Mehta (2000), calculando para cada perfil do litoral (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 $V(y)$, uma vez que o modelo numérico utilizado não consegue reproduzir as principais feições hidrodinâmicas na zona de surfe devido à discretização da malha, foi utilizado um modelo analítico-paramétrico com base nos trabalhos de (Longuet-Higgins, 1970a, 1970b). Este 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 (x) dependente do grau de difusão lateral considerado, o que permite representar a variação da velocidade tanto na zona offshore quanto on-shore. Considerando um perfil de velocidades que decai linearmente, a magnitude da corrente litorânea resultante dentro da zona de surfe pode ser calculada conforme apresentado na Equação 1:

$$V(x) = \frac{5\pi}{16} \frac{\tan(\beta)}{c_f} g H_b \frac{d(x)}{d_b} \frac{\sin(\theta_b)}{\sqrt{g d_b}} \cos(\theta_b) \quad \text{Equação 1}$$

Onde: β é a declividade da praia; c_f o coeficiente de atrito do fundo (função da profundidade e diâmetro dos sedimentos na praia, (Van Rijn, 1993); $d(x)$ e d_b as profundidades ao longo do perfil (x) e na quebra, respectivamente; g a gravidade, H_b e θ_b a altura e ângulo de ataque da onda na zona de arrebentação. Assim, o modelo analítico-paramétrico prevê a velocidade máxima da corrente (V_{max}) ocorrendo na linha de quebra da onda, onde $d(x=x_b) = d_b$.

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. Essa modificação é realizada através do emprego de um coeficiente de mistura (P), conforme Equação 2:

$$P = \frac{p \tan(\beta) N}{g c_f} \quad \text{Equação 2}$$

Onde, N é o coeficiente de difusão turbulenta e p o parâmetro ou índice de quebra da onda.

Os cálculos foram realizados em 14 perfis de praia ao longo do litoral, cinco ao sul do Rio Doce e nove ao Norte do Rio Doce. As informações sobre as características da praia para cada perfil, como declividade, granulometria e azimuth, foram obtidas dos levantamentos realizado na região praial (RRDM, 2019). 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 reduz o pico da corrente litorânea (V_{max}) aproximadamente em 40%.

A altura e ângulo de incidência das ondas foi extraído dos resultados da modelagem numérica, em cada perfil na profundidade de 10 m. 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). Com a declividade de cada perfil e a profundidade de quebra, foi determinada a largura da zona de surfe ($B(y)$).

A deriva litorânea foi analisada para todo o ano 2019 e em detalhe nos dois eventos anteriormente descritos (evento 1 e 2). Para cada cenário foram calculadas as vazões líquidas de deriva, assim como os valores residuais.

1.3 VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Os resultados da modelagem foram comparados com os dados medidos levando em consideração os principais processos físicos atuantes durante o período chuvoso compreendido entre os meses de

novembro de 2019 a março de 2020. Nesta análise foram levadas em consideração processos como ondas, vento e vazão fluvial. A maré, como descrita em relatórios anteriores, tem pouca influência sobre a dispersão dos sedimentos em suspensão, assim como, não apresentará modificações expressivas em suas características com o aumento da vazão.

Ondas: Comparando os dados medidos dos parâmetros de onda referente aos fundeios F1, F2, F3 e F4 pode-se observar que os dados simulados pelo modelo acompanharam suas oscilações, apresentando algumas diferenças. Com respeito à altura significativa, os resultados do modelo apresentaram uma superestimativa dos valores máximos durante alguns dos eventos de maior energia, como o ocorrido no início de mês de agosto, por exemplo, principalmente nas estações F1 e F4, quando a altura significativa dos dados medidos atingiu pouco mais de 2 metros. Neste evento, o modelo registrou valores acima dos 3 metros (Figura 4). A correlação da altura significativa entre os dados simulados e medidos ficou em torno de 75% com um BIAS de até 0.1 m e RMSE próximo a 0.25 m (Tabela 2).

A direção e o período de pico simulados pelo modelo apresentaram uma boa correlação com os dados medidos, com valores de 75% e 63%, respectivamente (Figura 5 e Figura 6). Em todas as estações, houve uma subestimativa dos dados simulados, principalmente na estação F2, tanto na direção quanto no período de pico, com um BIAS de -5.3° e -2.25 s, respectivamente, ainda que tenham representado as mesmas oscilações dos dados medidos. Ao contrário do descrito no relatório anterior, não foi observada bimodalidade na direção, havendo predominância de ondas de E/SE, oriundas do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

Figura 4: Séries temporais da Altura Significativa (Hs) medidas e simuladas pelo modelo nos fundeios F1, F2, F3 e F4.

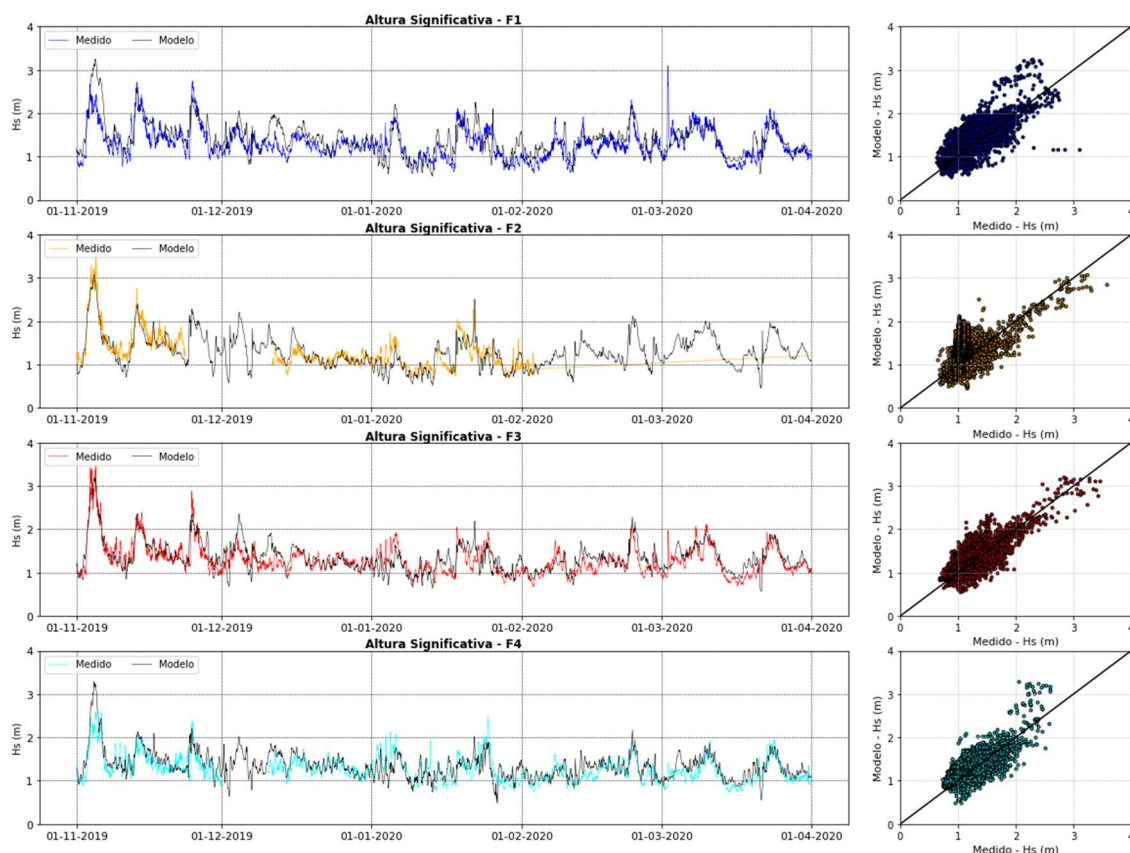


Tabela 2: Estatística de comparação entre os dados medido e simulados pelo modelo nos quatro fundeios.

Estação	Altura Significativa			Direção			Período de Pico		
	RMSE	Correlação	BIAS	RMSE	Correlação	BIAS	RMSE	Correlação	BIAS
F1	0,28	0,75	0,1	27,58	0,79	0,82	2,1	0,63	-1,39
F2	0,31	0,64	0,08	50,55	0,02	-5,31	2,85	0,58	-2,25
F3	0,23	0,8	0,06	21,07	0,84	-1,8	2,42	7	-1,76
F4	0,23	0,76	0,07	27,95	0,72	6,96	2,53	0,66	-1,87

Figura 5: Séries temporais da Direção medida e simulada pelo modelo nos fundeios F1, F2, F3 e F4.

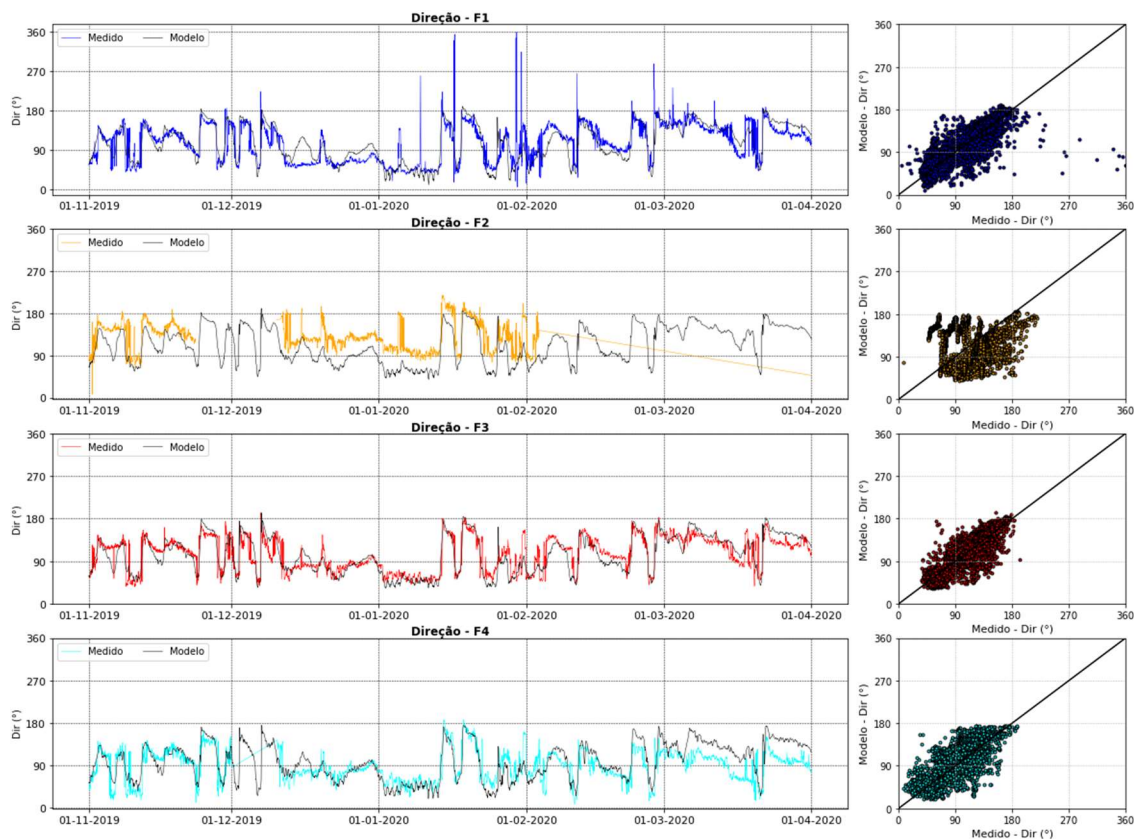
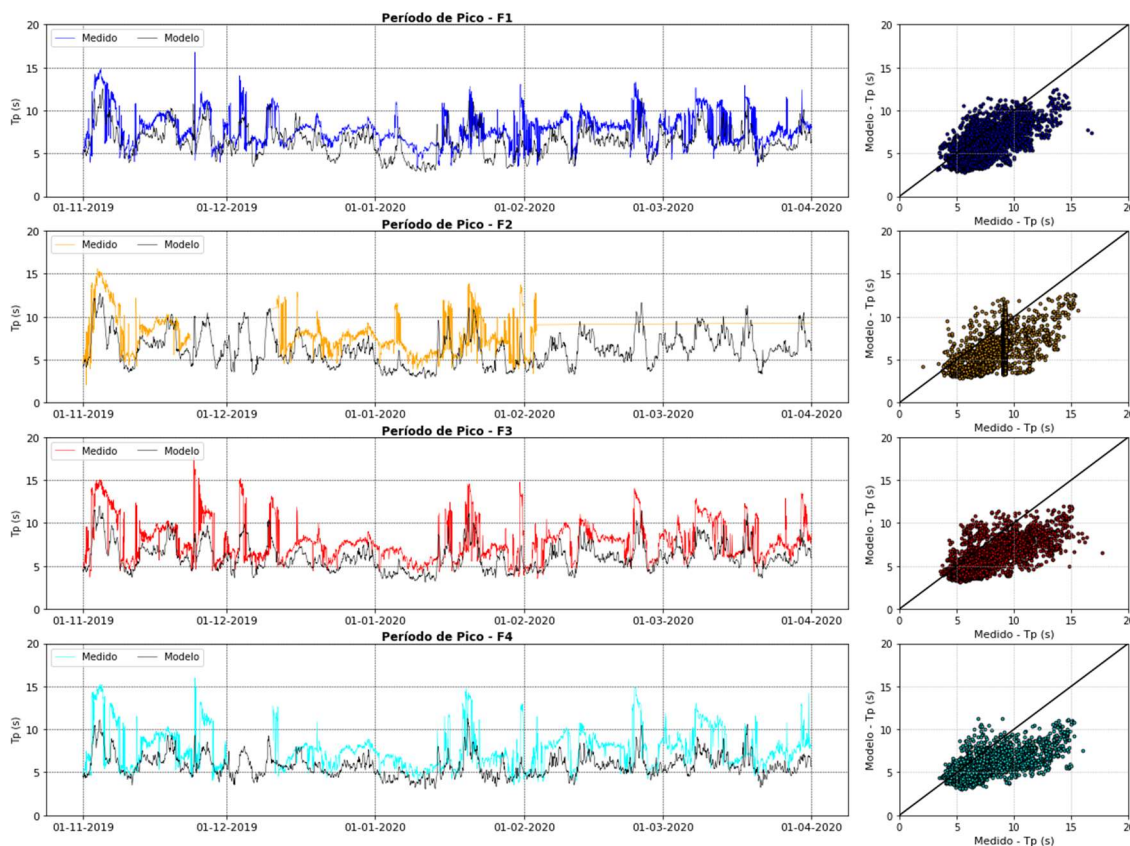
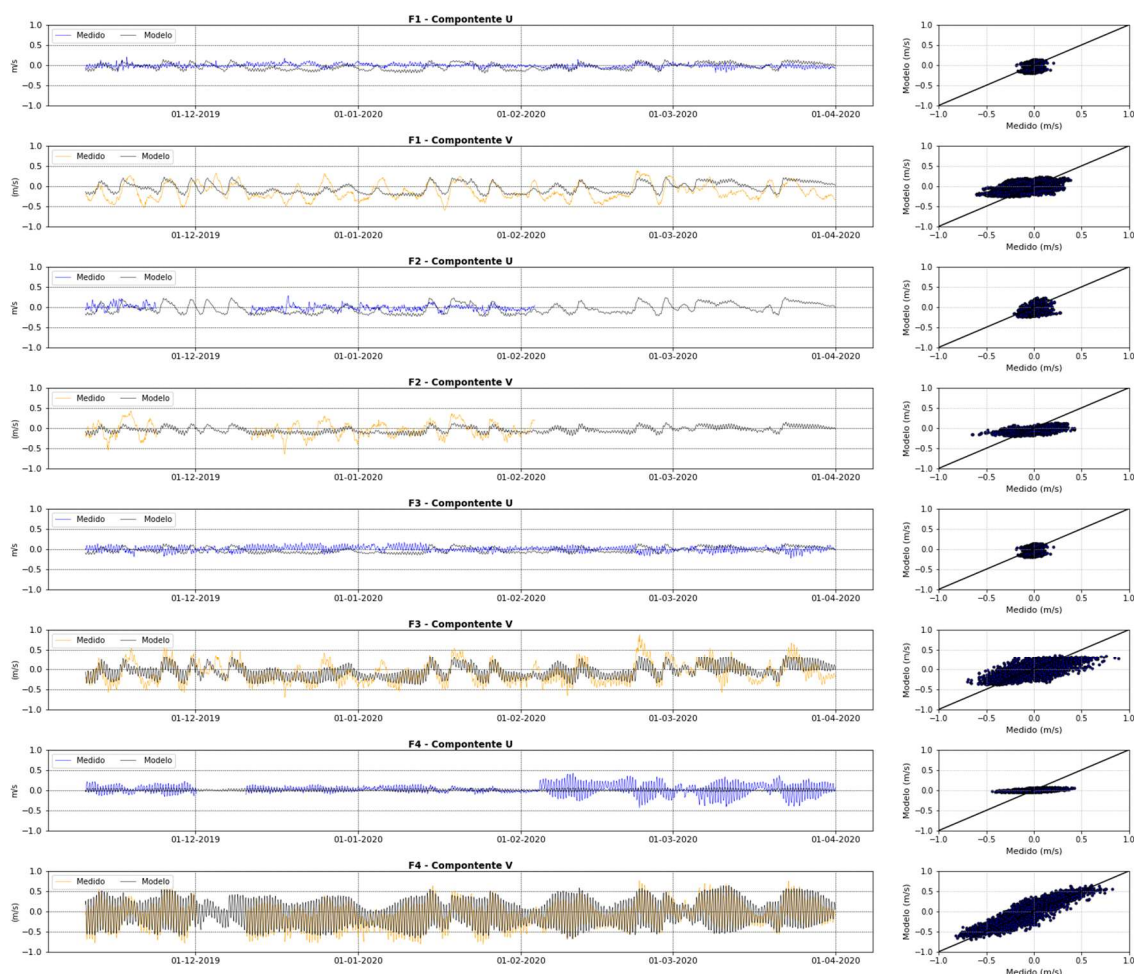


Figura 6: Séries temporais do Período de Pico medidos e simulados pelo modelo nos fundeios F1, F2, F3 e F4.



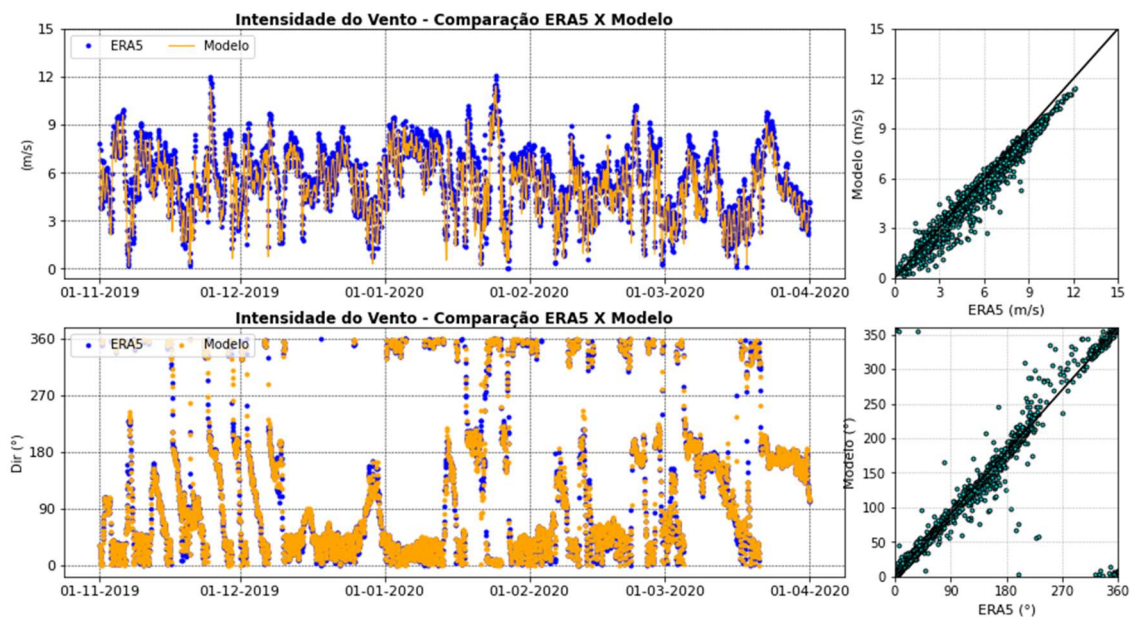
Corrente: A comparação entre as correntes simuladas e medidas promediadas em profundidade nas estações dos fundeios F1, F2, F3 e F4 foram realizadas considerando as componentes U e V (Figura 7). Assim como o descrito em comparações no relatório anterior, o componente longitudinal (V) foi dominante nos fundeios F1, F3 e F4 enquanto que as correntes transversais (U) são dominantes no caso do F2. O ajuste entre os dados medidos e os resultados do modelo foi melhor para estação F4, onde a maré apresentou maior influência na modulação da variabilidade das correntes. O ajuste nas demais estações não foi satisfatório, ainda que a componente longitudinal tenha sido bem representada pelo modelo. As diferenças podem estar associadas a processos de grande escala, que serão incluídos em simulações futuras, considerando modelagem 3D e acoplamento com o modelo ROMS (RRDM, 2019).

Figura 7: Verificação da simulação dos componentes da velocidade da corrente nos fundeios F1, F2, F3 e F4, durante o período chuvoso.



Condições de contorno de vento impostas para o modelo: O modelo hidrodinâmico utilizou informações da reanálise ERA5 como condição de contorno imposta para o vento. No intuito de verificar se o modelo simulou corretamente este forçante, muito importante para a região em estudo, foi feita uma verificação e comparação da intensidade e direção do vento entre a reanálise e os simulados pelo modelo (Figura 8). A Direção do vento obtida pelo modelo, acompanhou os dados da reanálise, ainda que tenha sido observado uma ligeira subestimação na simulação pelo modelo, com um BIAS de -4.9° , mas com uma correlação de 90%. A Intensidade do vento apresentou uma correlação de 98%, um BIAS de -0.3 e RMSE de 0.4 . Estes resultados mostraram que o modelo representou de forma satisfatória este processo.

Figura 8: Verificação dos dados de vento (ERA5) utilizados como condição de contorno do modelo hidrodinâmico.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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. *et al.* 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
- CERC. **Coastal Engineering Research Center (CERC). Shore Protection Manual (SPM)**. US Army. EUA. 1984
- 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.
- 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. <https://doi.org/10.1029/jc075i033p06790>. 1970b
- RODRIGUEZ, H. N.; MEHTA, A. J. Longshore transport of fine-grained sediment. **Continental Shelf Research**, 20(12–13), 1419–1432. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(00\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(00)00030-3). 2000.
- RRDM. Rede Rio Doce Mar. Relatório Anual – Anexo 4 Praias. RT-20, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 2019.
- VAN RIJN, L. C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. **Aqua Publications**. 1993
- VIEIRA, F. V. *et al.* Along-Shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. **Continental Shelf Research**. 2019.