**MATERIAL SUPLEMENTAR – S2**

**MODELAGEM NUMÉRICA**

Síntese dos principais resultados obtidos no período de transição, que indicam ou não impactos na qualidade ambiental e na biodiversidade;

Durante esse período de transição se deu inicio à etapa de modelagem da região costeira e de transporte de sedimento pelo grupo LDSC/COPPE/UFRJ. Rodadas ainda preliminares permitiram avaliar a influência da maré e as ondas na hidrodinâmica da plataforma. A maré é um dos fenômenos que definem a variabilidade de alta frequência do padrão de correntes na região (Castro et al., 2013; Teixeira et al., 2013; Viégas, 2006). A assimetria das marés é reconhecida como um dos processos importantes na geração de transporte residual e, consequentemente, define o destino de sedimentos em suspensão. A análise de dados de marés disponíveis na região (de estações maregráficas localizadas e de modelo global) permitiu observar as modificações da maré na plataforma e evidenciar padrões de assimetria esperados. Dados de correntes, coletados pelo LabPosseidon no escopo da Rede Rio Doce Mar (RRDM, 2019b), foram analisados visando evidenciar à resposta do modelo, numa primeira fase de implementação. Uma análise das ondas apresentada em relatórios anteriores da RRDM (RRDM, 2019a), indicam as ondas como um agente potencial na erodibilidade do material que contribuiria nos picos de turbidez medidos.

1. **Feições hidrodinâmicas decorrentes da ação de marés e ondas:**

A maré é um dos fenômenos que definem variabilidade de alta frequência do padrão de correntes em regiões costeiras (Castro et al., 2013; Teixeira et al., 2013; Viégas, 2006). A assimetria das marés é reconhecida como um dos processos mais importantes na geração de transporte residual e, consequentemente, alterações morfológicas em grande escala. A assimetria das marés se refere ao fenômeno da deformação das ondas (Friedrichs & Aubrey, 1988; Pugh & Wodworth, 2014), que leva a uma duração desigual de subida e descida dos níveis d’água (maré vertical) e, consequentemente, diferenças associadas nos picos de velocidades de enchente e vazante (maré horizontal). Uma subida mais rápida da maré, associada a maiores correntes de enchente, resultam em domínio de enchente (ou assimetrias positivas). Por outro lado, uma descida mais rápida da maré, com correntes mais intensas na vazante, promove o domínio de vazante (ou assimetrias negativas).

Com o objetivo de caracterizar a maré foram analisadas informações de estações maregráficas localizadas e de modelo global de maré. A análise desses dados permitiu observar as modificações da maré ao longo da área e evidenciar padrões de assimetria esperados. Dados de correntes, coletados pelo LabPosseidon no escopo da Rede Rio Doce Mar, foram analisados (RRDM, 2019b) visando evidenciar à resposta do modelo, numa primeira fase de implementação.

Uma análise das ondas a partir de medições foi apresentada em relatórios da RRDM (RRDM, 2019a), sendo indicadas como um agente potencial na erodibilidade do material que contribuiria nos picos de turbidez medidos. A modelagem de ondas permitirá uma visão regional do impacto das ondas na remobilização do material assim como o transporte na corrente litorânea. Uma modelagem preliminar de um cenário de inverno é mostrado, colocando em evidência diferenças observadas nos fundeios.

**Análise dos dados de níveis da superfície do mar**

Foram realizadas análises de series temporais de níveis da superfície do mar de estações maregráficas disponibilizados pelo BNDO - Banco Nacional de Dados Oceanográficos e dados coletados em quatro fundeios, pelo LabPosseidon no escopo da RRDM. Foram também utilizados dados de fase e amplitude das componentes harmônicas da maré extraídas do Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras (FEMAR, 2000). A informação anterior foi complementada com dados de fase e amplitude das componentes de maré publicadas em Teixeira et al. 2013 e da base global FES2014 (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2014.html>).

Após uma etapa de pré-processamento dos dados com a uniformização do referencial horário, verificação e eliminação de estações maregráficas localizadas no interior de rios (foram selecionadas 16 das 20 estações originais); uniformização de unidades para fase e amplitude; foram obtidas as constantes harmônicas nas séries de níveis medidas e simuladas, utilizando programa t-tide, (Pawlowicz et al., 2002). Visando avaliar o comportamento espacial das amplitudes da maré na região foi gerado o mapa do parâmetro Z0 (DHN, 2017), neste caso obtido como somatório das amplitudes das componentes semidiurnas M2, S2, K2 e N2. Porém, nesse cálculo não foi considerada a componente K2 visto que o comprimento das series de níveis foi inferior a 183 dias, na maioria dos casos, período mínimo necessário para a determinação dessa componente.

O critério de Courtier ou número de forma da maré (NF), calculado como o quociente entre a soma das amplitudes principais componentes semidiurnas (M2 e S2) e diurnas (O1 e K1), mostra uma maré tipicamente semidiurna (NF< 0,25), com valores entre 0,10 e 0,22.

Como parte da caracterização espacial do comportamento da maré foram geradas as cartas cotidais de fase e amplitude calculadas para 22 constantes do FES2014 (13 constantes semidiurnas: 2N2, EPS2, K2, L2, LA2, M2, MKS2, MU2, N2, NU2, R2, S2, T2; 6 constantes diurnas: J1, K1, O1, P1, Q1, S1 e 8 constantes de águas rasas: M4, M6, M8, MN4, MS4, MU2, N4, S4). Não foram consideradas na presente análise as constantes de longo período MF, MM, MSF, MSQM, MTM, SA, SSA. Além da representação em mapas, foram escolhidos pontos para análise no domínio, como indicado na Figura 1, considerando estações maregráficas e pontos ao longo de 2 perfis longitudinais (PA, PB). O perfil PA constituído pelos pontos onde existe informação maregráfica na costa mais o ponto do fundeio #506 da publicação do Teixeira et al. (2013). O perfil PB constituído por pontos nos locais dos fundeios do LabPoseidão, no ponto da estação de Abrolhos e pontos aproximadamente equidistantes ao longo do domínio de modelagem acompanhando a isobata de 40m (Figura 1). Para os perfis PA e PB foram gerados histogramas de fase e amplitude para as principais constituintes da maré medida e simulada.

Tradicionalmente, a ocorrência das assimetrias de marés é avaliada com base em indicadores calculados com as constantes harmônicas das componentes de maré (Guo et al., 2019). Em regimes semidiurnos, como o caso da região de estudo, as interações entre as ondas de maré M2 (principal semidiurna) e M4 (primeiro sobre-harmônico) são amplamente reconhecidas como a causa dominante da deformação das ondas de maré e assimetria de maré associada (Friedrichs & Aubrey, 1988; Speerb & Aubrey, 1985). Três indicadores foram considerados: a relação de fases (RF), a razão de amplitudes (RA) e o parâmetro γ2. Uma diferença de fase () na faixa de 0o a 180º leva a uma subida mais rápida da maré, enquanto uma diferença de fase na faixa de 180º a 360º, leva a uma descida mais rápida. Considerando um mesmo valor de diferença de fase, a razão de amplitudes () é usada para indicar a magnitude da deformação ou caráter não linear da maré. O parâmetro γ2 (teve uma origem estatística, incluindo no seu cálculo a função de distribuição de probabilidade das alturas das marés (Nidzieko, 2010). Na forma aqui apresentada, o cálculo é realizado pela sua forma simplificada (Song et al., 2011) que combina os dois indicadores de fase e razão de amplitudes anteriores. Valores positivos e negativos de γ2 indicam assimetria positiva e negativa, respectivamente. Os parâmetros Z0, RA, RF e γ2) foram calculados tanto para os dados medidos, para os dados do modelo global FES2014 e para os resultados de modelagem (Tabela 1).

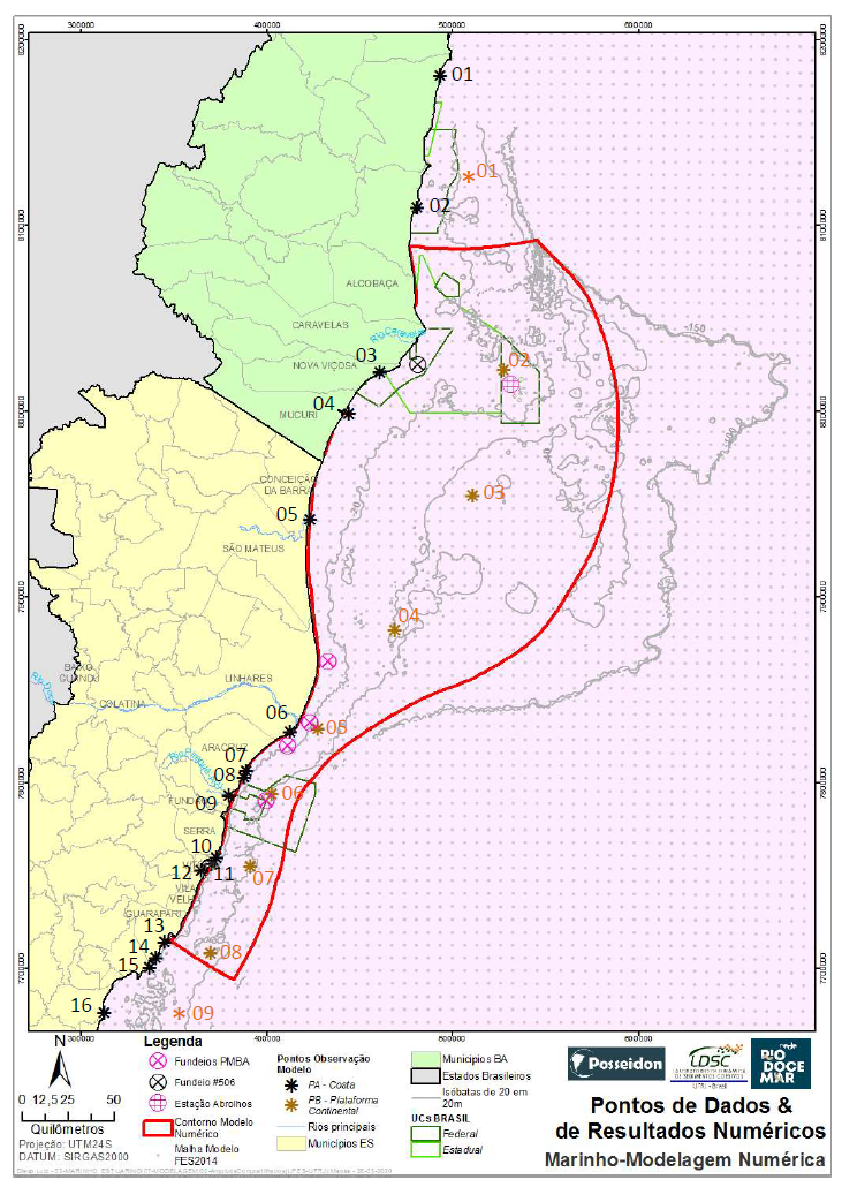


Figura 1 - Figura 1 Malha do modelo global FES2014 e localização dos pontos com informação de maré e resultados da modelagem. Fundeios do LabPosseidon – PMBA (F1 a F4); estações maregráficas costeiras, estação maregráfica de Abrolhos, fundeio #506 de Teixeira et al, 2013 e pontos acompanhando a batimétrica d 40m. A linha vermelha representa o contorno da grade de modelagem. As linhas cinzas representam as isobatimétricas de 20, 40, 100 e 150m. Os polígonos verdes representam as unidades de conservação Apa Costa das Algas e ParNa do Abrolhos.

Tabela 1 - Estações maregráficas e fundeios mostradas na Figura 1. Amplitude e fase das componentes M2 e M4; parâmetros Z0, Razão de Amplitudes (RA), Relação de Fases (RF) e Parâmetro*γ2****.***

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nro | Nome da estação | Latitude (°S) | Longitude (°W) | M2 | | M4 | | Z0 (cm) | RA | RF (°) | γ2 |
| A (cm) | F (°) | A (cm) | F (°) |
| PA1 | Porto Seguro | 16° 27,5' | 39° 03,70’ | 66,3 | 112 | 2,1 | 133 | 98 | 0,03 | 221 | -0,09 |
| PA2 | Cumuruxatiba | 17° 06,0’ | 39° 10,70’ | 78,3 | 98 | 2,3 | 139 | 118 | 0,03 | 187 | -0,02 |
| PA3 | Nova Viçosa | 17° 54,0’ | 39° 22,30’ | 90,2 | 112 | 2,0 | 307 | 143 | 0,02 | 47 | 0,07 |
| PA4 | Mucuri | 18° 06,20’ | 39° 31,70’ | 78,3 | 107 | 3,8 | 190 | 117 | 0,05 | 154 | 0,09 |
| PA5 | Conceição da Barra | 18° 36,98’ | 39° 43,71’ | 66,5 | 132 | 5,2 | 251 | 101 | 0,08 | 100 | 0,32 |
| PA6 | Barra do Rio Doce | 19° 39,00’ | 39° 50,00’ | 39,1 | 94 | 1,9 | 106 | 62 | 0,05 | 212 | -0,11 |
| PA7 | Terminal da Barra do Riacho | 19° 50,33’ | 40° 03,58’ | 44,3 | 85 | 1,0 | 64 | 73 | 0,02 | 237 | -0,08 |
| PA8 | Estaleiro Jurong | 19° 52,10’ | 40° 04,40’ | 41,8 | 89 | 0,6 | 62 | 62 | 0,01 | 245 | -0,06 |
| PA9 | Piraquê – Açu | 19° 57,30’ | 40° 09,00’ | 44,8 | 84 | 1,6 | 33 | 70 | 0,04 | 265 | -0,15 |
| PA10 | Terminal das Barcaças Oceânicas | 20° 15,51’ | 40° 13,18’ | 45,6 | 85 | 0,7 | 83 | 75 | 0,02 | 217 | -0,04 |
| PA11 | Porto de Tubarão | 20° 17,33’ | 40° 14,62’ | 46,7 | 86 | 0,8 | 66 | 78 | 0,02 | 236 | -0,06 |
| PA12 | Capitania dos Portos do Espírito Santo | 20° 19,10’ | 40° 17,84’ | 47,1 | 137 | 0,3 | 159 | 76 | 0,01 | 201 | -0,01 |
| PA13 | Guarapari (Enseada) - ES | 20° 40,00’ | 40° 29,50’ | 44,2 | 114 | 0,5 | 100 | 69 | 0,01 | 258 | -0,05 |
| PA14 | Ponta de Meaipe | 20° 44,51’ | 40° 32,21’ | 45,6 | 85 | 2,3 | 64 | 74 | 0,05 | 235 | -0,17 |
| PA15 | Terminal da Ponta do Ubu | 20° 47,23’ | 40° 34,22’ | 47,9 | 88 | 1,2 | 66 | 78 | 0,03 | 241 | -0,09 |
| PA16 | Barra do Itapemirim | 21° 00,41’ | 40° 48,50’ | 47,5 | 94 | 2,5 | 76 | 75 | 0,05 | 242 | -0,19 |
| F1 | Fundeio 1 | 19° 58,95’ | 39° 57,51’ | 45,9 | 172 | 0,9 | 236 | 69 | 0,02 | 108 | 0,07 |
| F2 | Fundeio 2 | 19° 42,91’ | 39° 50,84’ | 46,5 | 182 | 0,7 | 274 | 71 | 0,01 | 90 | 0,06 |
| F3 | Fundeio 3 | 19° 36,25’ | 39° 43,99’ | 48,5 | 172 | 0,7 | 283 | 73 | 0,01 | 60 | 0,05 |
| F4 | Fundeio 4 | 19° 18,32’ | 39° 38,27’ | 60,0 | 172 | 1,6 | 13 | 92 | 0,03 | 330 | -0,06 |
| Abr | Estação de Abrolhos | 17° 57,60’ | 38° 42,20’ | 77,1 | 100 | 2,1 | 229 | 130 | 0,03 | 331 | -0,06 |
| 506 | Fundeio #506 Teixeira etal., 2013 | 17° 51,71’ | 39° 10,46’ | 90 | 186 | 4,0 | 67 | 143 | 0,04 | 305 | -0,15 |

**Análise de dados de correntes**

A análise dos dados de correntes visou evidenciar a resposta às modificações de assimetria encontradas nas séries de níveis. Os dados de correntes utilizados foram as séries de correntes dos fundeios (F1, F2, F3 e F4 na Figura 1), apresentados no relatório anterior (RRDM, 2019b), e informações apresentadas na publicação com análise de dados na região ao norte (Teixeira et al., 2013). Foi realizada análise espectral para quantificar as energias nas altas frequências presentes nas séries e utilizadas para a validação dos resultados obtidos da modelagem.

**Modelagem Numérica**

A malha numérica adotada (Figura 2) 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 malha está composta por 13.530 células, com espaçamentos distintos ao longo da região de interesse, diminuindo em direção à costa e também próximo à foz do rio Doce. A resolução espacial da malha foi variável (ver Tabela 2).

Para a escolha da base de dados utilizada na geração da batimétrica 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 Espirito 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 n° 22700, 1310, 1311 e 1312 (DHN, 2020). A região objeto da modelagem numérica apresenta profundidades inferiores a 50 metros.

Tabela 2 - Detalhamento da resolução espacial da malha

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Variação no sentido | |
| Longitudinal | Latitudinal |
| setor Norte | Na costa: 850 a 2000m  No talude: 1900 a 5300m | 1600 a 2800m |
| setor rio Doce | Na costa: 140 a 300m  No talude: 800 a 2000m | 250 a 2000m |
| setor Sul (nas proximidades da APA Costa da Algas) | Na costa: 400 a 500m  No talude: 700 a 1400m | 1200 a 2000m |

A configuração utilizada para as simulações numéricas hidrodinâmicas foram testes simplificados que consideraram forçantes de maré (EXP1) e de maré e ondas monocromáticas representativas de cenários típicos de verão e inverno (EXP2 e EXP3, respectivamente). No EXP1 foi utilizada a versão Delft3D 4.00.02, MSWindows. Já nos EXP2 e EXP3 (maré e onda monocromática) foi acoplado ao anterior o módulo Delft3D-Wave GUI, Version 4.94.05.34107. Nesses primeiros experimentos foi adotada uma abordagem bidimensional 2DH. O EXP1 foi realizado para o período de 01 de outubro de 2018 a 31 de dezembro de 2019, enquanto os experimentos EXP2 e EXP3 foram realizados ao longo de 3 meses. Esses dois experimentos consideraram condições de onda representativas de 2 cenários simplificados. No EXP2 a direção da onda foi de E com período típico de verão de 8 s e 1,2 m de altura. No EXP3 a direção da onda foi de SE com período típico de inverno de 10 s e 1,7 m de altura. A escolha desses cenários foi com base no estudo anterior (RRDM, 2019b). Em todos os experimentos o passo de integração foi de 1 minuto.

Como condição de contorno de maré foram prescritas as 10 principais constantes M2, S2, N2, K2, O1, K1, Q1, P1, M4, MN4. As informações de fase e amplitude foram interpoladas para os pontos nos contornos a partir da informação do modelo global FES2014. Em relação às parametrizações sub-grade e da tensão de atrito de fundo, em todos os experimentos, para o cálculo da mistura horizontal foi adotado um coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal constante no domínio de 1 m2/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. Nos EXP2 e EXP3 foram adicionadas ondas uniformes em toda a fronteira Leste, com espectro paramétrico de Johnswap. Foi considerado um campo homogêneo de densidade igual a 1025 kg/m3.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Figura 2 - (esquerda) Pontos da grade numérica e detalhe da resolução na foz do Rio Doce. (direita) Batimetria obtida por interpolação das cartas náuticas da Marinha do Brasil.

**Descrição do comportamento da maré**

Como mencionado, o Z0 pode ser considerado um bom parâmetro indicador da amplitude total da maré. O Z0 calculado para os dados do FES2014 é mostrado na Figura 3. O Z0 calculado para os pontos na plataforma (Figura 1, Tabela 1), comparando as informações do modelo global FES2014, dos dados e dos resultados do modelo (EXP1), é mostrado na Figura 4.

Na plataforma continental do Espirito Santo e Sul da Baia, nas proximidades do talude continental, os valores de Z0 variaram entre 70 e 110 cm (Figura 3). Observa-se um aumento progressivo da amplitude da maré de sul para norte. Ao norte do Rio Doce, no alargamento da plataforma continental, é observado um aumento da amplitude da maré, possivelmente decorrente dessa feição batimétrica, do embaiamento e menores profundidades da plataforma continental na região do Banco de Abrolhos.

Na fronteira do modelo hidrodinâmico (EXP1) é imposta a informação obtida do modelo global (FES2014), e, como esperado na plataforma interna (Figura 4) pode ser observada uma boa concordância entre ambos os modelos. Porém, nos pontos onde existem medições (F1, F2, F3, F4 e Abrolhos), observa-se um melhor ajuste dos níveis simulados no EXP1 do que o observado para a base FES2014.

A Figura 5 mostra o valor do parâmetro Z0 para os pontos da região costeira (Figura 1). As estações maregráficas corroboram o aumento progressivo da amplitude da maré de sul para norte observado no modelo global FES2014. Entre Guarapari (ponto PA13) e a embocadura do Rio Doce (ponto PA06) os valores de Z0 apresentaram média de 75 cm ± 3 cm. Já na região ao norte do Rio Doce até Porto Seguro (ponto PA01) os valores de Z0 apresentaram média de 106 cm ± 27 cm com máximos de 143cm em Nova Viçosa (ponto PA03), na altura de Abrolhos. Como já era de esperar, os resultados do FES2014 começam a perder qualidade na região costeira, principalmente nos locais mais rasos. Os resultados do EXP1 apresentaram um bom ajuste na região costeira ao sul da foz do Rio Doce. Já ao norte, a amplitude da maré simulada nessas primeiras simulações foi superestimada.

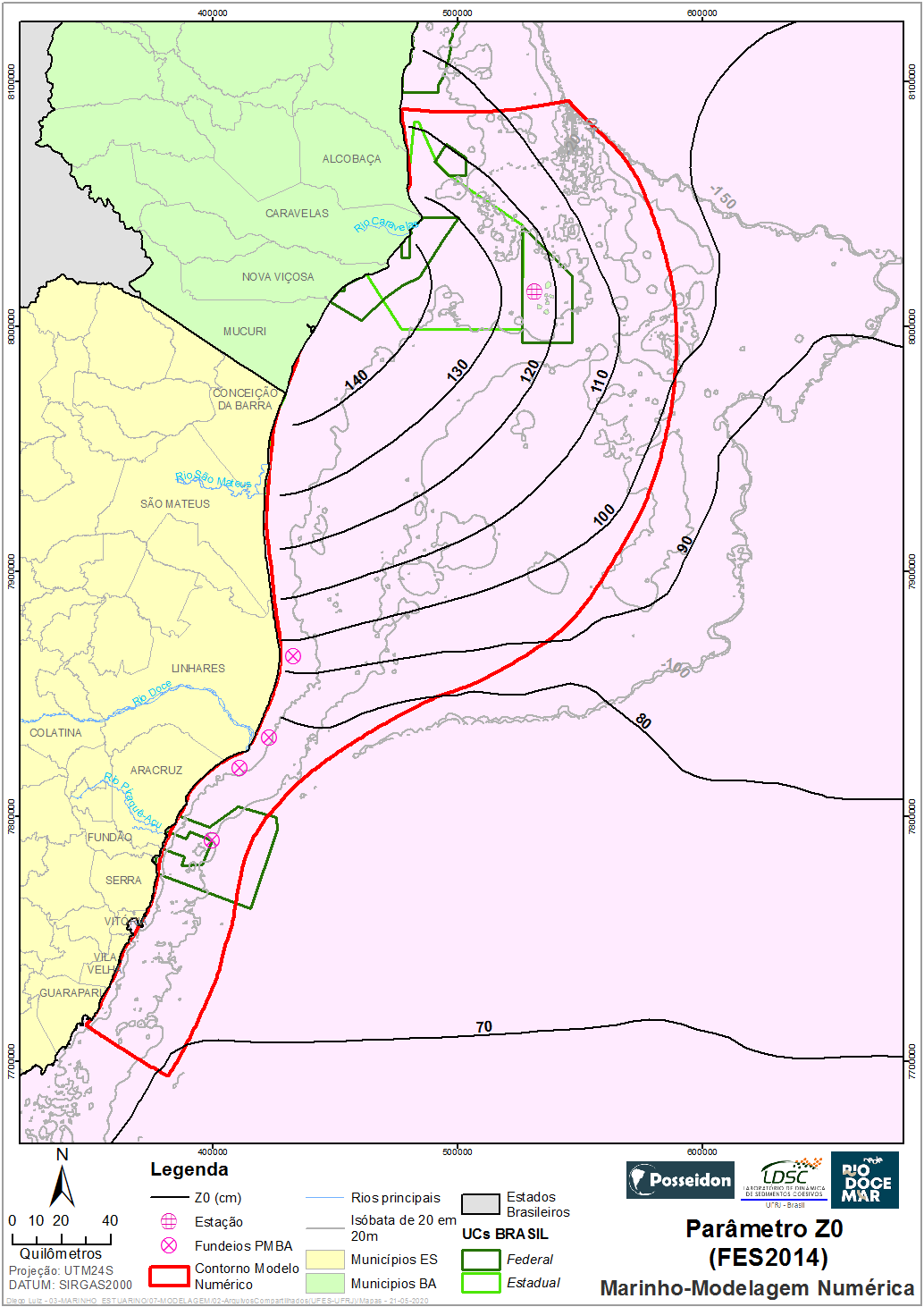


Figura 3 - Mapa do parâmetro Z0 (cm), somatório das amplitudes das componentes astronômicas semidiurnas M2, S2 e N2, obtidas do modelo global FES2014

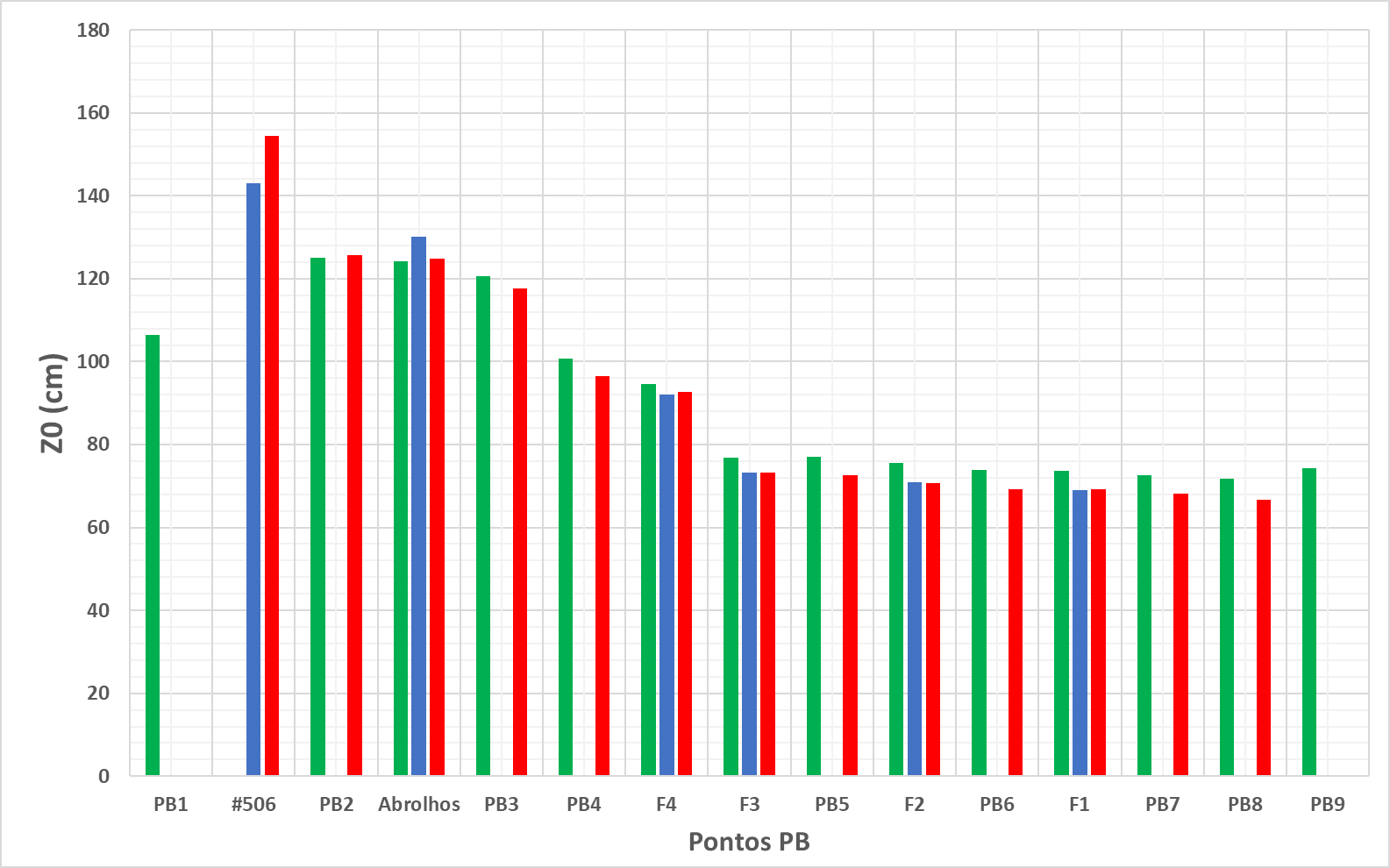


Figura 4 - Parâmetro Z0 em pontos da plataforma (Figura 1), comparando dados (azul), modelo global FES2014 (verde) e modelo hidrodinâmico EXP1 (vermelho)

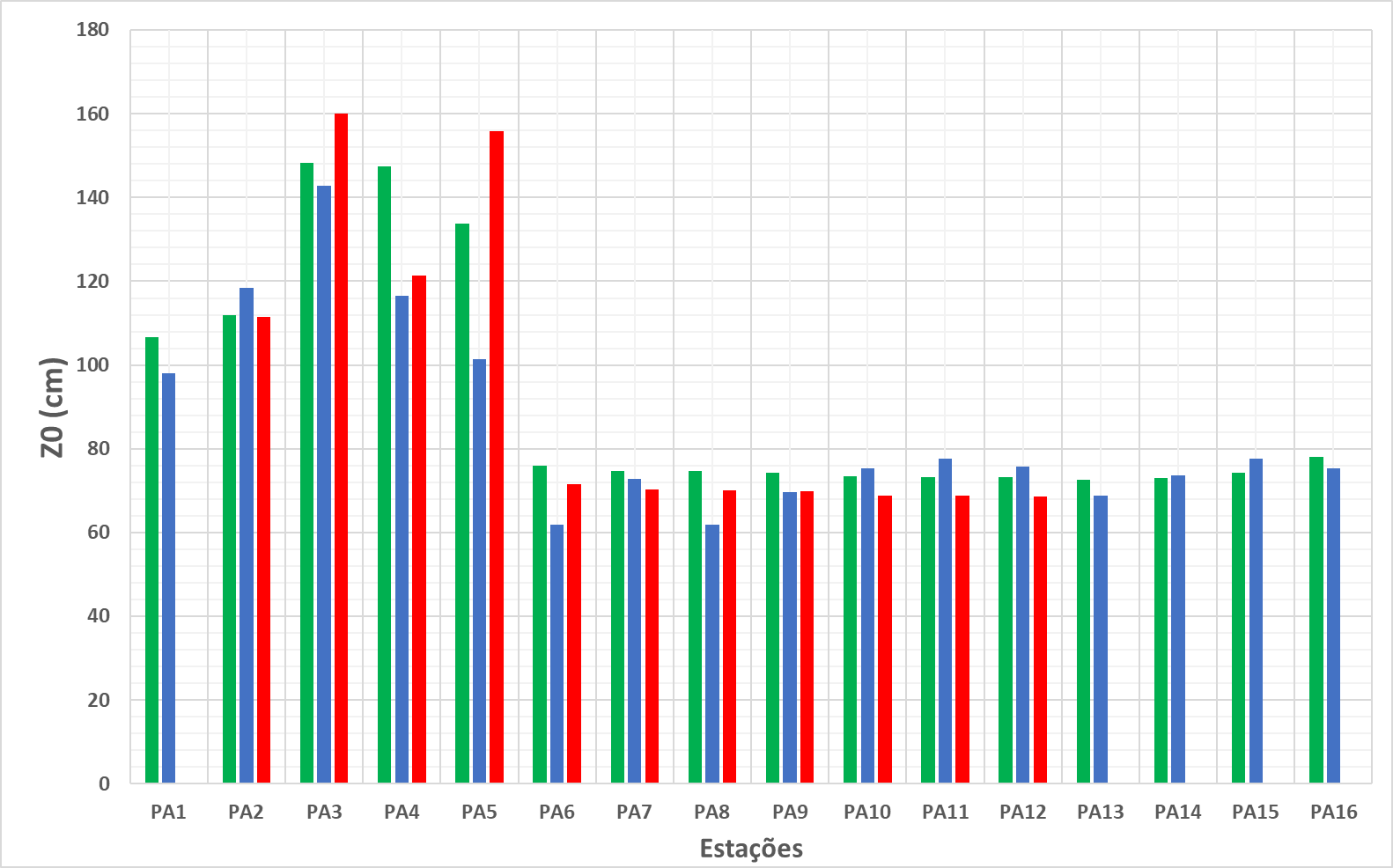


Figura 5 - Parâmetro Z0 na região costeira (Figura 1) comparando dados (azul), modelo global FES2014 (verde) e modelo hidrodinâmico EXP1 (vermelho).

Visando complementar a caracterização da maré foram geradas as cartas cotidais de fase e amplitude das componentes semidiurnas, diurnas e de águas rasas com base nos dados do modelo global FES2014. A análise realizada mostrou que as componentes astronômicas mais importantes na região são M2, S2, N2, K2, O1 e K1, mostrando que a maré na região em estudo é predominantemente semidiurna e se propaga de sul para norte. Na Figura 6 são mostradas as amplitude e fase da principal componente de maré na região M2. As componentes M2, S2, N2, K2, O1 e K1 apresentam um padrão de variação espacial da amplitude similar ao observado para o parâmetro Z0. Em todos os casos houve um aumento progressivo da amplitude de sul para norte entre Guarapari e a foz do rio Doce e um aumento da amplitude das componentes na região do Banco de Abrolhos.

Os valores das amplitudes das componentes semidiurnas variaram entre 40 a 90cm para M2, 25 e 40cm para S2, 8 e 14cm para N2 e 6 e 12cm para K2. As outras componentes semidiurnas tiveram amplitudes menores a 4,5% do valor máximo da M2 observada em Abrolhos (~90cm). Aproximadamente ~60% da variação no valor do Z0 está associado ao comportamento da M2. No caso das componentes diurnas os valores da amplitude variaram para O1 entre 9 e 10cm e para a K1 entre 4 a 6cm.

As cartas cotidais de fase das componentes M2, S2, K2, O1 e K1 também apresentaram padrão similar. Na Figura 6 é observado como a maré tem um padrão de propagação paralelo à costa, de sul para norte. Na região de Abrolhos, observa-se uma modificação no padrão da fase das 5 componentes principais. A N2, por sua vez, apresentou um padrão de propagação diferenciado com sentido de deslocamento zonal (de leste para oeste) ao sul da foz do Rio Doce e deslocamento meridional de sul para norte ao norte da foz do Rio Doce.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Figura 6 - Mapas cotidais de amplitude em cm (esquerda) e fase em graus UTC (direita) da componente astronômica semidiurna M2, a partir de informações do modelo global FES2014.

Na Figura 7 são mostradas comparações da amplitude e fase obtidos com as simulações em 4 pontos com medições de níveis, dois fundeios, F1 e F4, na estação Conceição da Barra (PA5) e na estação #506 (Teixeira et al., 2013) (Figura 1). A apesar de só considerar a maré astronômica como forçante no EXP1 foi possível representar quase o 100 % da variabilidade do nível do mar. É possível observar no ponto F1 as alturas variaram de 60 cm, na quadratura, a 180 cm, na sizígia. Já para o ponto F4, as alturas variaram de 100 cm, na quadratura, a 210 cm, na sizígia. Na região mais ao norte, as alturas de maré variaram de 120 cm (quadratura) a 330 cm (sizígia). As amplitudes e fases simuladas mostram a mesma tendência, porém, na região norte as amplitudes da componente M2 estão sendo sobre-estimadas. Possivelmente como consequência, ao longo de toda a região pode ser observada uma subestimação nas amplitudes das componentes de águas rasas M4 e MS4.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

Figura 7 - Histogramas de amplitudes (esquerda) e fase (direita) para as estações F1, F4, PA5 e #506 (Figura 1) comparando dados (azul) e resultados do modelo hidrodinâmico (EXP1) (vermelho)

**Assimetria da maré**

Como salientado, uma característica importante da maré para o transporte de sedimentos é sua assimetria. Em regimes de maré semidiurno, a assimetria de níveis e correntes de maré está relacionada com a presença de harmônicos de águas rasas na faixa de frequência de 4 ciclos por dia (Pugh & Wodworth, 2014), como a componente M4.

Em relação às componentes de águas rasas no domínio de interesse, a M4 (Figura 8) e a MN4 foram as componentes mais expressivas com amplitudes variando entre 1 a 5 cm. Ao norte do Rio Doce, seguindo o comportamento das componentes semidiurnas e diurnas, ambas componentes apresentaram as máximas amplitudes, acima de 5 cm. As outras componentes de águas rasas disponíveis na base global FES2014 (N4, MS4, S4, M6 e M8) apresentaram valores de amplitude < 0,7 cm, exceto a MS4 com amplitude máxima de 1,5cm. Todas as quartidiurnas apresentaram amplificação da onda na região de Abrolhos.

Após a análise harmônica dos dados disponíveis de maré, foram calculados os principais indicadores de assimetria apresentados na metodologia e na Tabela 1.

Na região localizada ao sul do rio Doce (fundeio F1, por exemplo) são observadas menores amplitudes e assimetria positiva da onda, caracterizada pela relação de fase RF=108; razão de amplitude RA=0,02 e parâmetro γ2=0.07. Já ao norte do rio Doce (fundeio F4, por exemplo), pode ser observada uma mudança, adquirindo assimetria negativa com valores de RF=330; RA=0,03 e γ2=-0.06. Nesta região, mais ao largo, é observada uma fraca assimetria da onda, com valores da razão de amplitude entre 2 e 3 %, o que caracteriza ondas levemente assimétricas ou quase simétricas. Já nas estações costeiras da porção norte, como por exemplo em Conceição da Barra (PA5) observa-se uma amplificação da onda e assimetria positiva, caracterizada por RF=100; RA=0,08 e γ2=0.32. A Figura 9 mostra esses dois exemplos. A assimetria positiva (por exemplo na estação Conceição da Barra) se traduz em menores tempos de subida, em torno de 5 horas e meia, comparados com os de descida.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Figura 8 - Cartas cotidais de amplitude em cm (painel da esquerda) e fase em graus UTC (painel da direita) da componente de águas rasas M4.

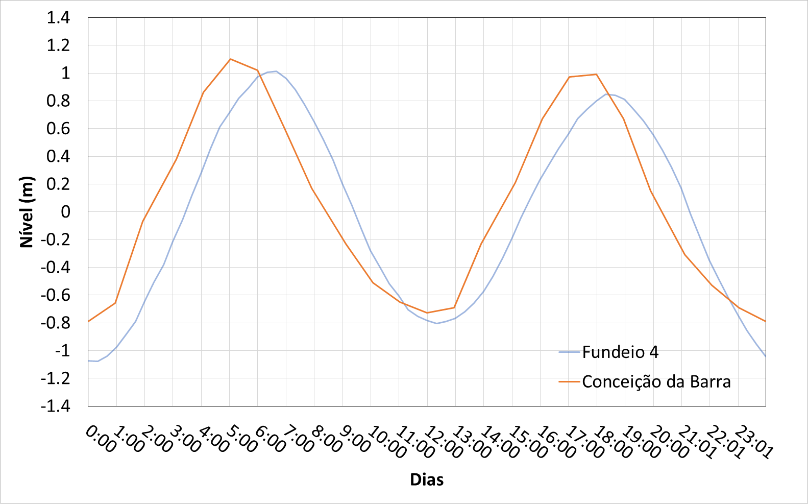


Figura 9 - Registros de maré (sizígia) das séries de níveis medidas. Assimetria negativa no Fundeio 4 e assimetria positiva na Estação de Conceição da Barra (PA5).

A variação espacial do parâmetro Razão de Amplitudes M4/M2 (RA), calculado com os dados da base FES2014 já mostra um comportamento diferenciado da assimetria entre as regiões norte e sul. O valor do parâmetro RA variou entre 0,01 e 0,05 na região de Abrolhos e na região sul do domínio (entre a foz do Rio Doce e Guarapari) os valores foram menores a 0,01, com um leve incremento ao sul de Guarapari (0,02<RA<0,03). Valores de RA menores que 0,1 caracterizam um comportamento da maré levemente não linear, o que ocorre em toda a região de interesse.

Na Figura 10 e Figura 11 pode ser observado o comportamento do parâmetro para o plataforma e a região costeira, respectivamente. Pode ser observado que o modelo consegue representar a tendência de evolução latitudinal do parâmetro, porém subestimando os valores. Essa subestimação pode ser decorrente da sobrestimação das amplitudes da componente M2 e a subestimação na geração da M4. Novos ajustes na modelagem (batimetria e rugosidade) estão sendo realizados visando uma melhor representação desses aspectos da maré.

A relação de fase (RF), obtida a partir dos dados do FES2014 (Figura 12), mostrou um padrão de assimetria positiva (relação de fase entre 0 e 180 graus) ao sul e um padrão de assimetria negativa (entre 180 e 360 graus) ao norte. Os valores na plataforma (Figura 13), são consistentes com os dados das estações ao largo, na plataforma continental, por exemplo os fundeios F1, F2 e F3 mostraram assimetria positiva, e no fundeio F4 e a estação Abrolhos assimetria negativa. Quando observado o padrão da relação de fase ao longo da costa (Figura 14), a análise dos dados mostra uma inversão na assimetria. Nessa região, a assimetria fica negativa na região sul e centro (entre as estações PA6 e PA16) e positiva na região do banco de Abrolhos (aproximadamente entre PA2 e PA5). Ambos os modelos (FES2014 e EXP1) não representam esse padrão. No caso do FES2014 esse comportamento é esperado devido a que sua resolução espacial não permitiria uma correta representação do fundo e da geração das componentes de águas rasas na região costeira. Já no modelo hidrodinâmico (EXP1) está relacionado com a subestimação já apontada das componentes de águas rasas. Desta forma, a relação de fase que chega na costa ainda é governada pela assimetria externa (da condição de contorno advinda do FES2014) e não consegue ser revertida dentro do domínio.

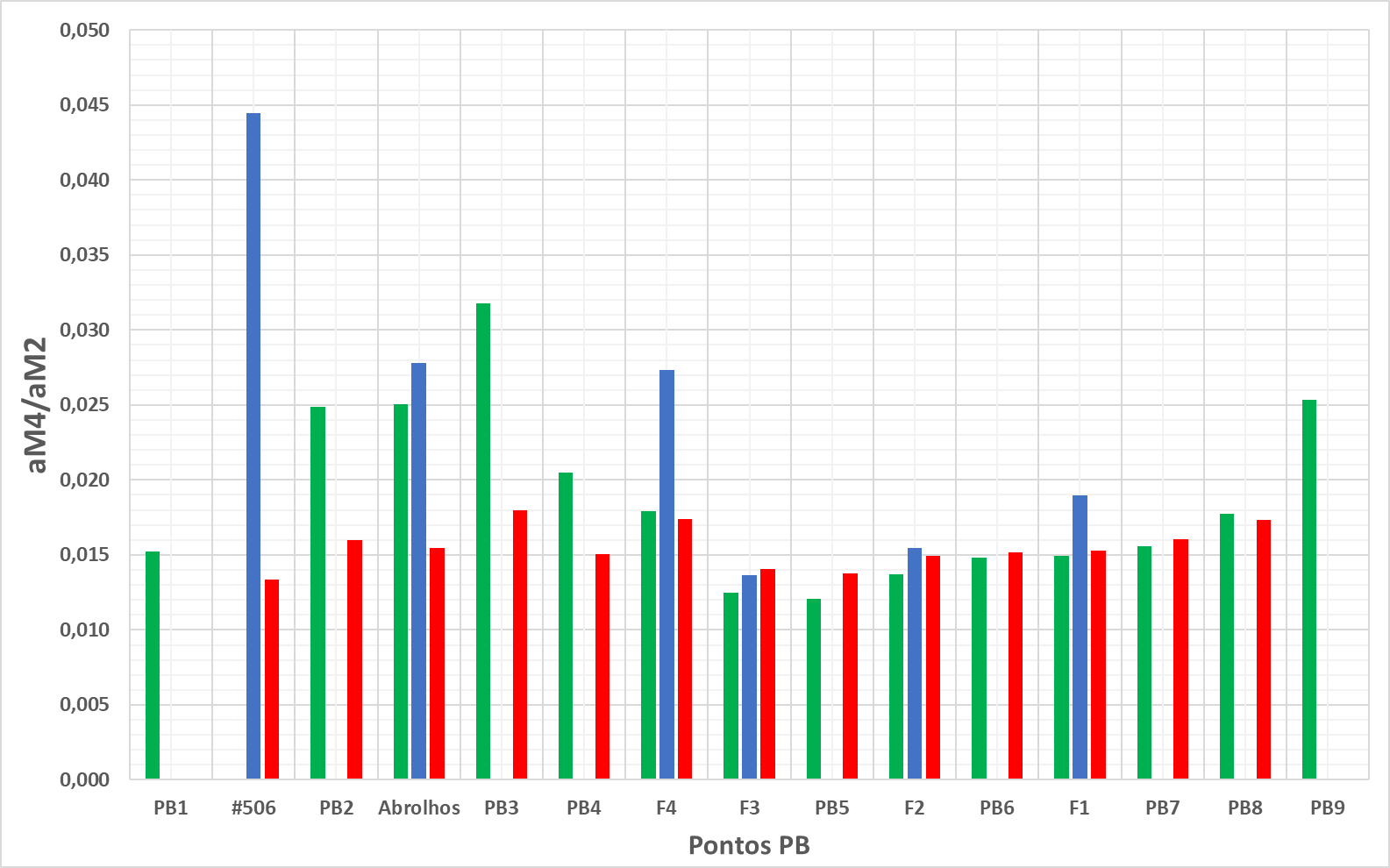


Figura 10 - Parâmetro Razão de Amplitudes (RA) calculado para os pontos da plataforma continental (Figura 1), comparando dados (azul), modelo global FES2014 (verde) e modelo hidrodinâmico EXP1 (vermelho)

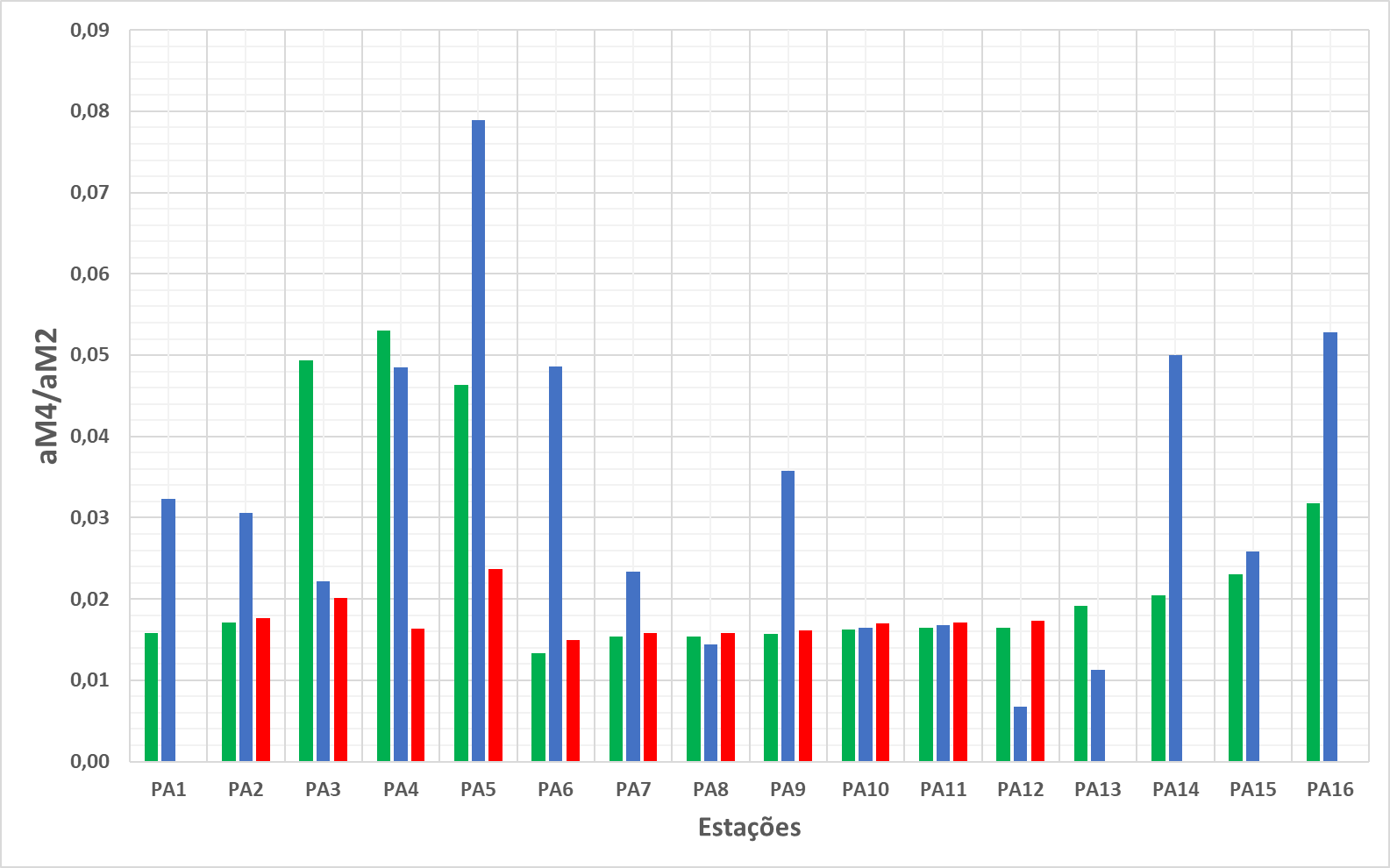


Figura 11 - Parâmetro Razão de Amplitudes (RA) calculado para os pontos da costa (Figura 1), comparando dados (azul), modelo global FES2014 (verde) e modelo hidrodinâmico EXP1 (vermelho)

A variação espacial do parâmetro γ2 confirma o que já foi apresentado pela razão de amplitudes e relação de fases. Na plataforma apresentou um padrão diferenciado ao sul e ao norte da foz do Rio Doce. Ao Sul os valores de γ2 variaram entre 0,15 a 0,05 diminuindo para norte. Já ao norte do Rio Doce, na região rasa de Abrolhos, γ2 apresentou um incremento em valor absoluto no sentido da Leste-Oeste com valores variando de 0,05 talude para a -0,15 na costa. Na costa o padrão de γ2 obtido das medições apresenta uma inversão que não consegue ainda ser representada pelo modelo.

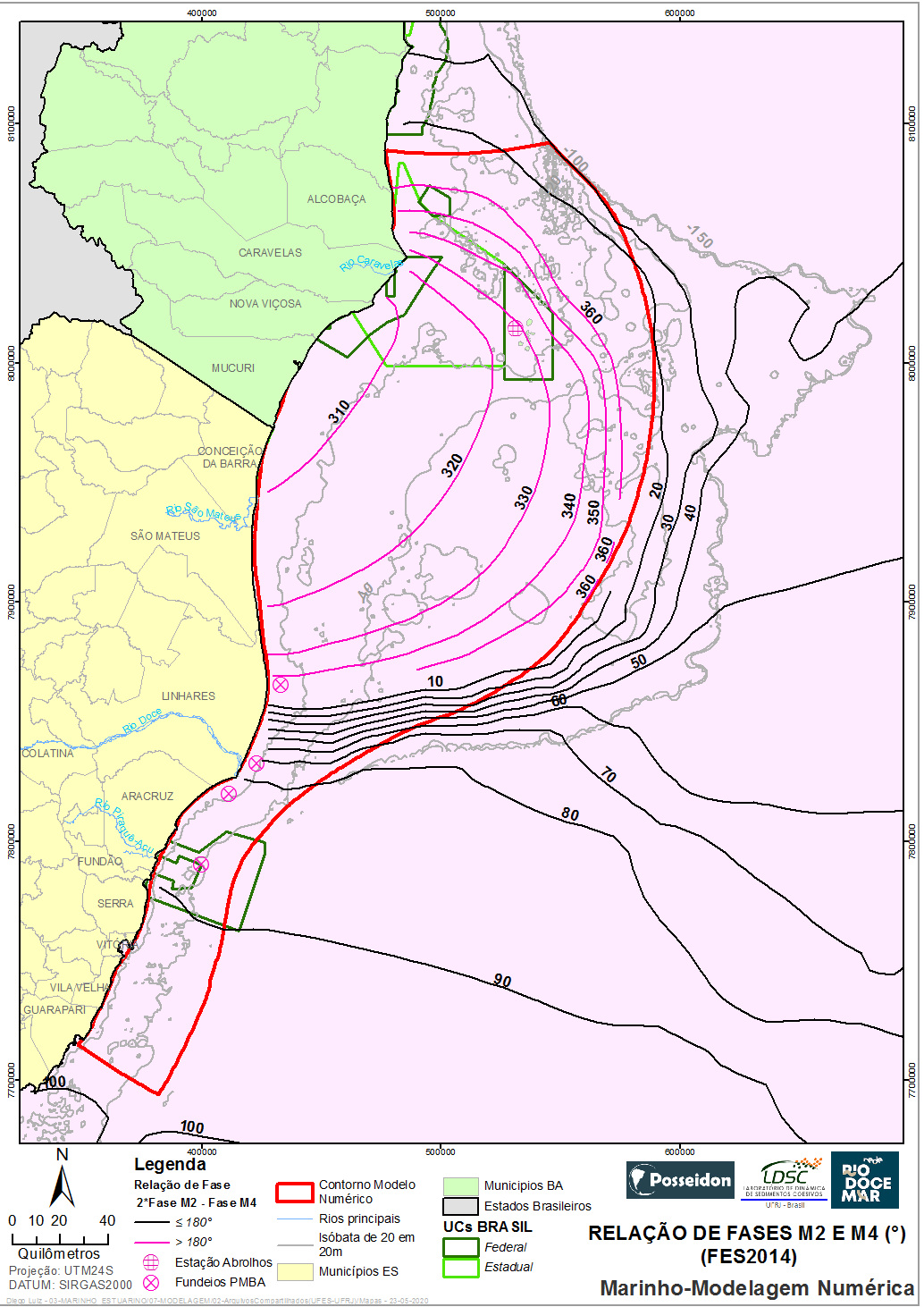


Figura 12 - Variação espacial do Parâmetro Relação de Fase (entre as componentes M2 e M4) calculado com base nos dados do FES2014, destacando as regiões na plataforma continental com assimetrias positivas (linha rosa) e negativas (linha preta)

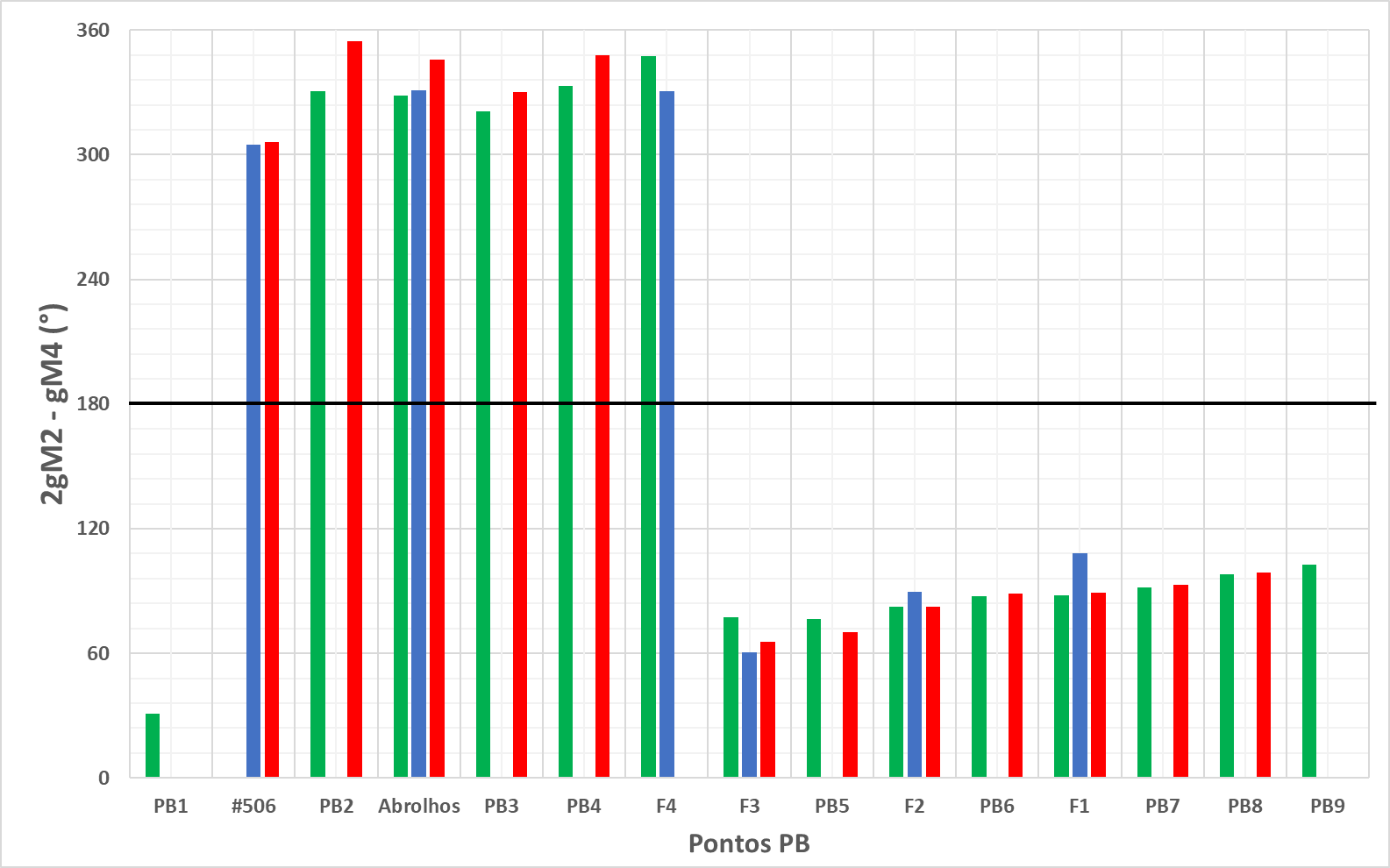


Figura 13 - Parâmetro Relação de Fase (RF) calculado para os pontos localizados na plataforma continental (Figura 1), comparando dados (azul), modelo global FES2014 (verde) e modelo hidrodinâmico EXP1 (vermelho). Acima da linha preta assimetria negativa.

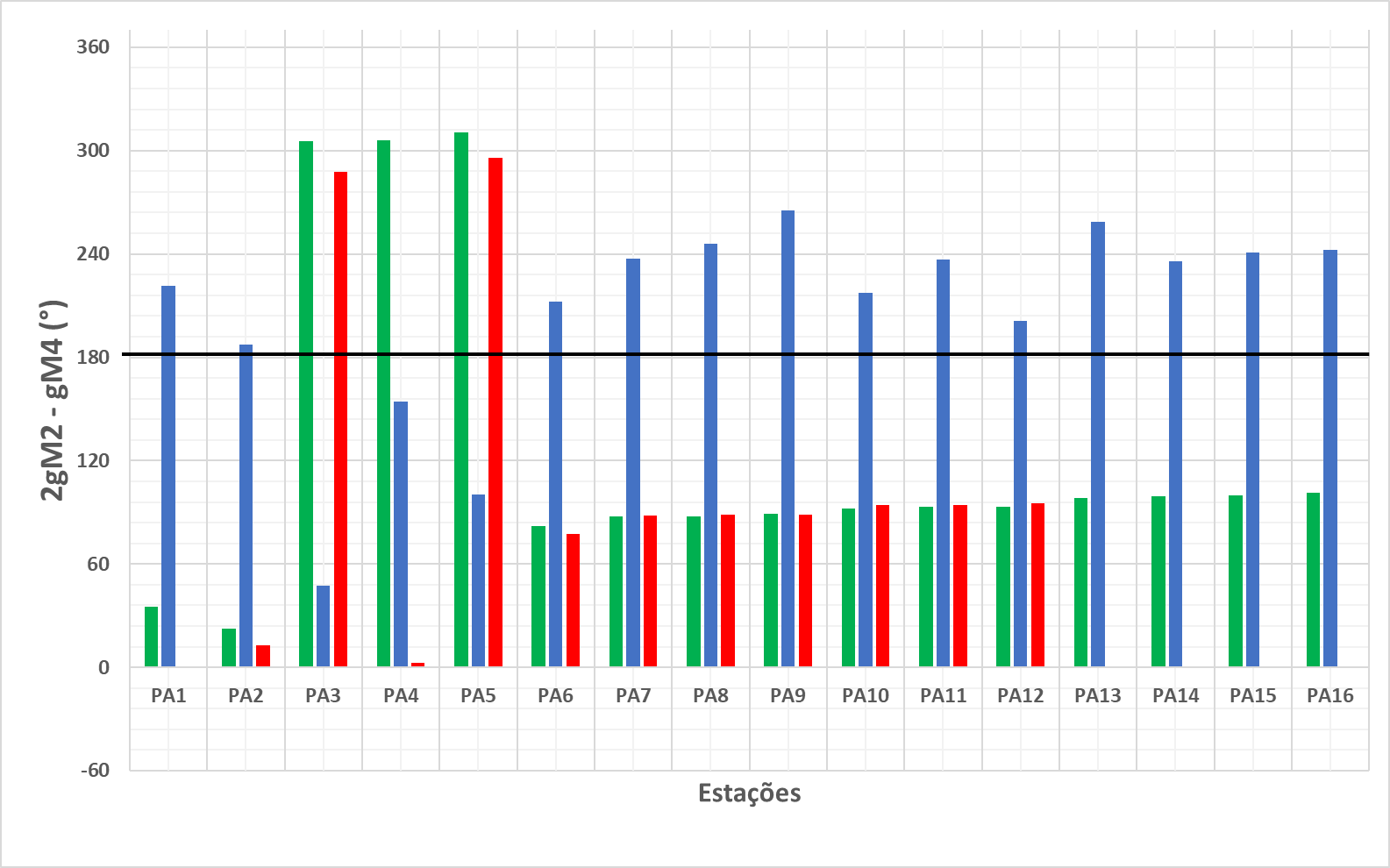


Figura 14 - Parâmetro Relação de Fase (RF) calculado para os pontos ao longo da costa (Figura 1), comparando dados (azul), modelo global FES2014 (verde) e modelo hidrodinâmico EXP1 (vermelho). Acima da linha preta assimetria negativa.

**Correntes de maré**

Na Figura 15 são mostradas séries de correntes obtidas com o modelo hidrodinâmico (EXP1), em pontos da plataforma do sul para o norte (Figura 1) e na Figura 16 uma representação espacial, colocando em evidência as elipses de maré.

Na região ao sul do Rio doce (exemplificado pelos pontos PB8 e F1) pode ser observado um fraco sinal de maré nas correntes, apresentando baixas magnitudes, não superando 0,1 m/s mesmo durante as marés de sizígia. Ao norte da desembocadura do Rio Doce, nos pontos F4 e PB6, as correntes de maré se intensificam, com magnitudes chegando a aproximadamente 0,6 m/s nas sizígias. Viégas (2006) atribui essa intensificação das correntes ao estreitamento da plataforma nessa região.

Quando comparados os resultados do EXP1 com as análises realizados por Teixeira et al. (2013) nos pontos #106 e #506 pode ser indicada uma subestimação nas magnitudes máximas das correntes modeladas. Os valores informados por Teixeira et al. (2013) foram de 0,93 m/s e 0,66 m/s, respectivamente. Porém, os valores próximos aos obtidos no EXP1, que só considera maré astronômica como forçante, indicariam uma forte influência da maré nas correntes nessa região.

Da combinação das informações de níveis e correntes, surge mais claramente o comportamento da maré, da sua propagação ao sul do Rio Doce, alcançando o embaiamento na região norte, acompanhado da extensão da plataforma continental, onde é localizado o banco de Abrolhos. A amplificação da maré, que alcança o máximo em torno da estação de Conceição da Barra (PA5), gera uma intensificação das correntes ao sul e ao norte, na direção do ápice da maré. Mudanças no caráter da maré (de estacionária para progressiva e vice-versa) acompanham essa transformação. Intensas correntes de maré são assim geradas nos contornos sul e norte do embaiamento, com componentes paralelas à costa bem mais significativas, como ilustrado na Figura 16 pelas estações F4 e PB4 ao sul e PB2 e #106 ao norte. Na região do banco dos Abrolhos, a presença das ilhas e recifes, propiciam um padrão mais complexo de correntes, que se desenvolvem numa rede de canais.

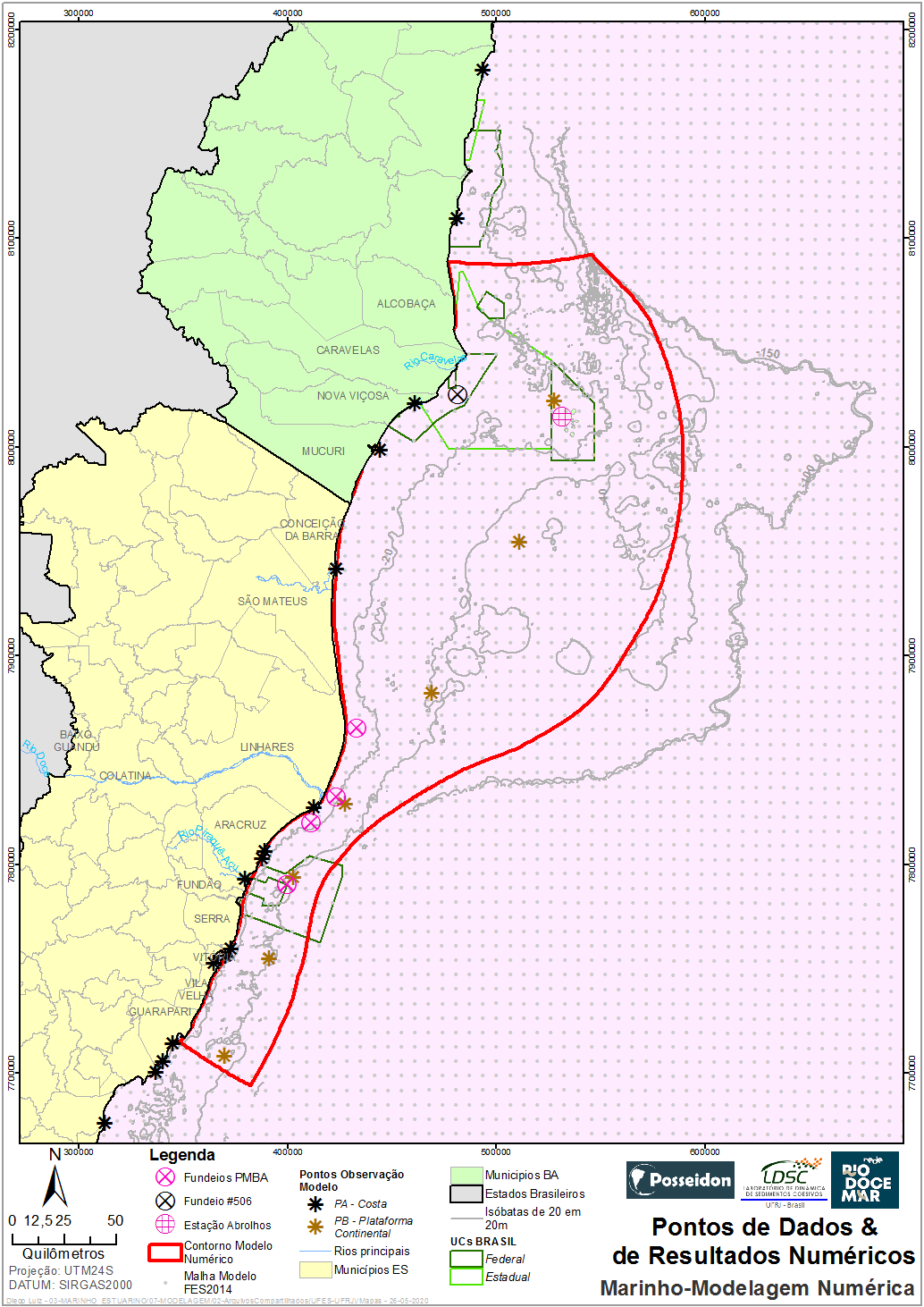
Visando comparar as series de correntes medidas e simuladas foram calculados os espectros de energia. Das correntes medidas nos fundeios F1 e F4 das medições da RRDM (RRDM, 2019b), foram consideradas as velocidades em superfície e fundo, sendo que o modelo hidrodinâmico, na versão atual (2DH), só calcula a velocidade média na vertical (EXP1). Nas Figura 17 e Figura 18 são mostrados os espectros para os pontos F1 e F4, respectivamente. Como esperado, a comparação dos espectros mostrou que só parte da variabilidade das correntes medidas pode ser explicada pela maré.

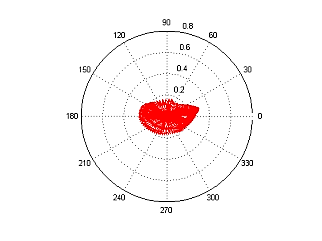
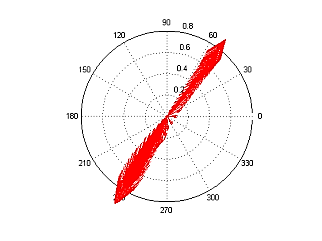
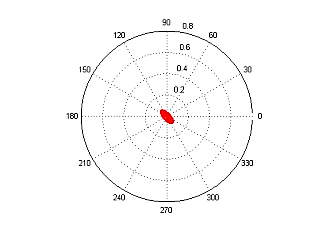
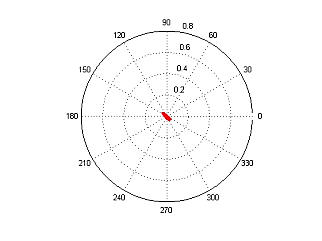
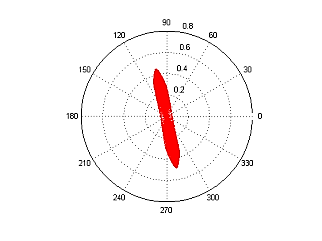
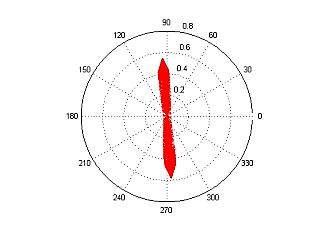
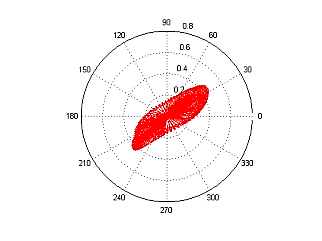
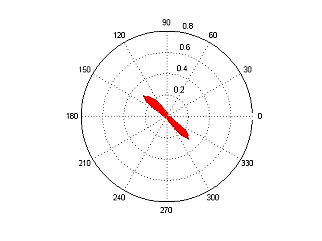
O espectro da componente norte/sul medida em superfície apresentou (para ambos os fundeios) um marcado pico próximo de um ciclo por dia. Esse pico, possivelmente associado ao vento, apresentou-se com menor energia na componente leste/oeste medida em superfície e nas velocidades medidas no fundo. Esse pico diurno esteve ausente nas velocidades simuladas no EXP1, forçado unicamente com maré. No fundeio F1, a energia deste pico diurno, na componente norte/sul em superfície, foi duas ordens de grandeza maior que a do pico da maré semidiurna (2 ciclos por dia). Já no fundeio F4, a energia na faixa semidiurna cresce e se torna da mesma ordem que à diurna.

Nos dados do fundeio F4 pode ser identificado o crescimento dos harmônicos de alta frequência (3, 4 e 6 ciclos), relacionados com componentes de maré de águas rasas. A ausência de correntes nas componentes terdiurnas no modelo (EXP1) pode estar relacionado à subestimação das frequências diurnas. As frequências de 4 e 6 ciclos são representadas, mas com energia inferior aos dados. Esse comportamento seria esperado, vista a subestimação dessas componentes nos níveis d’água, discutido anteriormente.

|  |
| --- |
|  |
|  |

Figura 15 - Componentes leste/oeste (azul) e norte/sul (verde) das séries de correntes do EXP1. Observar mudança de escala nas duas primeiras estações (PB8 e F1).





**F4**

**08**

**F1**

**04**

**03**

**02**

**#106**

**#506**

Figura 16 - Elipses de correntes do EXP1 (para dois ciclos de maré durante maré de sizígia). Escala de velocidade (círculo maior) 0,8 m/s.

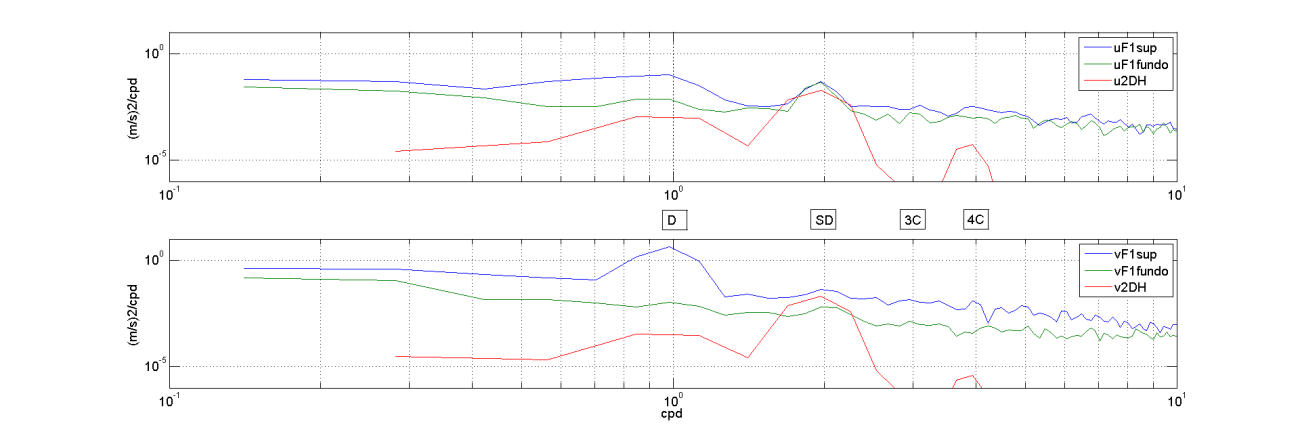


Figura 17 - Espectro de densidade de energia das séries de correntes do Fundeio F1 (H=44m), componentes u (superior) e v (inferior). Os dados são mostrados em superfície (~0,16H) e fundo (~0,95H), enquanto os resultados do EXP1 são 2DH (integrados na vertical). Período de análise: 14/12/2018-15/01/2019. Frequências em destaque: D (diurna), SD (semidiurna), 3C (terdiurna), 4C (quartidiurna).

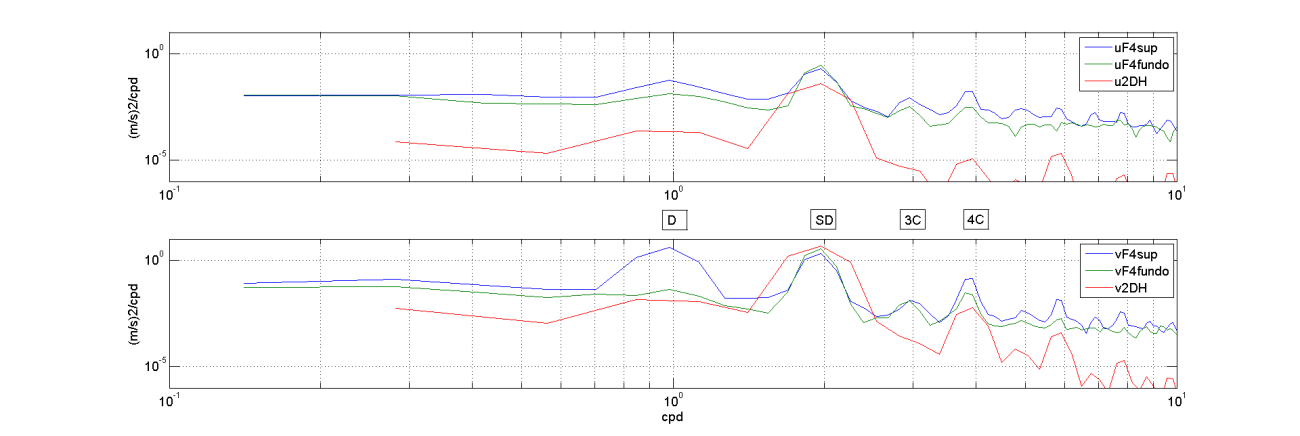


Figura 18 - Espectro de densidade de energia das séries de correntes do Fundeio 4 (H=18m), componentes u (superior) e v (inferior). Os dados são mostrados em superfície (~0,16H) e fundo (~0,95H), enquanto que os resultados do EXP1 são 2DH (integrados na vertical). Período de análise: 14/12/2018-15/01/2019. Frequências em destaque: D (diurna), SD (semidiurna), 3C (terdiurna), 4C (quartidiurna).

Finalmente, visando apresentar o efeito das correntes de maré no fundo é apresentado um mapa de distribuição de tensões na Figura 19. As zonas de maior tensão de fundo ocorrem nas duas áreas onde foi identificada a intensificação das correntes de maré, alimentando assim o aumento na amplitude da maré, na direção à costa (com ápice em torno da estação de Conceição da Barra), em torno de 50%.

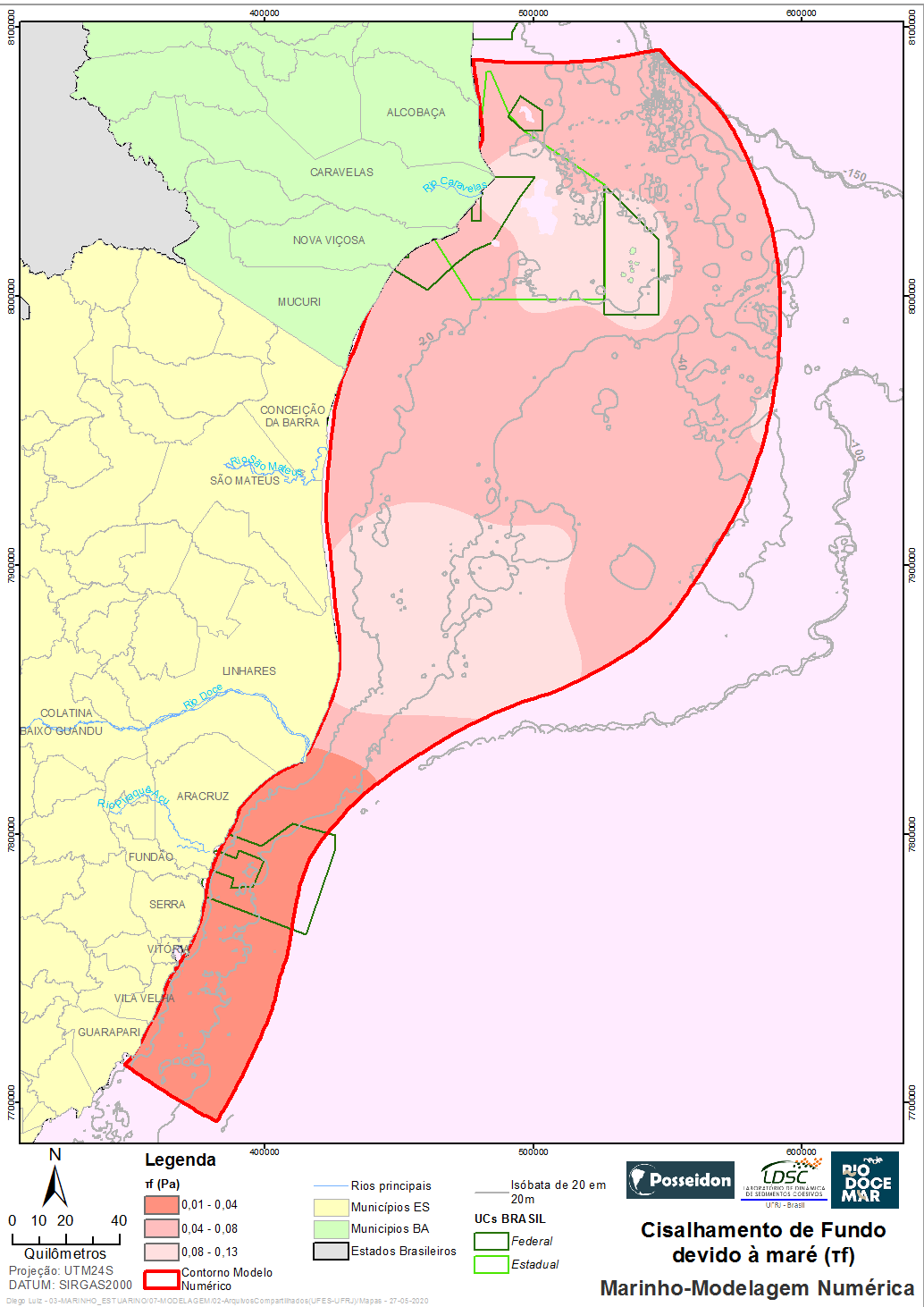


Figura 19 - Mapa da tensão de cisalhamento média de fundo devido à maré (EXP1). Escala em Pa.

**Simulação de ondas**

A fim de realizar uma análise preliminar do impacto das ondas na dinâmica da região, definiu-se 2 cenários para as simulações de ondas, um representativo de primavera/verão (EXP2) e um de outono/inverno (EXP3). A Figura 21 mostra a evolução de altura significativa (Hs) ao longo do domínio para o cenário de inverno (EXP3).

Os cenários de ondas foram definidos baseados nas análises apresentadas no Relatório Anual (RRDM, 2019b) e confirmados com as análises dos dados complementares dos fundeios da REDE, de outubro de 2019 a fevereiro de 2020. O mencionado relatório (RRDM, 2019b) na seção 2.3.6 faz uma detalhada análise dos dados de onda assim como um resumo no quadro 1 da página 105.

Na Figura 20 é mostrada a frequência de ocorrência de alturas significativas de onda, nos quatro fundeios, para as duas estações do ano. Destaca-se a estação F2 que registra ondas de menor altura tanto no verão como no inverno, quando comparada às outras, e a mudança na direção das ondas na estação F4.

|  |  |
| --- | --- |
| a) | e) |
|  |  |
| b) | f) |
|  |  |
| c) | g) |
|  |  |
| d) | h) |
|  |  |

Figura 20 - Distribuição de alturas significativas de ondas (Hs) em relação às direções de pico em F1, F2, F3 e F4 para o verão (a, b, c, d) e para o inverno (e, f, g, h). As cores representam as faixas de variação de valores de Hs (m).

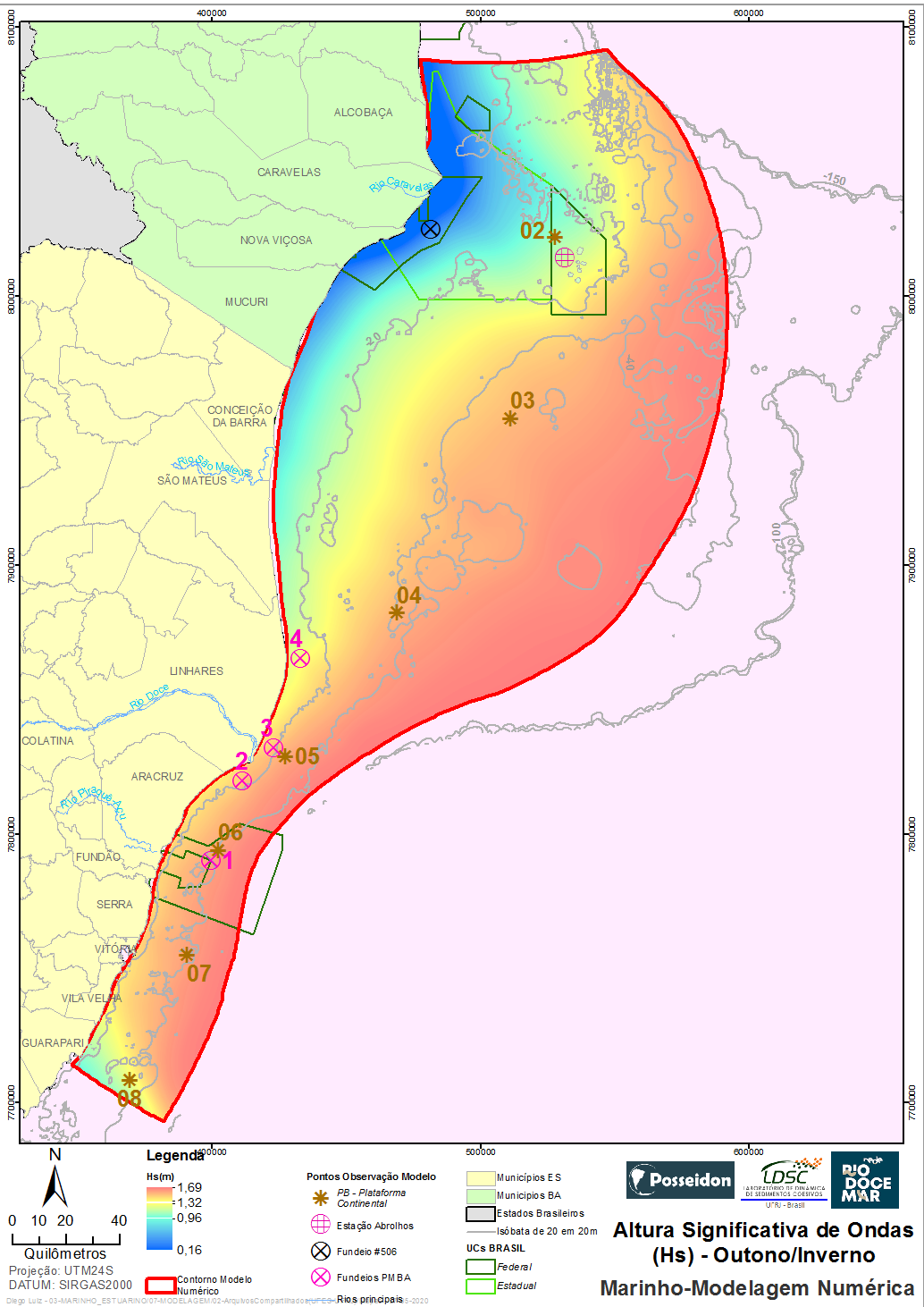


Figura 21 - Mapa de altura significativa de ondas para o cenário de outono/inverno (EXP3)

As diferenças observadas nas ondas nos fundeios podem ser explicadas pelas posições relativas de profundidade sobre a plataforma (sendo o fundeio F1 o mais profundo), e pela posição dos fundeios em relação às feições costeiras, em particular ao delta do rio Doce. A Tabela 3 mostra a relação de altura significativa da onda, com a onda incidente, para os locais dos quatro fundeios para os cenários simulados. Nessa simulação preliminar, é colocado em evidência o local mais abrigado às ondas em geral do fundeio F2, e do quadrante S-SE do fundeio F4, mostrado nos dados coletados (Figura 20).

Tabela 3. Relação de altura significativa com a onda incidente, para os cenários modelados de verão e inverno.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Primavera/Verão | Outono/Inverno |
| Estação | % Hs onda incidente | % Hs onda incidente |
| F1 | 94 | 94 |
| F2 | 75 | 88 |
| F3 | 83 | 89 |
| F4 | 79 | 81 |

**Discussão**

Assim, algumas evidências podem ser levantadas para serem investigadas visando a modelagem do transporte de sedimentos na região:

* Na região ao sul da foz do Rio Doce, região de micromaré, foi observada pouca influência das marés nas correntes;
* A energia ou influência da maré se torna mais importante ao norte da região de estudo, possivelmente como mecanismo dominante no transporte de sedimentos;
* Através da análise realizada dos níveis de maré foi identificado um complexo padrão de assimetrias, com mudanças latitudinais na região costeira. Na plataforma foi identificado um padrão de assimetria negativo ao Norte do Rio Doce e positivo ao sul. A análise dos dados de níveis maregráficos mostrou evidencias de inversão da assimetria na região mais próxima da costa;
* Próximo da costa, a assimetria positiva de níveis indicaria uma dominância de correntes de enchente em direção à costa;
* As tensões de fundo devidas à maré apresentam um máximo logo ao norte da foz do rio Doce. Uma dominância de enchente nas correntes de maré, significaria um transporte residual pela maré na direção norte. Essa hipótese ainda precisa ser confirmada com a calibração do modelo.
* Visando aprimorar a representação da maré na região e com base nas análises realizadas estão em andamento algumas mudanças na configuração da modelagem, como por exemplo a revisão da batimetria para aprimorar a representação das feições de águas rasas ou a inclusão de uma rugosidade espacialmente variável de forma a representar feições locais como bancos de lama e recifes de coral. A inclusão do vento e a inclusão da dimensão vertical (3D) e forçantes baroclínicas completarão as condições para o início de simulações considerando todos os processos costeiros que dominam o transporte de sedimentos.

**Referências**

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. (2015). 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*, *63*, 125–136. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.07.003

Castro, B. M., Dottori, M., & Pereira, A. F. (2013). Subinertial and tidal currents on the Abrolhos Bank shelf. *Continental Shelf Research*, *70*, 3–12. https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.09.025

DHN. (2017). *NORMAS DA AUTORIDADE MARÍTIMA PARA LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS* (Vol. 12, Issue 1).

DHN. (2020). *Cartas Náuticas raster n° 22700, 1310, 1311 e 1312*. https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster

FEMAR. (2000). *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*.

Friedrichs, C. T., & Aubrey, D. G. (1988). Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *27*(5), 521–545. https://doi.org/10.1016/0272-7714(88)90082-0

Guo, L., Wang, Z. B., Townend, I., & He, Q. (2019). Quantification of Tidal Asymmetry and Its Nonstationary Variations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *124*(1), 773–787. https://doi.org/10.1029/2018JC014372

Nidzieko, N. J. (2010). Tidal asymmetry in estuaries with mixed semidiurnal/diurnal tides. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *115*(8), 1–13. https://doi.org/10.1029/2009JC005864

Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using TDE. *Computers and Geosciences*, *28*(8), 929–937. https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4

Pugh, D., & Wodworth, P. (2014). Sea-Level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes. In *Oceanography* (Issue 1). https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.24

RRDM. (2019a). *RT-08 RRDM/ABR19- Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I RELATÓRIO SEMESTRAL – SEÇÃO 3 : Anexo 5 - Manguezal: Vol. RT-Abr*.

RRDM. (2019b). *RT-19D RRDM/NOV19 Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I-Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente RELATÓRIO ANUAL: Anexo 3 Marinho – Modelagem Numérica RT-19D*.

Song, D., Wang, X. H., Kiss, A. E., & Bao, X. (2011). The contribution to tidal asymmetry by different combinations of tidal constituents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *116*(12), 1–12. https://doi.org/10.1029/2011JC007270

Speerb, P. E., & Aubrey, D. G. (1985). A Study of Non-linear Tidal Propagation in Shallow Inlet/Estuarine Systems Part II: Theory". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *21*(5691), 207–224.

Teixeira, C. E. P., Lessa, G. C., Cirano, M., & Lentini, C. A. D. (2013). The inner shelf circulation on the Abrolhos Bank, 18°S, Brazil. *Continental Shelf Research*, *70*, 13–26. https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.09.003

Viégas, N. J. de F. (2006). *MODELAGEM NUMÉRICA DAS MARÉS NO LITORAL DO ESPÍRITO SANTO*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO.