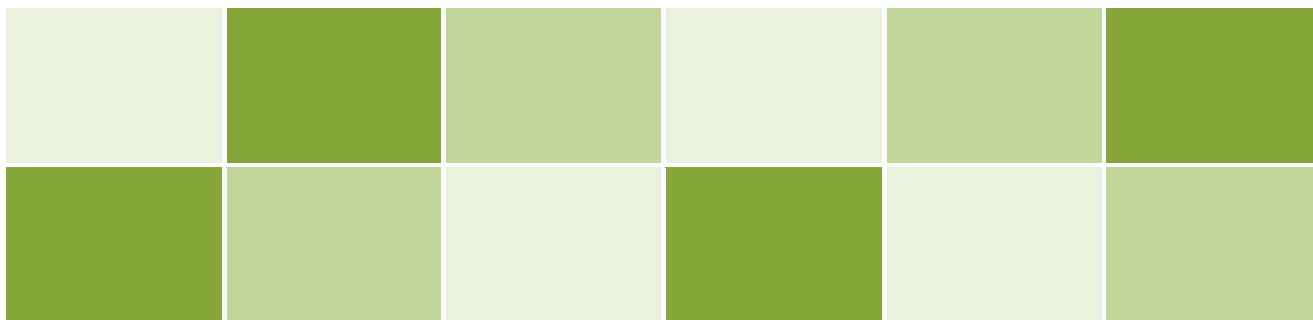


Modelagem Numérica de Pluma de Dragagem e Feição de Fundo do Bota-Fora do Terminal Portuário da Manabi Mineração em Linhares - ES



Relatório Técnico – RT-ECV-003/13
Revisão 01 – Outubro/13

Sumário Executivo

A CB&I foi solicitada pela Econservation Estudos e Projetos Ambientais a realizar um estudo de modelagem numérica da pluma de dragagem e evolução da feição de fundo do bota-fora do terminal portuário da Manabi Mineração (TP Manabi) em Linhares – ES localizado a 2500 m de distância da praia.

As simulações foram conduzidas com o modelo numérico Delft-3D. Desenvolvido pela Deltares (Delft Hydraulics - Holanda), considerado a ferramenta mais avançada na atualidade para simulações de ambientes costeiros, estuarinos e fluviais.

A partir dos volumes de dragagem calculados a partir do projeto da bacia de evolução e canal de acesso ao terminal, característica das dragas a serem utilizadas e área de bota-fora, foi desenvolvida uma esquematização do processo de dragagem e deposição no bota-fora para a simulação numérica. Esta considerou duas dragas com capacidade de 20.000 m³ atuando simultaneamente, sendo o tempo total para o processo de dragagem do canal de acesso ao TP Manabi calculado de aproximadamente 11 meses. O modelo foi iniciado em 1 de janeiro de 2011 e a simulação de dragagem foi iniciada 5 dias depois, dia 6 de janeiro – tempo de aquecimento do modelo – sendo finalizado o processo de dragagem no dia 24 de outubro às 20 horas com mais 5 dias sem operação – tempo para sedimentação do material em suspensão.

Foi utilizado um modelo tridimensional com 5 camadas verticais tipo sigma (com espessura da superfície para o fundo de 20, 35, 20, 15 e 10% da profundidade local) e foram considerados os processos de: 1) ressuspensão: 120 minutos de ressuspensão (correspondente a 5% da taxa de dragagem) de sedimentos na camada próxima ao fundo; 2) *overflow* + ressuspensão: 30 minutos de ressuspensão do material dragado na camada próxima ao fundo e *overflow* (água + sedimentos coesivos) despejados na camada superficial do modelo e; 3) despejo: 2 minutos em que todo o conteúdo da cisterna é depositado na área de bota-fora (na camada superficial).

Segundo resultados da simulação da evolução da feição de fundo do bota-fora do TP Manabi, nos primeiros 2,5 meses a feição de fundo chega a 1 m com um pequeno espalhamento no sentido Norte-Sul. Após 6 meses a feição inicia a evolução no sentido Norte-Sul em função das correntes longitudinais à costa que tendem a distribuir o sedimento depositado. Neste período a feição chega a 2,5 m. entre o sétimo e nono mês a feição se desenvolve chegando a 3,5 m. No final da simulação o modelo apresenta variações batimétricas na área de bota-fora de 4,4 m com acomodamento do sedimento nos sentidos Norte e Sul. Embora ocorra pequeno espalhamento do material de despejo para fora da área de bota-fora, a variação batimétrica externa à área delimitada é pequena, em geral inferior a 1 m. Considerando a posição do bota-fora, onde na sua porção mais rasa apresenta profundidades iniciais de 32 m (DHN), as áreas mais rasas após o final da dragagem do TP Manabi apresentará profundidades não inferiores a 27 m em toda a sua área, sem representar risco à navegação.

A partir das análises dos resultados de pluma de dragagem e bota-fora, pôde-se perceber a importância das correntes geradas por marés na área de estudo. Devido às profundidades reduzidas do Banco de Abrolhos (a Norte do TP Manabi) a onda de maré é amplificada, a diferença de nível entre a área do Banco e as regiões adjacentes gera correntes longitudinais à costa para Sul durante períodos de maré vazante e para Norte durante as marés enchentes (ao Sul do Banco). Em momentos de sizígia a dispersão da pluma se dá tanto para Norte quanto para Sul, em momentos de quadratura a dispersão da pluma é consideravelmente menor, sendo mais influenciada pelo vento atuante. As maiores concentrações de sedimento em suspensão ocorrem durante a sizígia, pois devido às fortes correntes (superiores a 1 m/s) os sedimentos se mantêm em suspensão. Em momentos de quadratura, quando as correntes são menos intensas, uma porção maior do material sedimenta, reduzindo a concentração de sedimentos na água. Devido à grande porcentagem de areias na composição do sedimento dragado (90%), o material despejado tende a depositar rapidamente. Apenas em momentos de correntes fortes, os sedimentos mais finos permanecem em suspensão, e a pluma se dispersa, contudo, com baixas concentrações.

Para determinar a distribuição da pluma de dragagem no período analisado, esta foi também analisada a partir da frequência de ocorrência de concentrações de sedimento na água (coluna d'água total, superfície e fundo) superiores a 0,1, 0,5, 1 e 5 mg/L. Os resultados para toda a coluna d'água, superfície e fundo apresentaram-se bastante semelhantes, indicando uma homogeneidade vertical da coluna d'água. Concentrações a 0,1 mg/L apresentam o contorno de 30% de ocorrência chegando à costa, entretanto, ao analisar concentrações superiores a 0,5 mg/L, percebe-se que 10% dos casos chegaram à costa. Concentrações superiores a 1 mg/L não chegam à costa com frequências superiores a 10%. Já concentrações superiores a 5 mg/L estão restritas à área de dragagem do canal e do bota-fora.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	9
2 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA E OCEANOGRÁFICA.....	11
2.1 REGIME DE VENTOS	11
2.2 MARÉS	15
2.2.1 BANCO DE ABROLHOS E PROPAGAÇÃO DA ONDA DE MARÉ	16
3 MODELO NUMÉRICO HIDRODINÂMICO	19
3.1 MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D-FLOW	19
3.2 MODELO MORFOLÓGICO DELFT3D-MOR.....	19
3.2.1 MODELAGEM DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS E MORFOLOGIA	20
3.3 GRADE NUMÉRICA	21
3.4 BATIMETRIA	22
3.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO	25
3.5.1 MARÉS	26
3.5.2 VAZÃO DO RIO DOCE.....	27
3.5.3 VENTOS	28
3.6 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	29
3.7 CAMPOS DE CORRENTES.....	32
3.8 SIMULAÇÃO DE PLUMA DE DRAGAGEM E FEIÇÃO DE FUNDO NO BOTA-FORA.....	37
3.8.1 ESQUEMATIZAÇÃO DA DRAGAGEM E BOTA-FORA.....	38
3.8.2 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS.....	40
3.9 EVOLUÇÃO DA FEIÇÃO DE FUNDO	40
3.10 PLUMA DE DRAGAGEM	45
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
5 REFERÊNCIAS.....	59

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Localização da área de estudo.</i>	10
<i>Figura 2: Localização do ponto (* branco) para o qual foi extraída a série temporal de ventos.</i>	12
<i>Figura 3 Rosa de ventos gerada a partir dos dados do modelo CFSR na coordenada 39°9'O, 19°25'S, para o período entre 2001 e 2012.</i>	13
<i>Figura 4 Constantes de Maré para a estação maregráfica de Barra do Rio Doce - ES.</i>	15
<i>Figura 5: Séries de maré reconstruídas a partir das principais constantes harmonicas da FEMAR para Mucuri e Barra do Rio Doce.</i>	16
<i>Figura 6: Calibração de nível do modelo do Banco de Abrolhos.</i>	17
<i>Figura 7: Variação espacial do nível de água na região do Banco de Abrolhos. (A) Situação de baixa-mar, (B) Situação de preamar. As linhas pretas representam os limites do Banco de Abrolhos e a grade hidrodinâmica utilizada no modelo Delft3D.</i>	17
<i>Figura 8: Dados medidos em campo de nível e componente V (Norte) da corrente. Exemplo da variação da corrente com período mareal, demonstrando que a corrente presente na região está associada principalmente à corrente de maré.</i>	18
<i>Figura 9: Fluxograma esquemático do modelo Delft3D-MOR utilizado neste trabalho.</i>	20
<i>Figura 10: Grade numérica criada para resolver os processos hidrodinâmicos da área de estudo.</i>	22
<i>Figura 11 Cartas náuticas utilizadas para digitalização dos valores de profundidade. Cartas (a) 70, (b) 1400, (c) 22800, (d) 1420.</i>	23
<i>Figura 12: Pontos de batimetria obtidos pelos levantamentos batimétricos efetuados nas proximidades do futuro terminal portuário – Linhares - ES. Batimetria composta por levantamento cedido pela empresa Econservation e levantamento efetuado pela empresa SHAW Brasil (dados referenciados verticalmente ao nível zero DHN).</i>	24
<i>Figura 13: Batimetria interpolada e projetada na grade numérica do modelo (dados referenciados verticalmente ao nível médio do mar –N.M.).</i>	25
<i>Figura 14: Base de ventos para o ano de 2011 representativos da região do empreendimento. Em destaque os meses simulados.</i>	28
<i>Figura 15: Rosa de ventos do período da simulação iniciada em janeiro de 2011 (esquerda) e do modelo iniciado em Julho de 2011 (direita).</i>	29
<i>Figura 16: Calibração do modelo hidrodinâmico correntes e nível.</i>	31

<i>Figura 17: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição inverno com vento Sudeste e maré enchente de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 18: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição inverno com vento Sudeste e maré vazante de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 19: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição verão com vento Nordeste e maré enchente de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 20: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição verão com vento Nordeste e maré vazante de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 21: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição inverno com vento Sul e maré vazante de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 22: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição verão com vento Norte e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 23: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição verão com vento Norte e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 24: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição verão com vento Norte e maré vazante de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 25 Detalhamento de um ciclo de dragagem considerado nas simulações numéricas da dispersão da pluma de sedimentos.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 26: Esquematização das séries de dragagem e despejo considerando ressuspensão no fundo, overflow e despejo na área de bota-fora.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 27: Evolução da feição de fundo do bota-fora do TP Manabi entre 1 de janeiro e 15 de março.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 28: Evolução da feição de fundo do bota-fora do TP Manabi entre 1 de abril e 15 de junho.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 29: Evolução da feição de fundo do bota-fora do TP Manabi entre 1 de julho e 15 de setembro.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 30: Evolução da feição de fundo do bota-fora do TP Manabi em 1 de outubro e ao final da simulação....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 31: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré enchente de sizígia e vento Sul.....</i>	<i>46</i>

<i>Figura 32: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré vazante de sizígia e vento Sul.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 33: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré enchente de sizígia e vento Nordeste.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 34: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré vazante de sizígia e vento Nordeste.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 35: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré enchente de quadratura e vento Sul.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 36: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré vazante de quadratura e vento Sul.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 37: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré enchente de quadratura e vento Nordeste.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 38: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré vazante de quadratura e vento Nordeste.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 39: Frequência de ocorrência de concentrações de pluma de dragagem e bota-fora superiores a 0,1 mg/L (esquerda) e 0,5 mg/L direita, em toda a coluna d'água.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 40: Frequência de ocorrência de concentrações de pluma de dragagem e bota-fora superiores a 1 mg/L (esquerda) e 5 mg/L direita, em toda a coluna d'água.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 41: Frequência de ocorrência de concentrações de pluma de dragagem e bota-fora superiores a 0,1 mg/L (esquerda) e 0,5 mg/L direita, na camada superficial.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 42: Frequência de ocorrência de concentrações de pluma de dragagem e bota-fora superiores a 1 mg/L (esquerda) e 5 mg/L direita, na camada superficial.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 43: Frequência de ocorrência de concentrações de pluma de dragagem e bota-fora superiores a 0,1 mg/L (esquerda) e 0,5 mg/L direita, na camada de fundo.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 44: Frequência de ocorrência de concentrações de pluma de dragagem e bota-fora superiores a 1 mg/L (esquerda) e 5 mg/L direita, na camada de fundo.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 45: Máximas concentrações da pluma de dragagem e bota-fora na camada superficial (esquerda) e de fundo (direita). São apresentadas concentrações superiores a 5 mg/L.....</i>	<i>56</i>

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre as estações maregráficas de Mucuri e Barra do rio Doce. Z0= Nível Médio, MHWS = nível médio das preamares de sizígia, MLWS = nível médio das baixa-mares de sizígia, MHWN = nível médio das preamares de quadratura, MLWN = nível médio das baixa-mares de quadratura.....	16
Tabela 2: Cartas náuticas utilizadas e suas escalas.	23
Tabela 3: Estações aplicadas no presente estudo.	27
Tabela 4: Médias mensais de longo período, desvio padrão e coeficiente de variação.	27
Tabela 5: Parâmetros de calibração do modelo hidrodinâmico.....	30
Tabela 6: Características das dragas, operação e sedimento.	38

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Diagrama de distribuição conjunta de intensidade e direção dos ventos (janeiro de 2001 a outubro de 2012) – convenção meteorológica.	14
Quadro 2: Componentes harmônicas de maré utilizadas.	26

1 Introdução

A CB&I foi solicitada pela Econservation Estudos e Projetos Ambientais a realizar um estudo de modelagem numérica da pluma de dragagem e evolução da feição de fundo do bota-fora do terminal portuário da Manabi Mineração (TP Manabi) em Linhares – ES com Terminal Portuário localizado a 2500 m de distância da praia.

1.1 DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na praia de Cacimbas, aproximadamente, 30 km ao Norte da desembocadura do Rio Doce, na cidade de Linhares, Espírito Santo (Figura 1). De acordo com ANA (2005), a bacia hidrográfica do rio Doce encontra-se inserida na Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste, possui uma área de drenagem de aproximadamente 83.069 km² e abrange partes dos territórios dos Estados de Minas Gerais (71.778 km²) e do Espírito Santo (11.291 km²).

Os ventos alísios, predominantes na região, geram correntes ao longo da costa de Norte para Sul, e em contrapartida, durante a ação das frentes frias, os ventos dominantes, provenientes de Sudeste/Sudoeste, geram correntes de Sul para Norte (Albino e Suguio, 2010).

A praia de Cacimbas, de acordo com PETROBRAS (2005), apresenta sedimentos heterogêneos com areia média a grossa na parte emersa e uma variação entre areia grossa a silte/argila na porção submersa mais afastada.

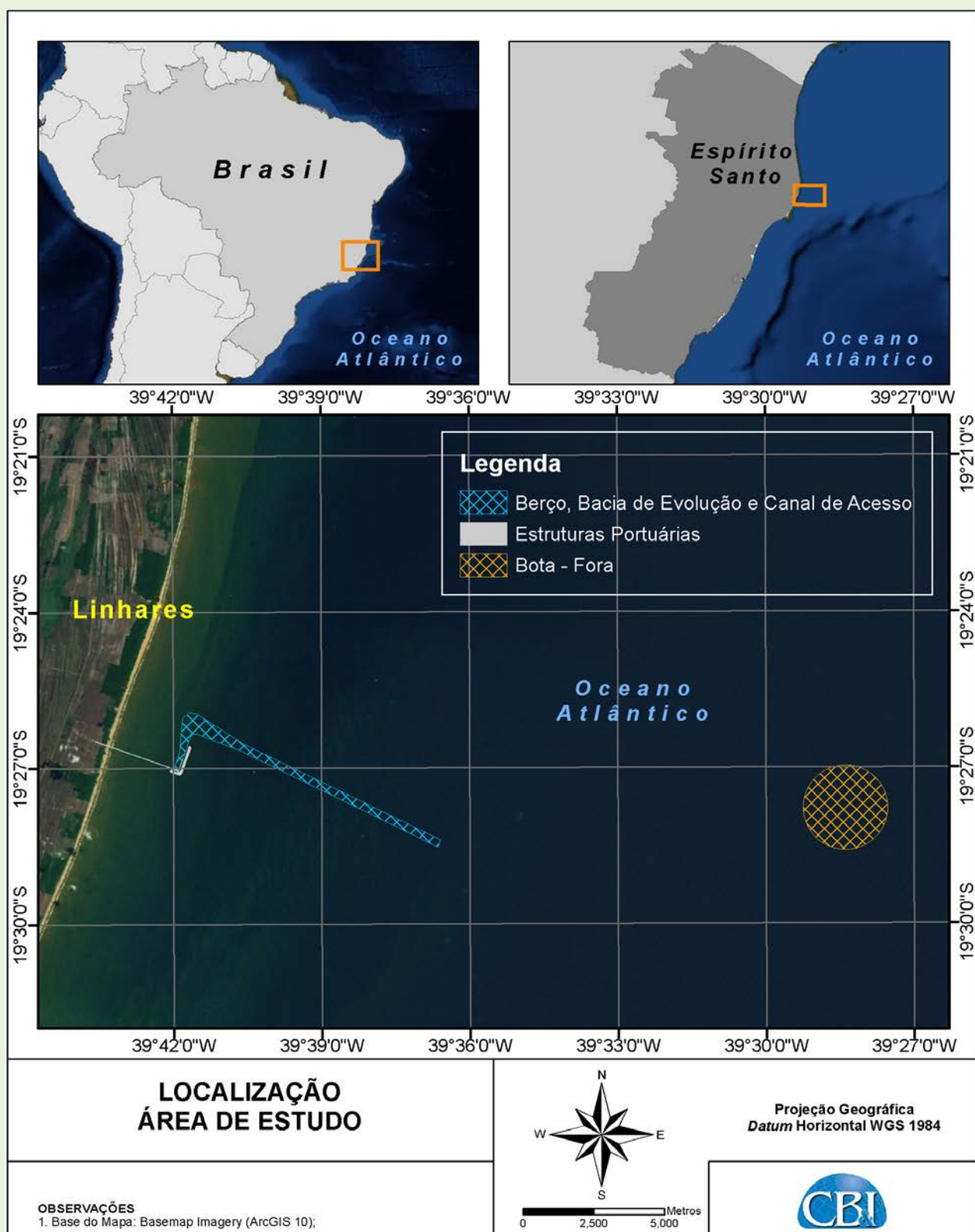


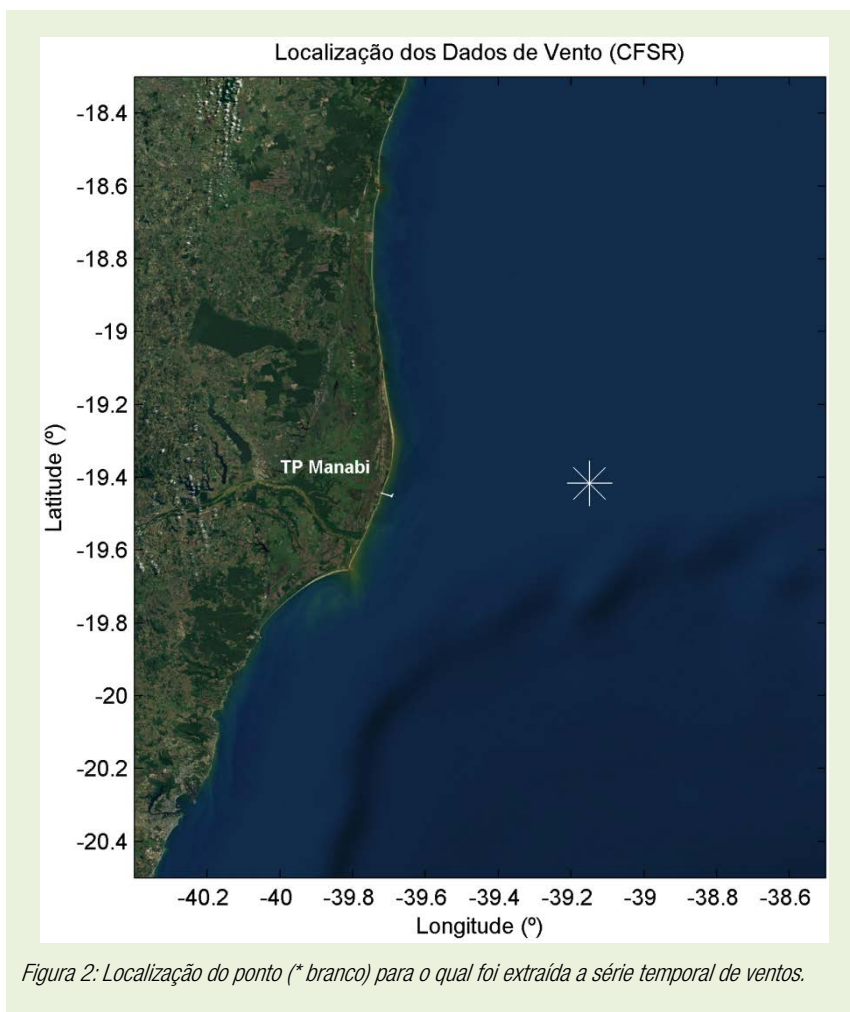
Figura 1: Localização da área de estudo.

2 Caracterização Meteorológica e Oceanográfica

Neste item é apresentada uma descrição das principais características meteorológicas e oceanográficas da área de estudo.

2.1 REGIME DE VENTOS

Para caracterização do regime de ventos foi utilizada uma série de dados proveniente do programa de reanálise do NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSR). Nesse programa são geradas bases de dados globais através da utilização combinada de resultados de modelos numéricos e dados observacionais provenientes de diversas fontes, tais como navios em rota, aviões, estações meteorológicas, satélites, entre outras. Foi analisada uma série extraída nas coordenadas geográficas 39°9'O, 19°25'S (*datum* vertical WGS-84 -Figura 2), para um período de 11 anos e 10 meses de dados (janeiro de 2001 a outubro de 2012), representativa da região Leste do estado do Espírito Santo. Na Figura 3 é apresentada a rosa dos ventos gerada a partir desses dados. O Quadro 1 apresenta os dados, onde os casos com maior frequência de ocorrência aparecem realçados. Analisando a rosa e o diagrama de ocorrência conjunta, percebe-se a grande frequência de ocorrência dos ventos de Nordeste (alísios) descritos por (Albino e Suguio, 2010).



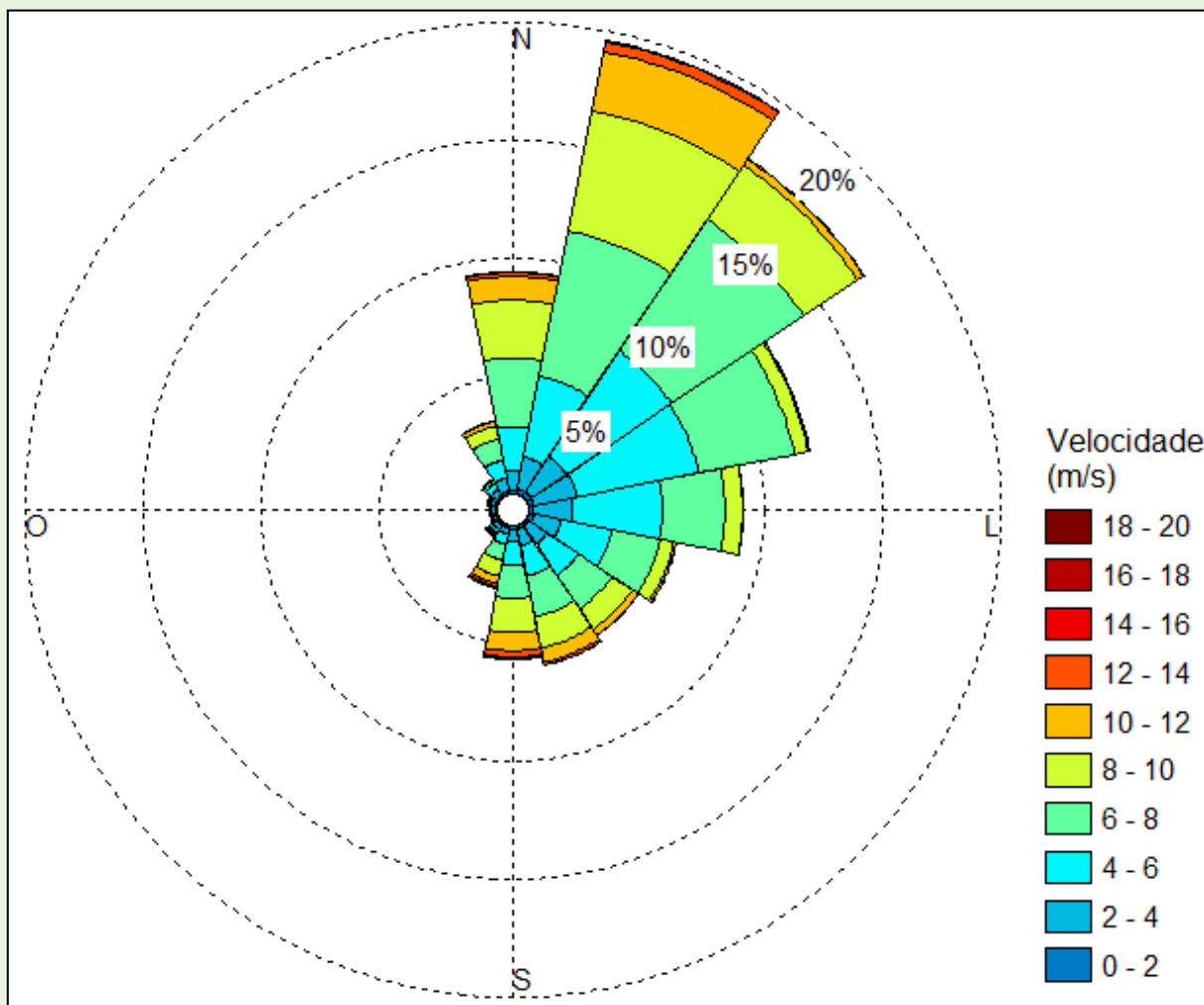
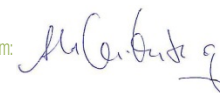


Figura 3 Rosa de ventos gerada a partir dos dados do modelo CFSR na coordenada 39°9'O, 19°25'S, para o período entre 2001 e 2012.

Quadro 1: Diagrama de distribuição conjunta de intensidade e direção dos ventos (janeiro de 2001 a outubro de 2012) – convenção meteorológica.

Vel \ Dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N. Casos	Freq.
0 - 2	34	43	45	40	33	42	24	28	34	21	19	15	14	17	18	28	455	2.65%
2 - 4	135	235	307	321	284	203	159	124	78	43	39	22	27	35	52	93	2157	12.57%
4 - 6	320	599	921	902	654	376	274	226	173	77	31	13	10	16	50	133	4775	27.82%
6 - 8	502	1076	1152	709	454	356	294	301	243	118	19	5		6	27	158	5420	31.58%
8 - 10	420	894	473	102	130	101	181	231	249	117	10		1	4	6	96	3015	17.56%
10 - 12	171	440	55	9	5	19	46	107	133	57	6			1		33	1082	6.30%
12 - 14	28	72	3	2		2	8	19	45	22	3					6	210	1.22%
14 - 16	5	10					1	2	13	12							43	0.25%
16 - 18	1								4	1							6	0.03%
18 - 20									1	1							2	0.01%
N. Casos	1616	3369	2956	2085	1560	1099	987	1038	973	469	127	55	52	79	153	547		
Freq.	9.41%	19.63%	17.22%	12.15%	9.09%	6.40%	5.75%	6.05%	5.67%	2.73%	0.74%	0.32%	0.30%	0.46%	0.89%	3.19%		
Vel. Med.	7.17	7.46	6.23	5.48	5.45	5.58	6.22	6.85	7.57	7.56	4.84	3.24	2.98	3.76	4.36	6.19		
Vel. Max.	16.88	15.34	12.60	13.11	10.64	12.54	14.14	15.25	18.43	18.45	12.77	6.63	8.01	10.36	9.84	13.32		




2.2 MARÉS

As marés em Linhares são classificadas como micro-marés, normalmente não chegando a atingir 2 m de altura. De acordo com a Fundação de Estudos do Mar (FEMAR, 2000), na Barra do Rio Doce a média das preamares e baixa-mares de sizígia são de 1,25 m e 0,09m respectivamente, acima do nível de referência, estando este a 0,67 m abaixo do nível médio.

A maré na estação Barra do Rio Doce, é caracterizada como semi-diurna, com número de forma $NF = 0,22$, definido a partir da seguinte relação entre componentes diurnas e semi-diurnas da maré: $(K1+O1)/(M2+S2)$. Assim, a maré na área de estudo é caracterizada por apresentar duas preamares e duas baixa-mares ao dia.

Na Figura 4 são apresentadas as constantes de maré para a estação maregráfica da Barra do Rio Doce.

Nome da Estação :		BARRA DO RIO DOCE - ES			
Localização :		No Pontal de Regência			
Organ. Responsável :		DHN			
Latitude :		19° 39,0' S	Longitude : 39 ° 50,0' W		
Período Analisado :		17/04/62 a 18/05/62		Nº de Componentes : 36	
Análise Harmônica :		Método Tidal Liverpool Institute.			
Classificação :		Maré Semidiurna..			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		III H 37 min	Nível Médio (Zo):		67 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		125 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		87 cm acima do NR
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		9 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		47 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi- amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	0,9	088
Ssa	-	-	N ₂	3,9	068
Mm	9,4	076	NU ₂	0,8	068
Mf	-	-	M ₂	39,1	094
MTM	-	-	L ₂	3,5	248
Msf	4,0	076	T ₂	1,1	103
Q ₁	1,8	072	S ₂	18,9	103
O ₁	8,5	095	K ₂	5,1	103
M ₁	0,1	358	MO ₃	0,3	030
P ₁	1,5	143	M ₃	0,5	125
K ₁	4,5	143	MK ₃	0,2	280
J ₁	0,7	306	MN ₄	0,3	067
OO ₁	1,0	069	M ₄	1,9	106
MNS ₂	-	-	SN ₄	0,6	197
2N ₂	0,5	042	MS ₄	1,5	117
Referências de Nível: RNs implantadas em pilares na praia, próximo à barra do rio.					
Obs: Outros Períodos : 30/09/60 a 14/10/60					

Figura 4 Constantes de Maré para a estação maregráfica de Barra do Rio Doce - ES.

Figura 4 Constantes de Maré para a estação maregráfica de Barra do Rio Doce - ES.

2.2.1 Banco De Abrolhos E Propagação Da Onda De Maré

A plataforma continental do litoral entre o Espírito Santo e o Sul da Bahia apresenta recortes diferentes de qualquer outro setor do litoral brasileiro e é conhecida como o Banco de Abrolhos. O Banco de Abrolhos possui aproximadamente 250 km de comprimento (sentido Norte-Sul) e largura que varia de 25 km nas extremidades a 200 km na região central. Este relevo diferenciado muito próximo à costa ocasiona efeitos na propagação da onda de maré. Estes efeitos estão registrados nas fichas das estações maregráficas disponibilizadas pelo instituto FEMAR. A Tabela 1 apresenta os níveis obtidos nas estações de Mucuri (região central do Banco) e Barra do rio Doce (extremo Sul). O nível médio (Z0) e os níveis de preamares e baixa-mares, tanto de sizígia quanto quadratura, são maiores na estação de Mucuri. A Figura 5 apresenta a maré reconstruída a partir das constantes harmônicas para ambas as estações. Nota-se que a maré para os dois pontos está em fase, porém com uma diferença de amplitude de cerca de 50 cm.

Tabela 1: Comparação entre as estações maregráficas de Mucuri e Barra do rio Doce. Z0= Nível Médio, MHWS = nível médio das preamares de sizígia, MLWS = nível médio das baixa-mares de sizígia, MHWN = nível médio das preamares de quadratura, MLWN = nível médio das baixa-mares de quadratura.

Níveis	Mucuri [cm]	Barra do rio Doce [cm]
Z0	124	67
MHWS	229	125
MLWS	19	9
MHWN	175	87
MLWN	73	47

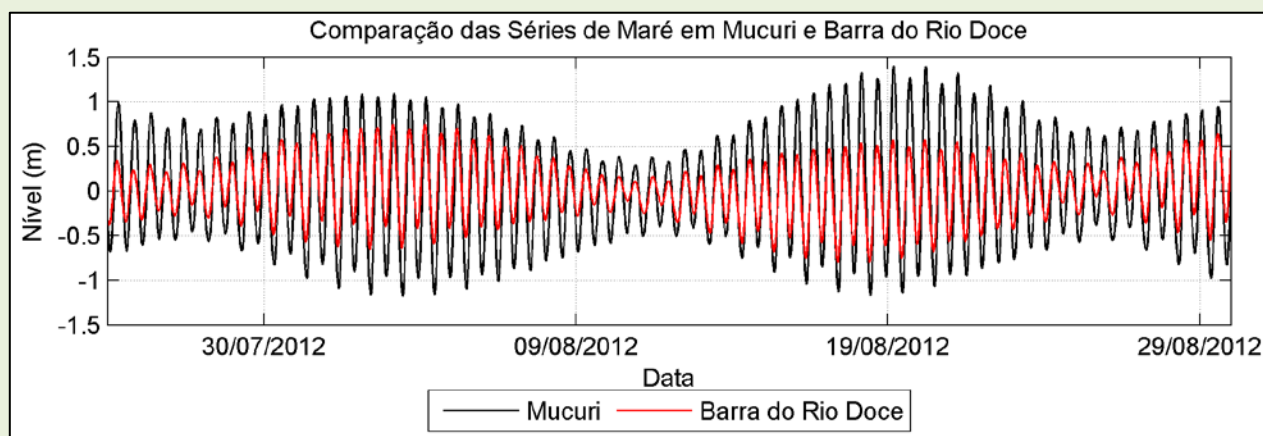


Figura 5: Séries de maré reconstruídas a partir das principais constantes harmônicas da FEMAR para Mucuri e Barra do Rio Doce.

Para visualização espacial do efeito do banco de Abrolhos na onda de maré, foi simulado um modelo forçado apenas com constantes harmônicas de maré nas fronteiras do modelo. A grade numérica utilizada para esta simulação abrange o banco de Abrolhos na sua totalidade, desde regiões profundas com 3000m de profundidade até a costa. O modelo foi calibrado com dados medidos na área de interesse (ver seção 3.5) e os resultados estão apresentados na Figura 6.

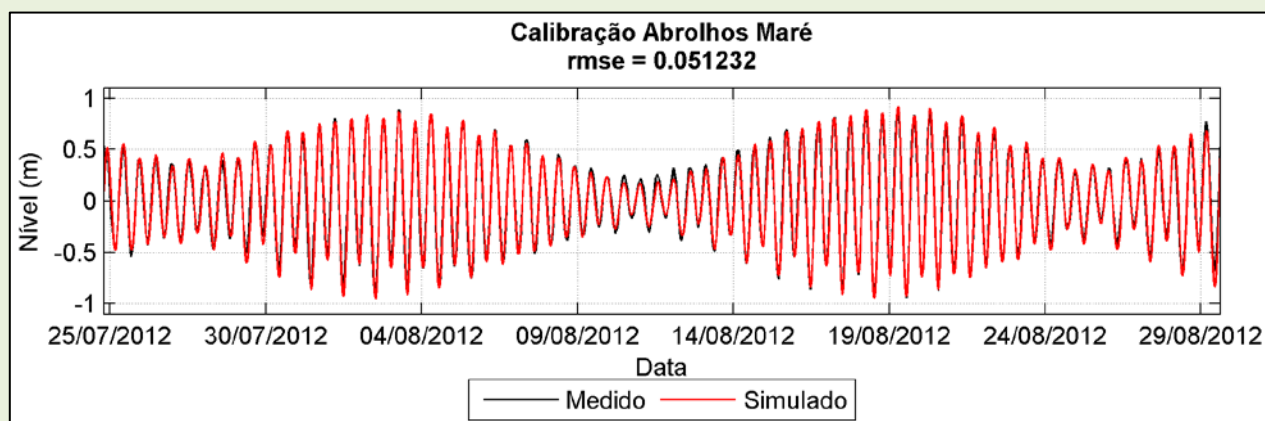


Figura 6: Calibração de nível do modelo do Banco de Abrolhos.

A Figura 7 apresenta o resultado do modelo, a esquerda um momento de baixa-mar, a direita um momento de preamar. Nota-se que o Banco de Abrolhos, por ser uma região mais rasa (até 50 m) que as regiões adjacentes, amplifica a onda de maré. Essa diferença de nível entre a área do Banco de Abrolhos e as áreas adjacentes gera correntes para Sul (ao Sul do Banco) enquanto a maré está vazando e para Norte (ao Sul do Banco) quando a maré está enchendo (Figura 8). Desta maneira, a maré é o principal agente gerador das correntes ao longo da costa em Linhares.

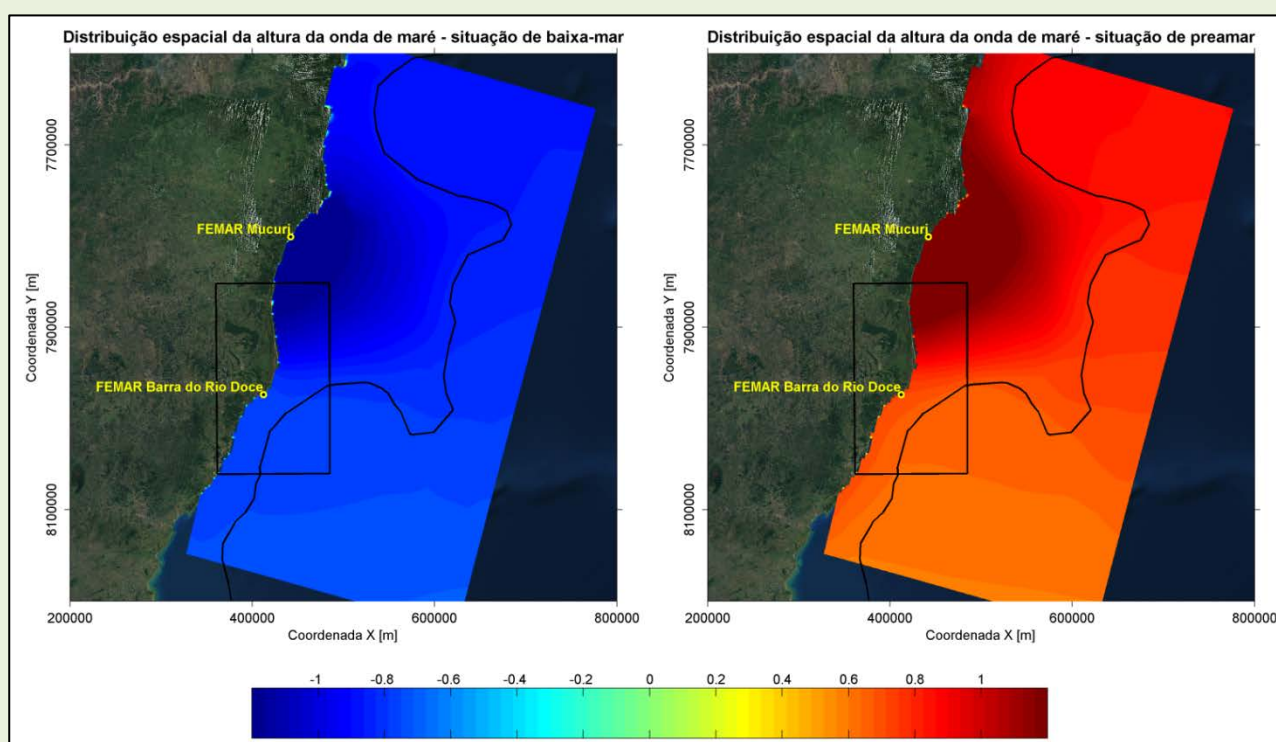


Figura 7: Variação espacial do nível de água na região do Banco de Abrolhos. (A) Situação de baixa-mar; (B) Situação de preamar. As linhas pretas representam os limites do Banco de Abrolhos e a grade hidrodinâmica utilizada no modelo Delft3D.

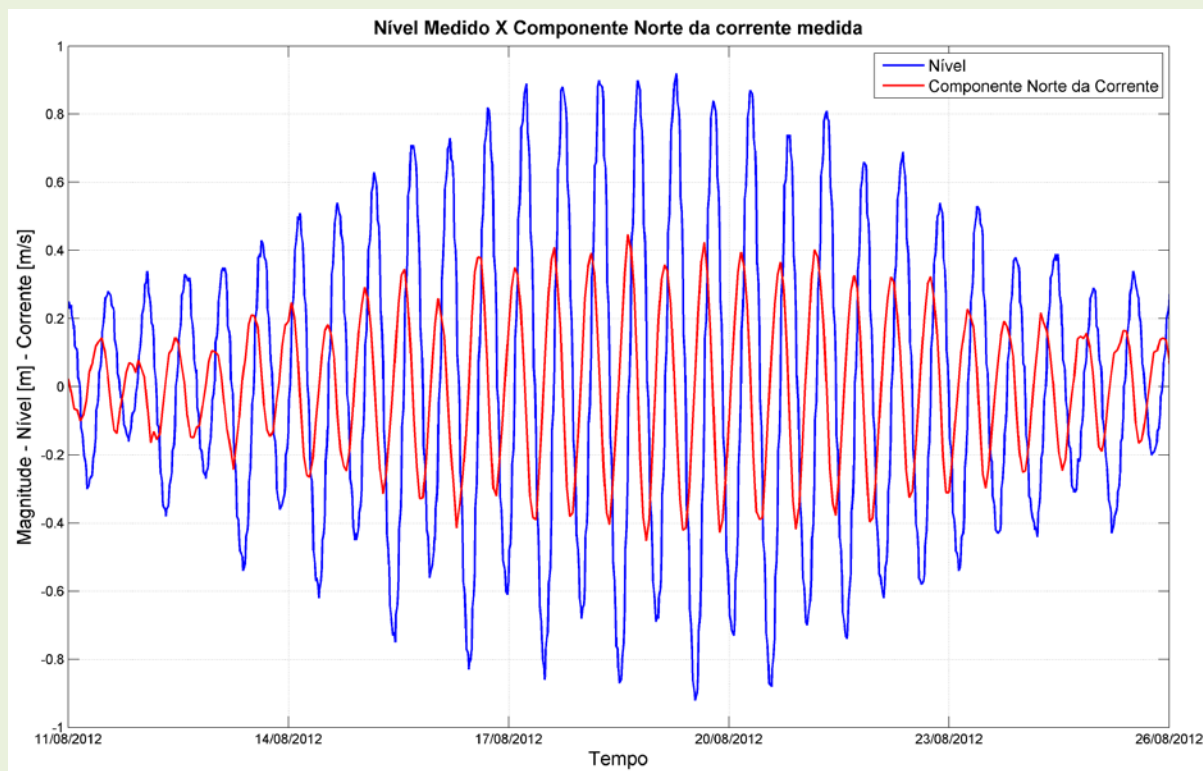


Figura 8: Dados medidos em campo de nível e componente V (Norte) da corrente. Exemplo da variação da corrente com período mareal, demonstrando que a corrente presente na região está associada principalmente à corrente de maré.

3 Modelo Numérico Hidrodinâmico

Para o presente estudo foi utilizado o modelo numérico Delft3D, desenvolvido pela Deltares, em Delft, Holanda. O Delft3D constitui em um avançado sistema de modelos numéricos 2D/3D (duas e três dimensões) que inclui vários módulos para possibilitar a simulação de processos costeiros complexos, tais como geração e propagação ondas, hidrodinâmica, transporte de sedimentos e mudanças da morfologia (erosão e deposição sedimentar, variação da linha de costa). Para a modelagem hidrodinâmica foi aplicado o módulo Delft3D-FLOW no modo 3D.

3.1 MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D-FLOW

O módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW resolve um sistema de equações de águas rasas em modo bidimensional (ou integrado na vertical) e tridimensional. O sistema de equações consiste nas equações horizontais de movimento (conservação da quantidade de movimento), na equação de continuidade, equações de transporte para constituintes conservativos e um modelo de fechamento turbulento. A equação vertical de momento é reduzida à relação de pressão hidrostática e as acelerações verticais são assumidas como sendo pequenas em relação à aceleração da gravidade. Isso faz com que o Delft3D-FLOW seja adequado para a predição de fluxos em mares rasos, áreas costeiras, estuários, lagos, rios e lagoas.

No Delft3D as equações hidrodinâmicas podem ser resolvidas em grades cartesianas retangulares, curvilineares ortogonais (*boundary fitted*) ou esféricas (LESSER *et al.*, 2004). Este modelo foi extensivamente calibrado e validado através de experimentos de campo e de laboratório e é considerado o estado-da-arte em modelagem hidrodinâmica.

3.2 MODELO MORFOLÓGICO DELFT3D-MOR

O modelo Delft3D-MOR foi elaborado para simular o comportamento morfodinâmico de rios, estuários e áreas costeiras, na escala de dias a anos, resolvendo o complexo processo de interação entre ondas, correntes, transporte de sedimentos e batimetria. A conexão entre os módulos envolvidos no processo ocorre via

acoplamento morfodinâmico (Figura 9).

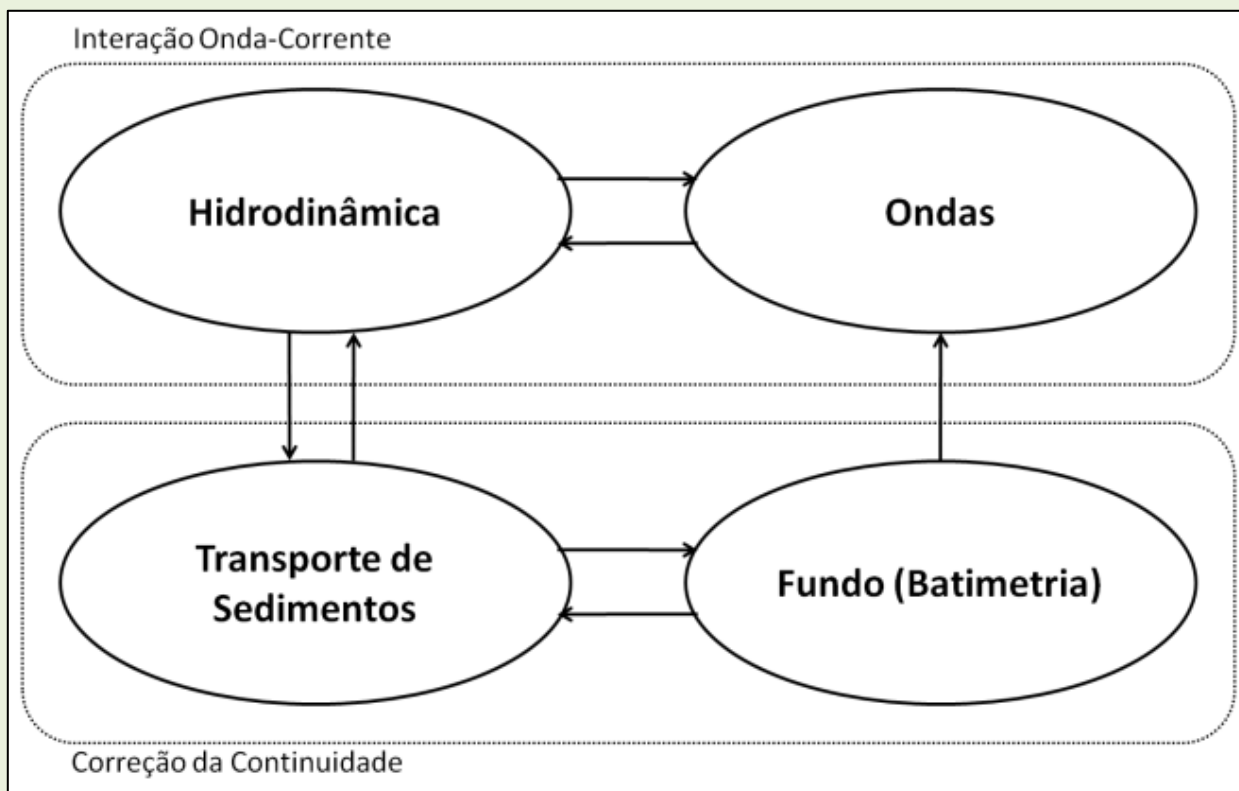


Figura 9: Fluxograma esquemático do modelo Delft3D-MOR utilizado neste trabalho.

3.2.1 Modelagem de Transporte de Sedimentos e Morfologia

Entre as frações de sedimentos, o Delft3D distingue “mud” (sedimentos coesivos governados por transporte em suspensão), “sand” (sedimentos não coesivos governados por transporte de fundo e por transporte em suspensão) e “bed-load” (sedimentos não coesivos governados unicamente por transporte de fundo). A única diferença entre as frações “sand” e “bed-load” está no fato de que o transporte em suspensão obtido pela equação da advecção-difusão não é resolvido para a última.

Embora computacionalmente o transporte tridimensional de sedimentos seja calculado da mesma forma que o transporte de qualquer outro constituinte conservativo, tal como salinidade, temperatura e traçadores, a modelagem de sedimentos diferencia-se por resolver os processos de troca de sedimento entre a camada de fundo e a coluna d’água, pela velocidade de sedimentação da partícula em decorrência da gravidade, pela influência do sedimento na densidade local e no processo turbulento, além da contínua alteração da batimetria e subsequentemente, sua influência nos processos hidrodinâmicos.

A interação entre frações de sedimentos tem importância em diversos processos, tal como a implicação no cálculo da velocidade de sedimentação de cada fração e densidade resultante em decorrência da mistura. A densidade da água é ajustada através da relação de Eckart (1958) em consideração aos efeitos da salinidade e temperatura. Para o transporte de sedimento esta relação é estendida para incluir o efeito do sedimento na densidade considerando-se a massa de todas as frações de sedimento e subtraindo a massa de água substituída.

As formulações da velocidade de sedimentação para areia e lama diferem-se consideravelmente. Em misturas de elevada concentração, a velocidade de sedimentação de uma partícula individual é reduzida em decorrência da presença de outras partículas, de forma que cada fração de sedimento possui uma velocidade de sedimentação em função do tempo e local. Para frações de sedimentos coesivos, os fluxos entre a coluna d'água e leito de fundo são calculados através das formulações de Partheniades-Krone (Partheniades, 1965). Para sedimentos coesivos, utilizam-se as formulações de van Rijn (1993) com base no diâmetro médio do grão (d_{50}).

O transporte de fundo é determinado para todas as frações do tipo “sand” e “bed-load”, primeiramente calculando-se a magnitude e direção do transporte e, posteriormente, as taxas de transporte nas interfaces da célula, determinadas e corrigidas de acordo com o efeito da declividade de fundo, composição do leito e disponibilidade de sedimento. A formulação de van Rijn distingue os componentes de transporte entre transporte de fundo em decorrência de correntes (Bed), transporte de fundo em decorrência da ação de ondas (BedW) e transporte em suspensão em decorrência da ação de ondas (SusW). Os parâmetros Bed, BedW e SusW podem ser calibrados independentemente. Outro fator de calibração importante é o fator de correlação entre o transporte de sedimento em suspensão e as correntes (Sus).

3.3 GRADE NUMÉRICA

A grade numérica foi criada com uso do módulo RGFRID, ferramenta integrada ao pacote de modelagem Delft3D, a qual permite a geração e a manipulação de grades numéricas para uso no Delft3D-FLOW. A grade numérica foi criada de forma a atender às propriedades exigidas de ortogonalidade e suavidade, a fim de evitar interferências de ruídos numéricos e aumentar a acurácia do modelo (WL | DELFT HYDRAULICS, 2007).

O domínio de cálculo foi dimensionado para resolver os processos de circulação hidrodinâmica na região do Terminal Portuário Manabi (TP Manabi), compreendendo as áreas de bota-fora e canal de acesso ao TP Manabi. A grade numérica possui maior refinamento na região do futuro terminal portuário, canal e bota-fora, de modo a representar de maneira satisfatória os processos hidrodinâmicos destas áreas (Figura 10).

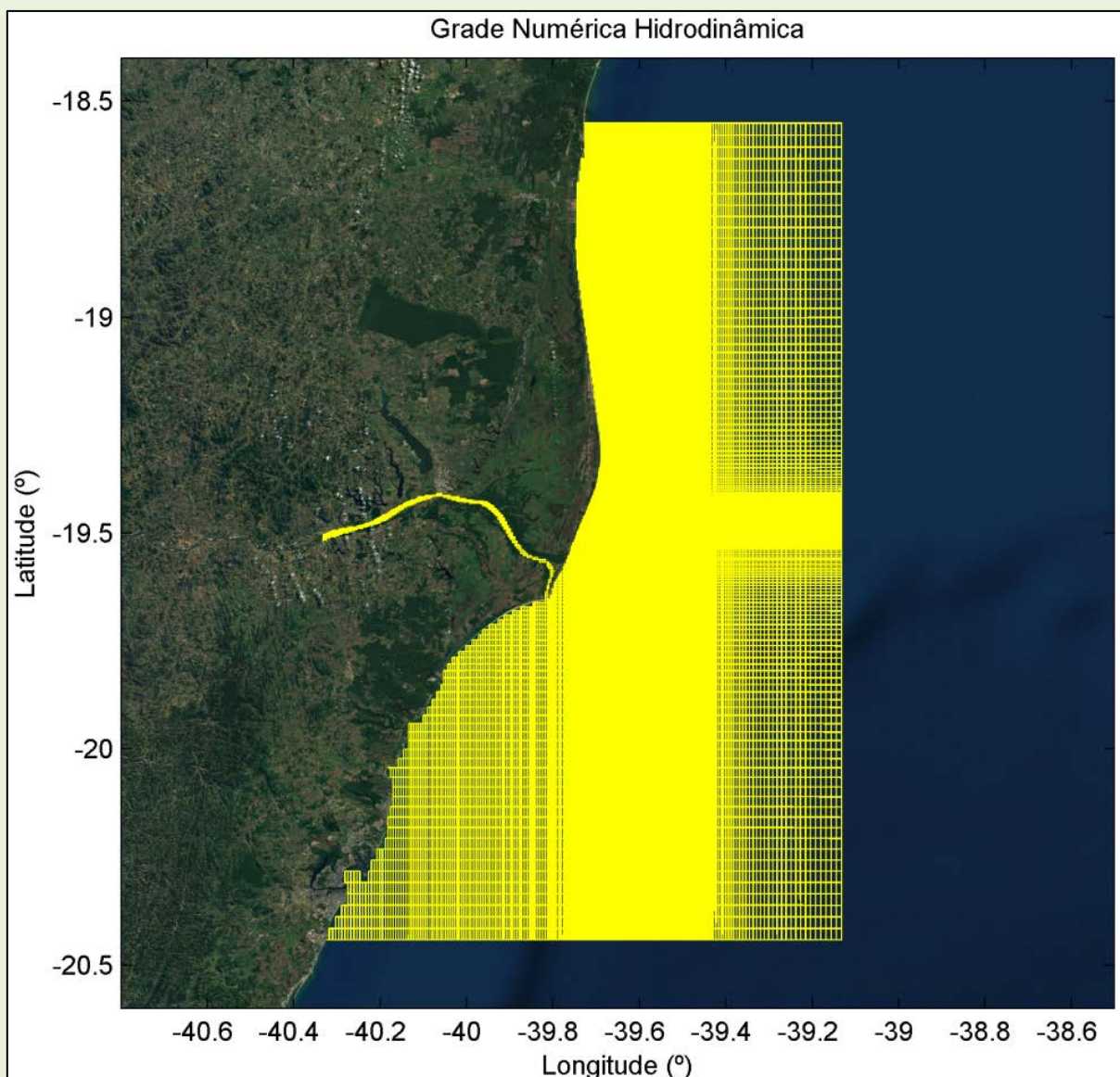


Figura 10: Grade numérica criada para resolver os processos hidrodinâmicos da área de estudo.

A grade numérica mencionada possui 263 x 169 elementos de cálculo (nós), com espaçamento variando de 160 m (na região do bota-fora e canal de acesso) a 2000 m (nas regiões mais distantes da área de interesse). A grade possui ainda, 5 camadas verticais com resolução da superfície para o fundo de 20, 35, 20, 15 e 10% da profundidade local.

3.4 BATIMETRIA

A batimetria utilizada no modelo foi composta pelos dados gerados a partir da digitalização das cartas náuticas da DHN números 70, 1400 e 1420 e 22800, bem como dados de detalhe atualizados, obtidos em dois levantamentos batimétricos, sendo um deles disponibilizado pela empresa Econservation e realizado em março de 2012 e outro realizado pela empresa SHAW Brasil (atual CB&I) em junho de 2012 na região do futuro empreendimento.

Na Figura 11 são apresentadas as cartas náuticas utilizadas para digitalização dos valores de profundidade. A descrição das cartas náuticas utilizadas é apresentada na Tabela 2, a seguir.

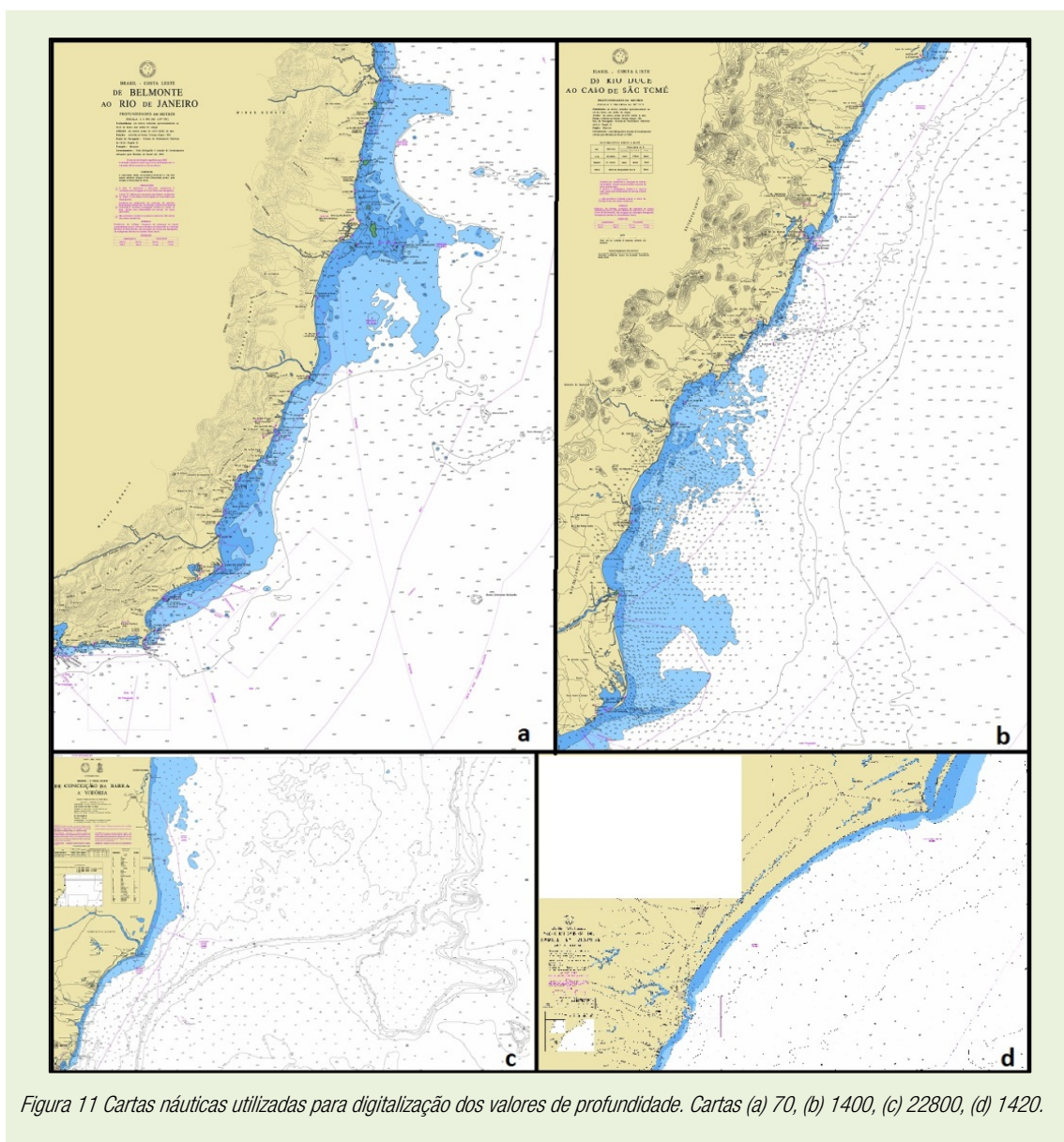


Figura 11 Cartas náuticas utilizadas para digitalização dos valores de profundidade. Cartas (a) 70, (b) 1400, (c) 22800, (d) 1420.

Tabela 2: Cartas náuticas utilizadas e suas escalas.

Carta Náutica	Número	Escala
De Belmote ao Rio de Janeiro	70	1:1.091.261
Do Rio Doce ao Cabo de São Tomé	1400	1:296.385
Da Conceição da Barra a Virória	22800	1:300.000
Proximidades de Barra do Riacho	1420	1:50.000

Os pontos de batimetria obtidos a partir dos levantamentos efetuado nas proximidades do futuro terminal portuário são apresentados na Figura 12.

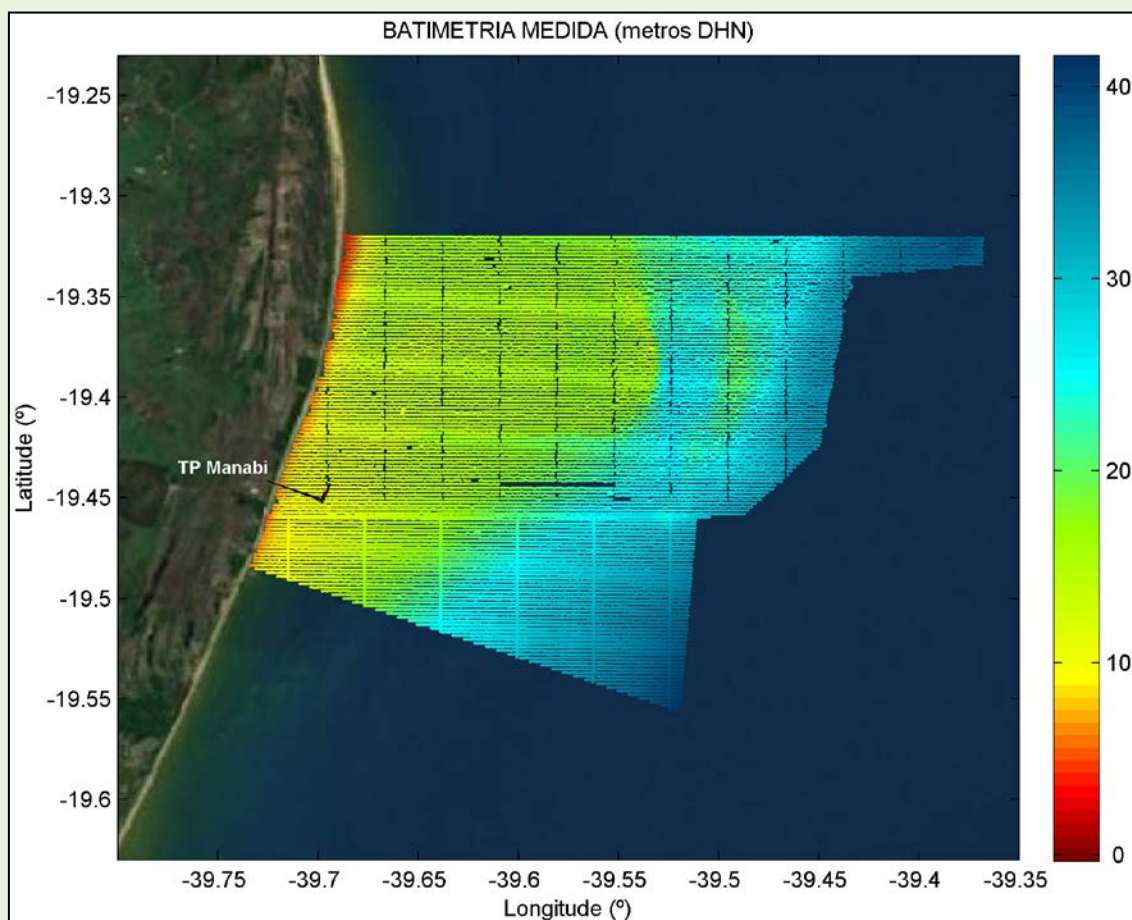


Figura 12: Pontos de batimetria obtidos pelos levantamentos batimétricos efetuados nas proximidades do futuro terminal portuário – Linhares - ES. Batimetria composta por levantamento cedido pela empresa Econservation e levantamento efetuado pela empresa SHAW Brasil (dados referenciados verticalmente ao nível zero DHN).

Os dados batimétricos das cartas náuticas e medidos foram combinados, referenciados ao nível médio do mar (N.M.) e interpolados utilizando o módulo Delft3D-Quickin, através do método de interpolação triangular linear. O resultado final das interpolações dos dados é apresentado na Figura 13.

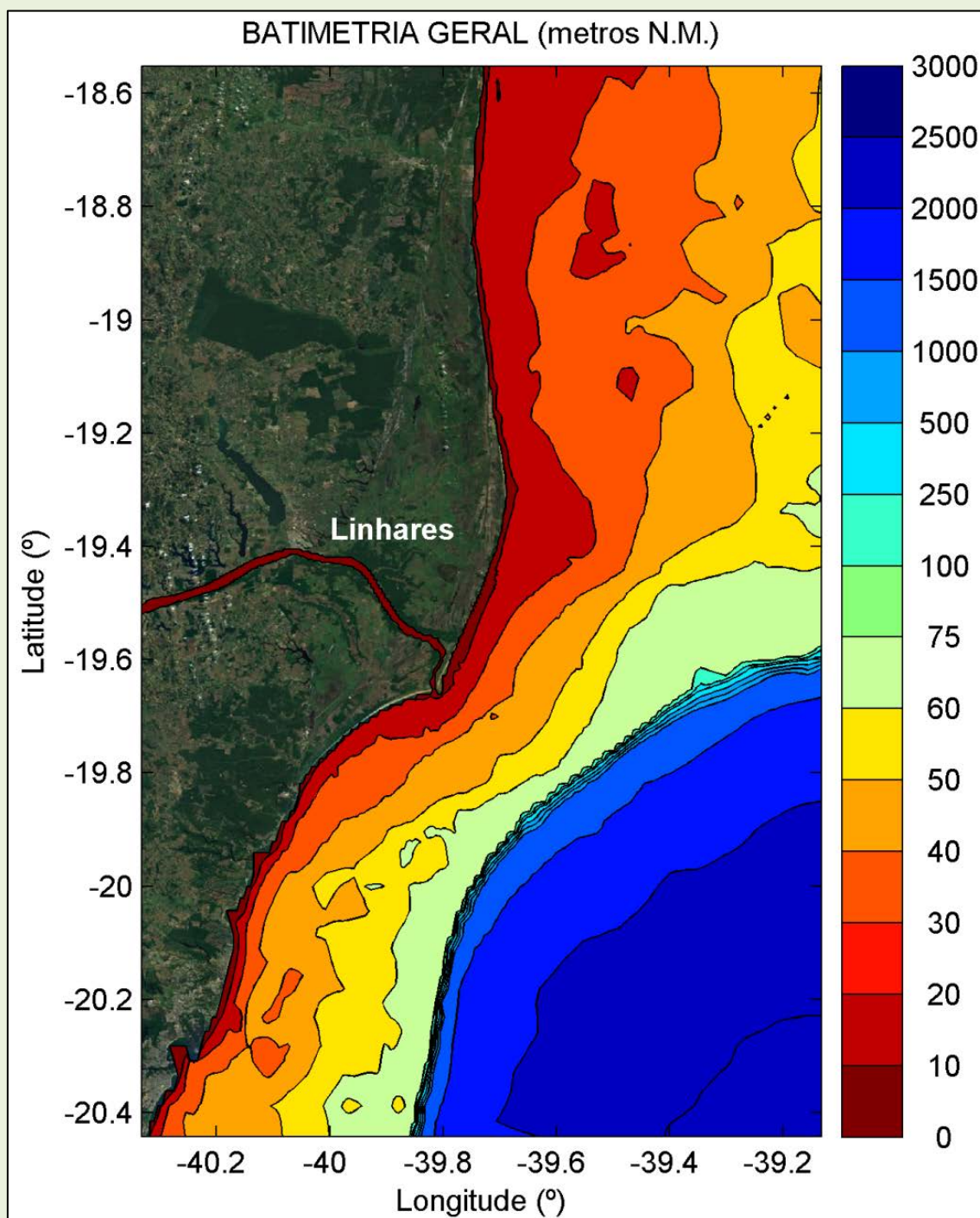


Figura 13: Batimetria interpolada e projetada na grade numérica do modelo (dados referenciados verticalmente ao nível médio do mar – N.M.).

3.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Como forçantes do modelo numérico foram utilizados dados de elevação de nível d'água, vazão do rio Doce e ventos representativos da região de estudo.

3.5.1 Marés

Em função do efeito do Banco de Abrolhos na propagação da maré descrito no item 2.2.1., foram obtidas as constantes harmônicas para quatro pontos: 1) Nordeste, alinhado ao ponto mais a Nordeste da grade; 2) Leste, coincidente com o centro da fronteira Leste da grade; 3) Sudeste, alinhado ao ponto mais a Sudeste da Grade e; 4) Sul, Alinhado ao centro da grade na sua porção Sul. Os pontos Norte, Nordeste, Sudeste e Sul estão localizados 30 km ao Norte e ao Sul do limite da grade, respectivamente. Esse afastamento corresponde a 15% da dimensão da grade numérica ao longo da costa e se fez necessário para representar o efeito da amplificação da maré sobre o Banco de Abrolhos na geração das correntes na área de estudo.

Os dados de constantes harmônicas foram obtidos com a utilização do modelo TPXO 7.2. As características das componentes de maré de cada ponto estão apresentadas na Tabela 3. O modelo TPXO foi desenvolvido pela Universidade do Estado do Oregon (Egbert *et al.* 1994; Egbert e Erofeeva, 2002) e utiliza dados das missões TOPEX/POSEIDON e de marégrafos (Ardalan e Hashemi-Frahani, 2007), sendo um dos modelos de marés mais precisos (CEPAL, 2011).

Quadro 2: Componentes harmônicas de maré utilizadas.

Ponto	Componente	Amplitude (m)	Fase	Ponto	Componente	Amplitude (m)	Fase
Nordeste	M2	0,83	184,07	Leste	M2	0,49	176,71
	S2	0,37	200,72		S2	0,21	188,05
	N2	0,13	182,20		N2	0,08	176,87
	K2	0,10	196,67		K2	0,06	182,16
	K1	0,05	223,87		K1	0,05	206,74
	O1	0,09	157,69		O1	0,09	141,14
	P1	0,02	212,42		P1	0,02	198,23
	Q1	0,02	125,71		Q1	0,02	114,85
	MF	0,01	354,66		MF	0,01	357,84
	MM	0,01	352,68		MM	0,01	352,37
	M4	0,04	14,34		M4	0,01	302,74
	MS4	0,01	13,86		MS4	0,00	331,61
	MN4	0,01	328,95		MN4	0,00	220,75
Sudeste	M2	0,44	175,43	Sul	M2	0,44	174,51
	S2	0,20	186,40		S2	0,20	185,50
	N2	0,07	178,26		N2	0,07	177,60
	K2	0,06	180,14		K2	0,06	179,35
	K1	0,05	204,72		K1	0,05	204,64
	O1	0,08	139,01		O1	0,09	138,32
	P1	0,02	197,29		P1	0,02	197,00
	Q1	0,02	113,60		Q1	0,02	113,05
	MF	0,01	356,89		MF	0,01	353,96
	MM	0,01	352,08		MM	0,00	351,59
	M4	0,01	278,54		M4	0,01	274,74
	MS4	0,00	311,72		MS4	0,00	311,47
	MN4	0,00	205,37		MN4	0,00	205,48

3.5.2 Vazão do Rio Doce

Os dados utilizados para a determinação do regime sazonal de vazões da bacia hidrográfica do Rio Doce foram obtidos no banco de dados hidrológicos da Agência Nacional de Águas (ANA) – Hidroweb. Para processamento das séries temporais foi empregado o software SisCAH 1.0 (Sistema Computacional para Análises Hidrológicas) disponibilizado pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). As duas estações utilizadas no presente estudo estão apresentadas na Tabela 3 e suas séries temporais compreendem o período entre 1967 e 2005.

Tabela 3: Estações aplicadas no presente estudo.

ESTAÇÃO	FUNÇÃO
Colatina – 56994500	Suporte para análise
Linhares – 56998000	Determinação das vazões mensais para a bacia do Rio Doce

A variável hidrológica de vazão foi analisada a fim de contabilizar falha e consistência dos dados monitorados. Para a análise dos dados fluviométricos foram empregados momentos estatísticos, análise de estacionariedade das séries temporais de cada estação e análise de correlação estatística entre as estações.

Os testes de estacionariedade para níveis de significância de 1% e 5% foram aceitos dentro do período de análise nas duas estações. O coeficiente de correlação para as duas estações foi de 0,96, demonstrando alto grau de linearidade de reposta fluvial. A partir da análise de correlação, as falhas presentes na série temporal da estação Linhares foram corrigidas utilizando a série temporal da estação Colatina. Após a correção das falhas, o hidrograma sazonal para estação Linhares foi calculado para o período entre o ano de 1967 até o ano de 2005.

Tabela 4 apresenta os resultados obtidos. Como dado de entrada no Delft3D-Flow, foram utilizados os dados de vazão média para os meses simulados (em destaque).

Tabela 4: Médias mensais de longo período, desvio padrão e coeficiente de variação.

Mês	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Janeiro	1924,58	919,78	0,48
Fevereiro	1388,28	638,65	0,46
Março	1305,30	630,27	0,48
Abril	978,03	386,28	0,39
Maio	708,00	221,76	0,31
Junho	608,91	181,70	0,30
Julho	543,85	146,07	0,27
Agosto	489,76	136,73	0,28
Setembro	473,37	121,24	0,26
Outubro	589,99	204,56	0,35
Novembro	1091,26	519,13	0,48
Dezembro	1571,93	555,91	0,35

3.5.3 Ventos

A base de ventos utilizada como condição de contorno para o modelo de pluma de dragagem e feição de fundo do bota-fora é oriunda do *NCEP Climate Forecast System Version 2* (CFSR) e corresponde a uma base de ventos com resolução temporal de 6 horas e espacial de $0,2^\circ$ para o ano de 2011 (Figura 14) extraída nas coordenadas $39^\circ 9' O$, $19^\circ 25' S$ (*datum* vertical WGS-84).

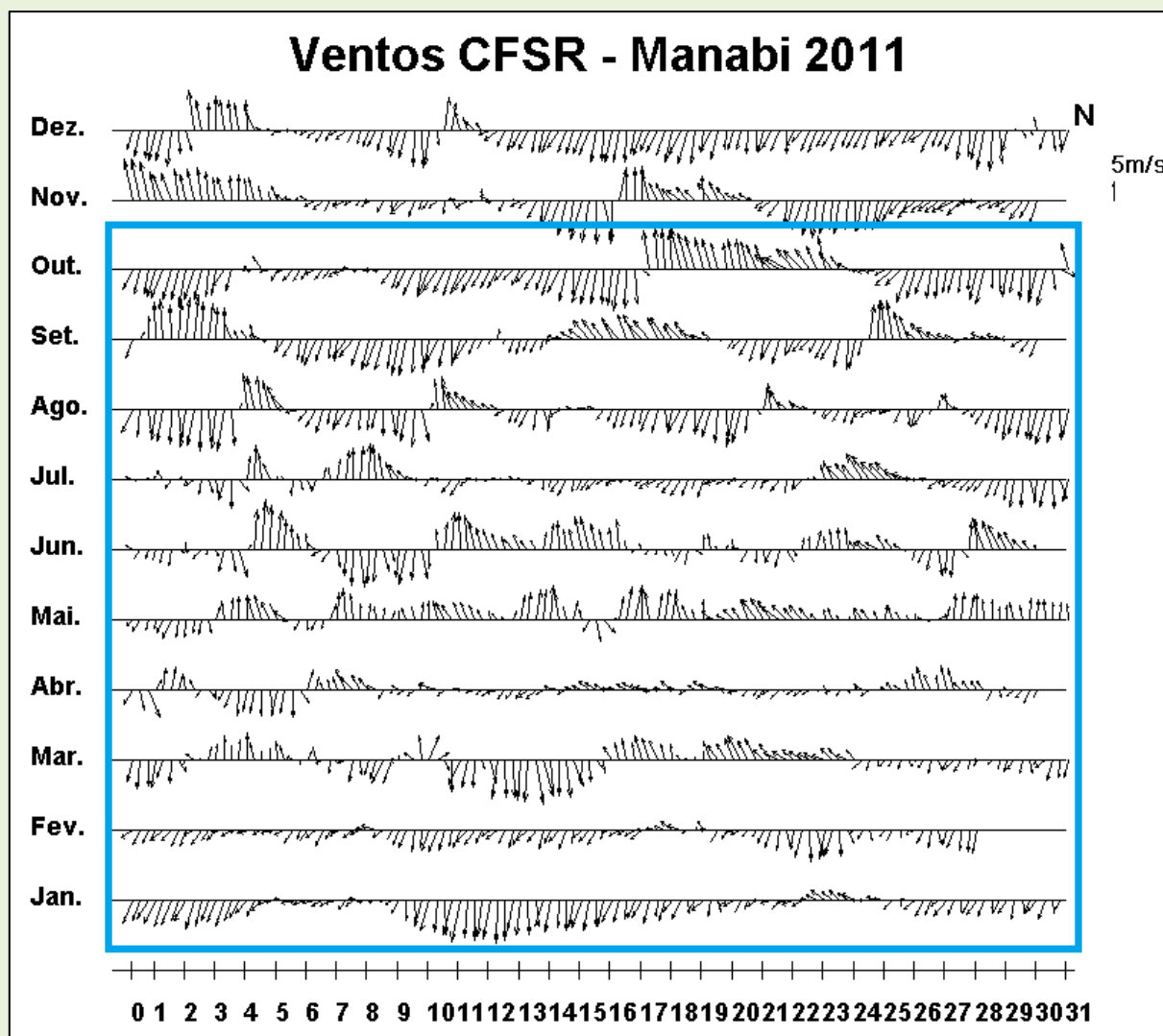


Figura 14: Base de ventos para o ano de 2011 representativos da região do empreendimento. Em destaque os meses simulados.

Para analisar o efeito da dispersão das plumas de dragagem e bota-fora e da evolução da feição de fundo, a dragagem completa do canal foi simulada, totalizando aproximadamente 10 meses, de janeiro a outubro de 2011. A rosa de ventos para o período simulado está apresentada na Figura 15.

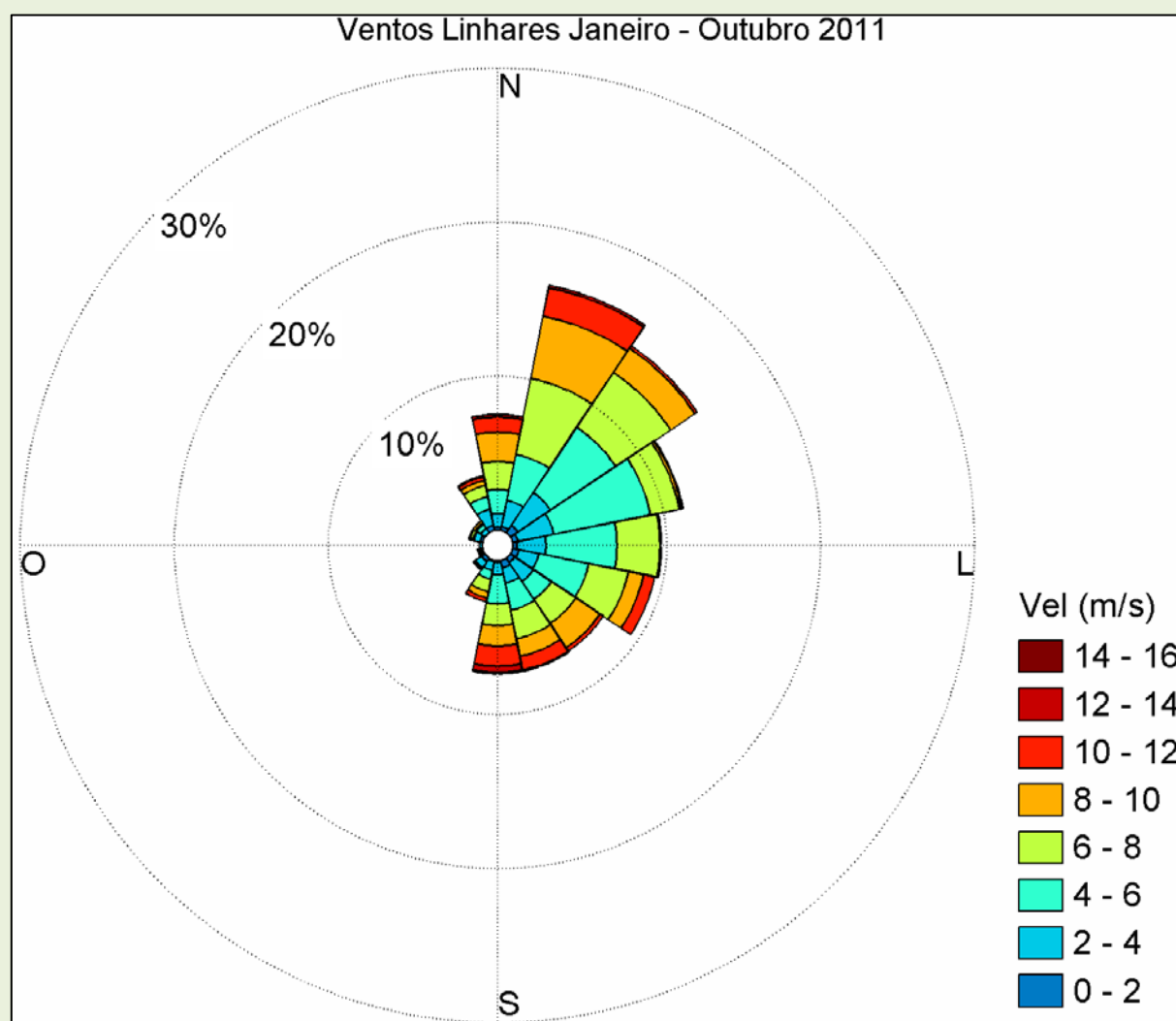


Figura 15: Rosa de ventos do período da simulação iniciada em janeiro de 2011 (esquerda) e do modelo iniciado em Julho de 2011 (direita).

3.6 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O uso de modelos numéricos possibilita que, após a calibração em um único ponto (ou mais), seja possível extrapolar as informações para todo o domínio de cálculo. O processo de calibração se realiza a partir da comparação entre os resultados do modelo com outras fontes de dados, de forma que quanto melhor o ajuste entre os valores, melhor o resultado fornecido pelo modelo.

A calibração do modelo hidrodinâmico foi realizada a partir da comparação dos resultados do modelo com os dados medidos em campanha de campo realizada por SHAW (2012) no período entre 24/07/2012 e 29/08/2012. Foram realizadas simulações para o mesmo período e os parâmetros foram ajustados de acordo com a Tabela 5. As séries medidas e simuladas estão apresentadas na Figura 16. Para analisar o quanto o modelo representa o ambiente, foi calculado o RMSE (*root mean square error*), ou erro quadrático médio, dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}$$

Onde: P representa a variável prevista (modelada) e O a variável observada (Nível, componente U ou V de correntes).

Tabela 5: Parâmetros de calibração do modelo hidrodinâmico.

Parâmetro	Valor
Passo de tempo	1 min
Aceleração da gravidade	9,81 m/s ²
Densidade da água	1025 kg/m ³
Coefficiente de Chèzy na direção U	40 m ^{0.5} /s
Coefficiente de Chèzy na direção V	130 m ^{0.5} /s
Coefficiente de viscosidade turbulenta horizontal	2 m ² /s
Coefficiente de arrasto do vento	0.0008 a 0m/s, 0.002 a 1m/s e 0.00723 a 50 m/s

Percebe-se pela figura que o modelo representa o ambiente de forma adequada com RMSE's de 0,05 m para nível e de 0,08 e 0,14 m/s para as componentes de corrente U (eixo x) e V (eixo y), respectivamente.

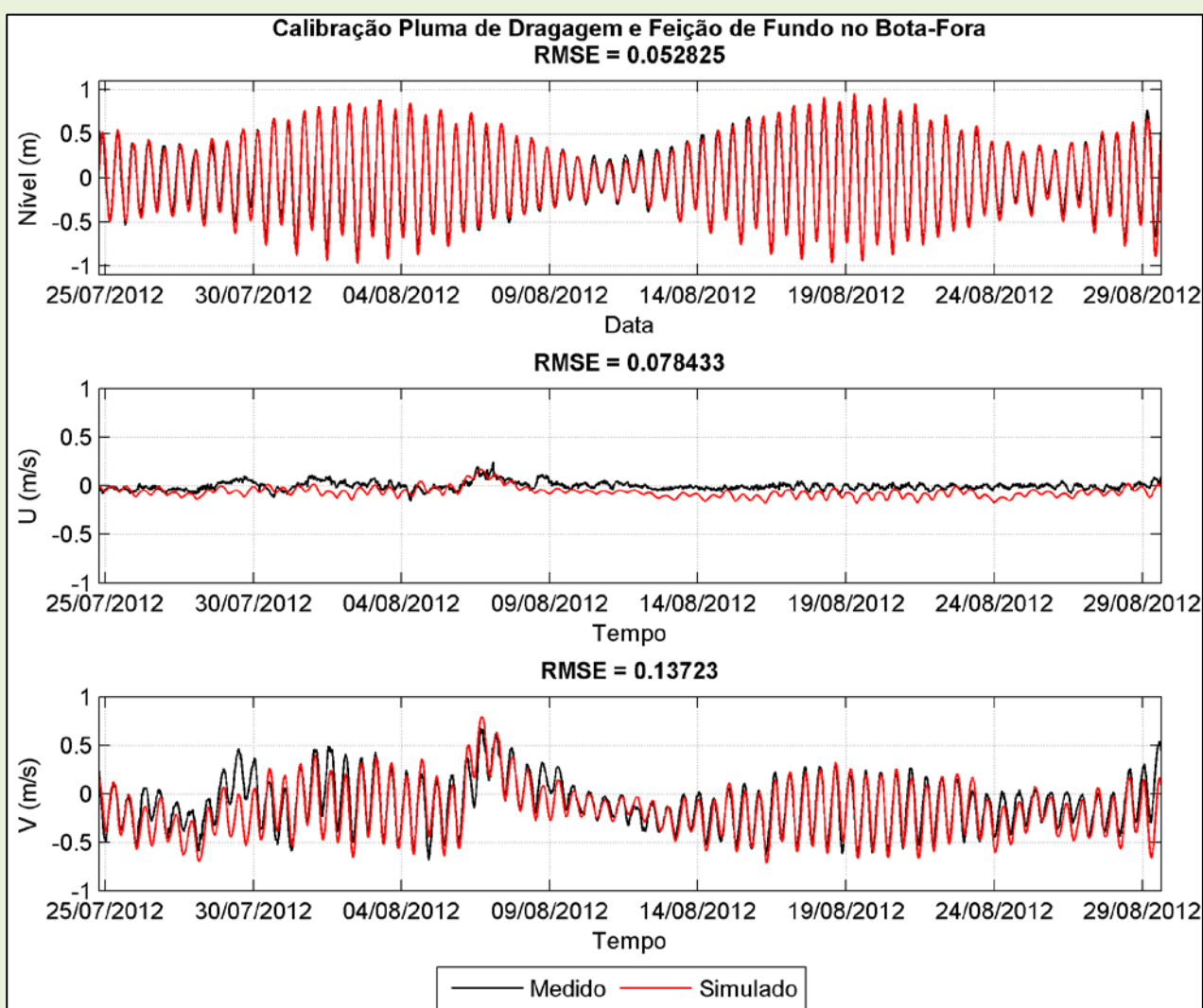


Figura 16: Calibração do modelo hidrodinâmico correntes e nível

3.7 CAMPOS DE CORRENTES

Os mapas vetoriais ilustrando os dados de correntes simulados pelo modelo numérico Delft3D estão apresentados da Figura 17 a Figura 22. As correntes na condição de maré de sizígia estão apresentadas da Figura 17 a Figura 19. Nessas figuras, pode-se perceber que, durante a sizígia, a maré é o agente dominante das correntes ao longo da costa. Em situações de maré enchente, as correntes são predominantemente de Sul para Norte, enquanto que em condições de vazante, as correntes são predominantes de Norte para Sul. No entanto, o vento exerce importância significativa na magnitude das correntes, visto que na condição de inverno (ventos característicos do quadrante Sul) as maiores magnitudes de correntes ocorrem durante a enchente (sentido Sul-Norte), enquanto que na condição de verão (ventos característicos do quadrante Norte), as maiores magnitudes de correntes ocorrem no durante a vazante (sentido Norte-Sul).

Em condições de quadratura, quando as amplitudes das marés são consideravelmente menores (Figura 17 a Figura 22), o vento passa a ser o agente dominante das correntes na região e, embora as marés influenciem a magnitude das correntes, o sentido das correntes passa a sofrer forte influência da ação dos ventos. Esses resultados demonstram a importância da presença do Banco de Abrolhos na geração das correntes de maré ao longo da costa descritos na seção 2.2.1.

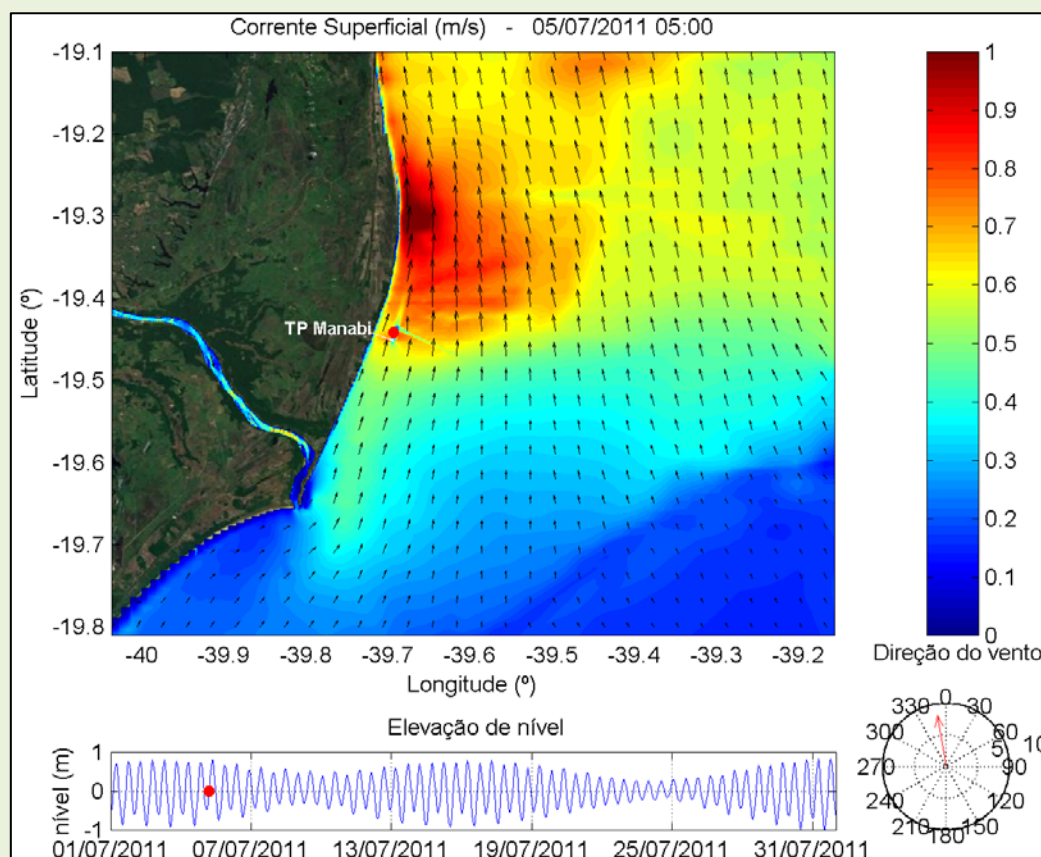


Figura 17: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição inverno com vento Sudeste e maré enchente de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

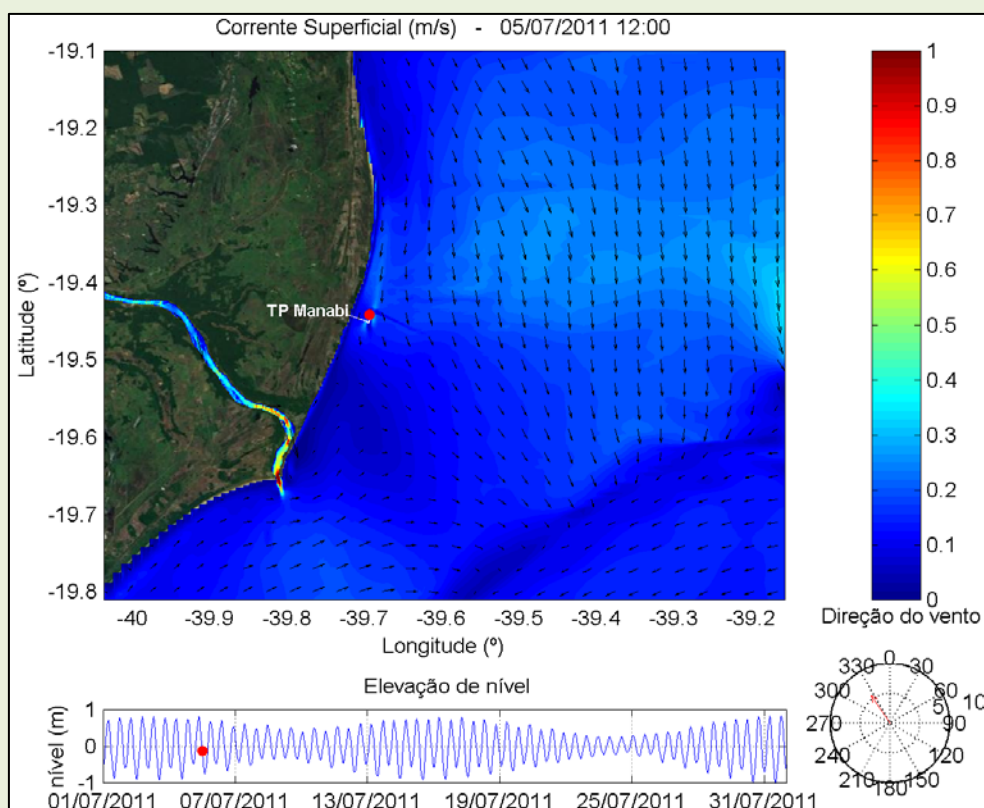


Figura 18: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição inverno com vento Sudeste e maré vazante de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

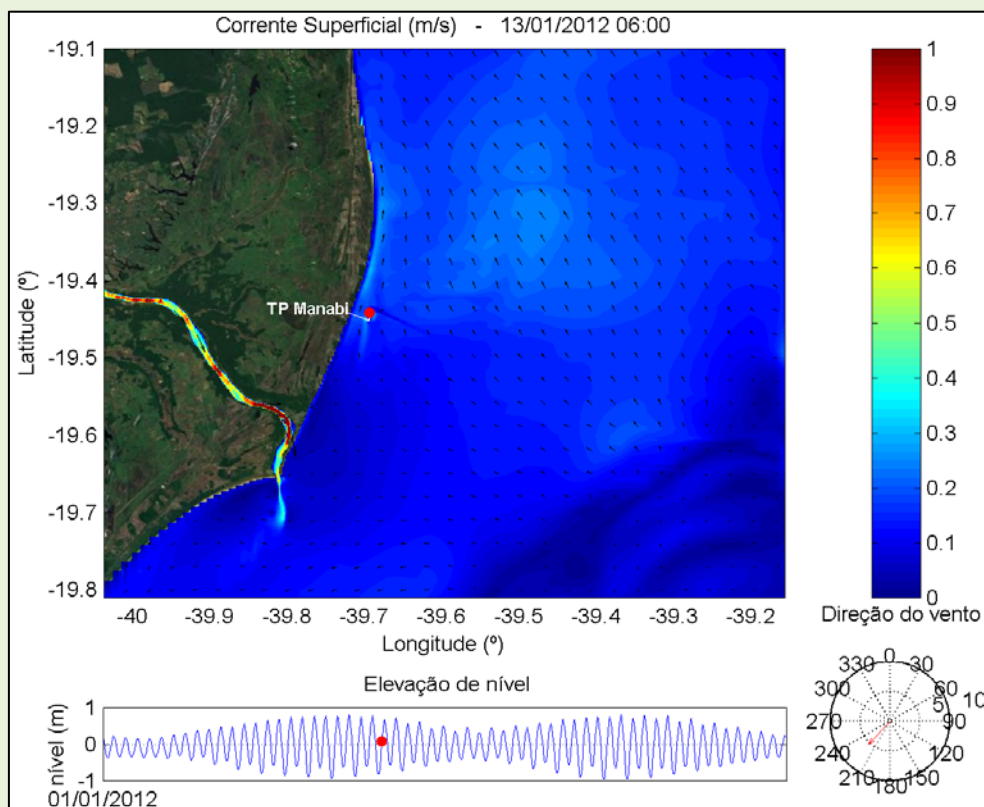


Figura 19: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição verão com vento Nordeste e maré enchente de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

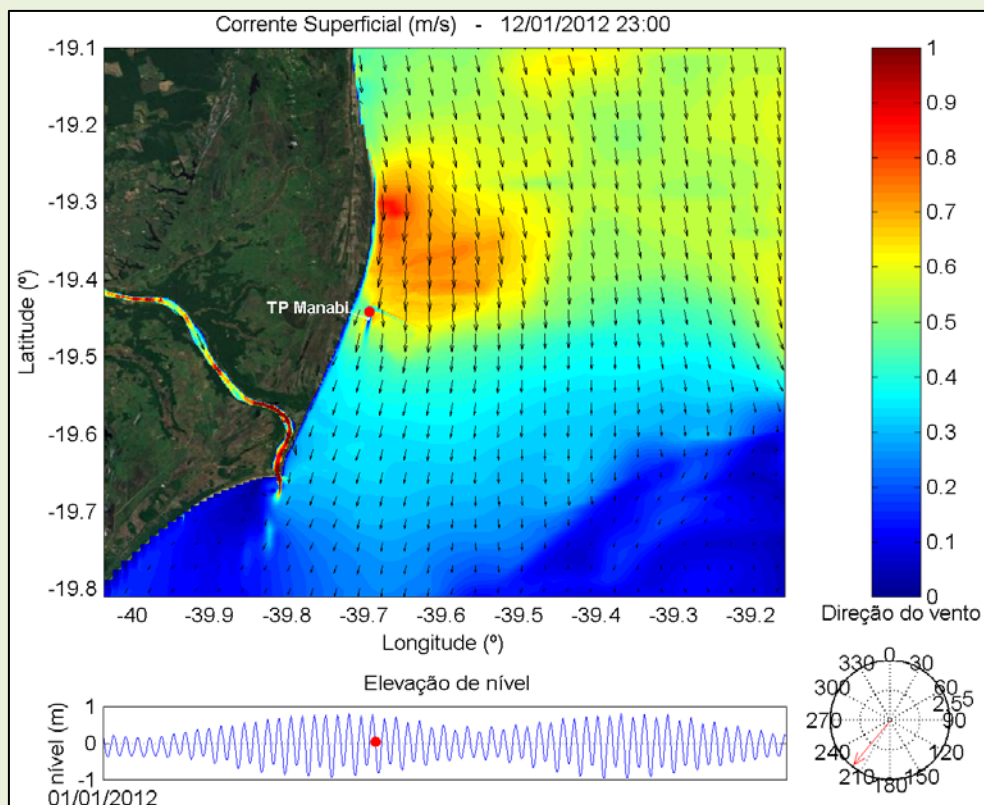


Figura 20: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição verão com vento Nordeste e maré vazante de sizígia. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

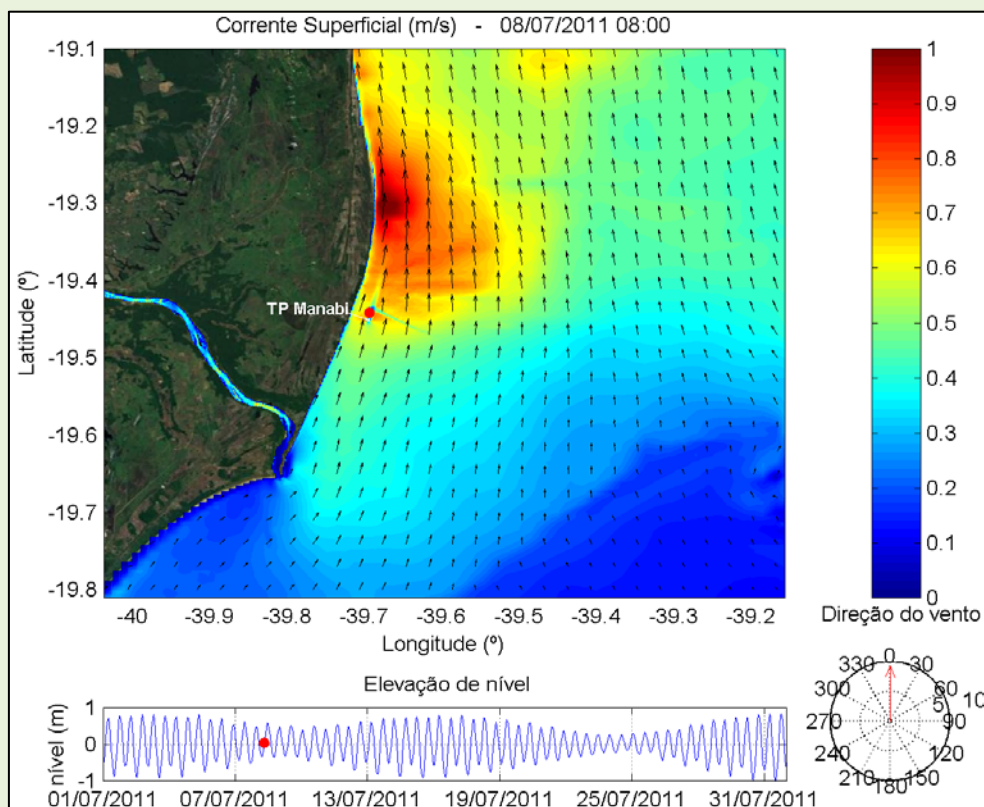


Figura 21: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição inverno com vento Sul e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

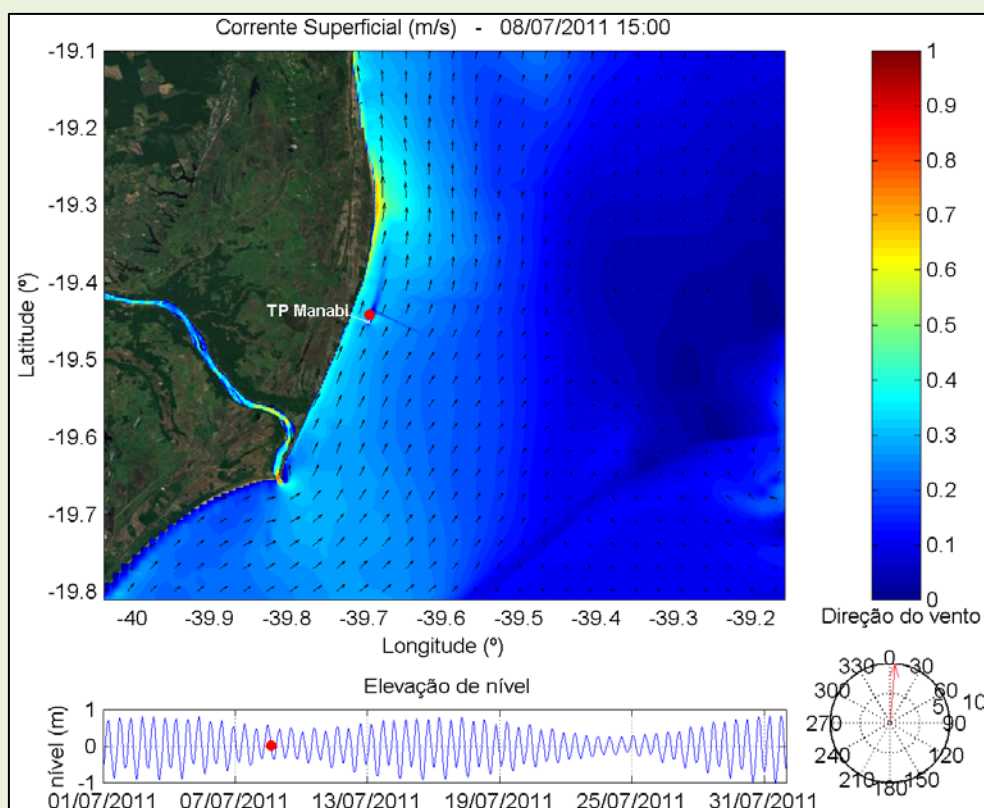


Figura 21: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição inverno com vento Sul e maré vazante de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

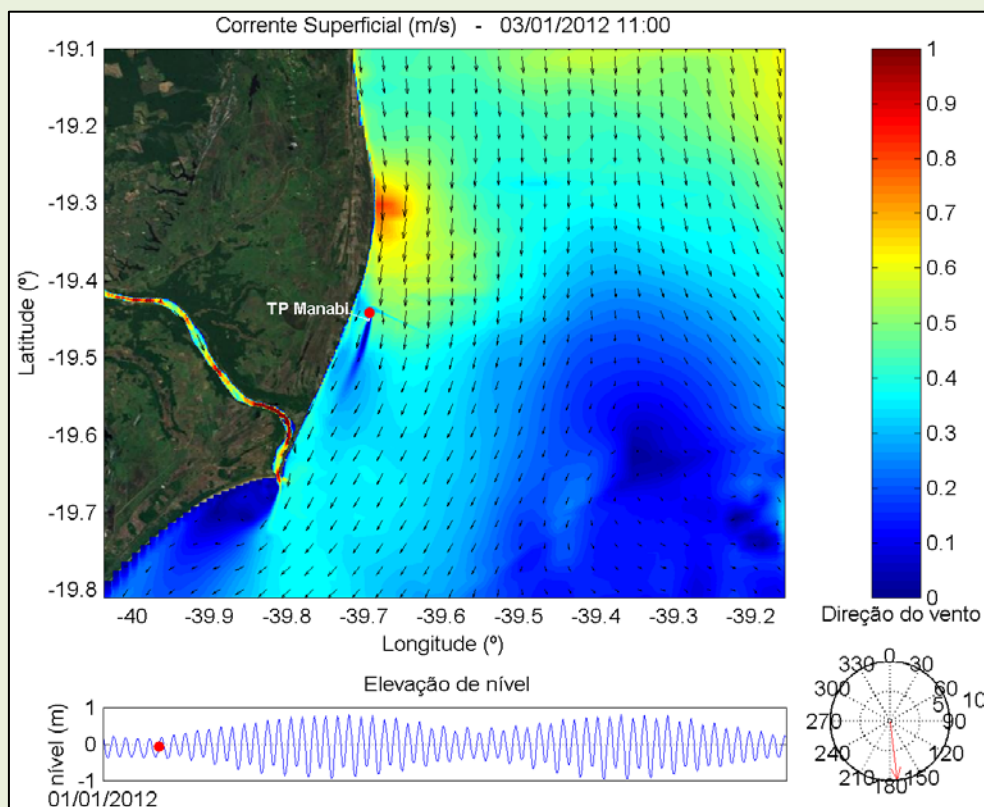


Figura 22: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição verão com vento Norte e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

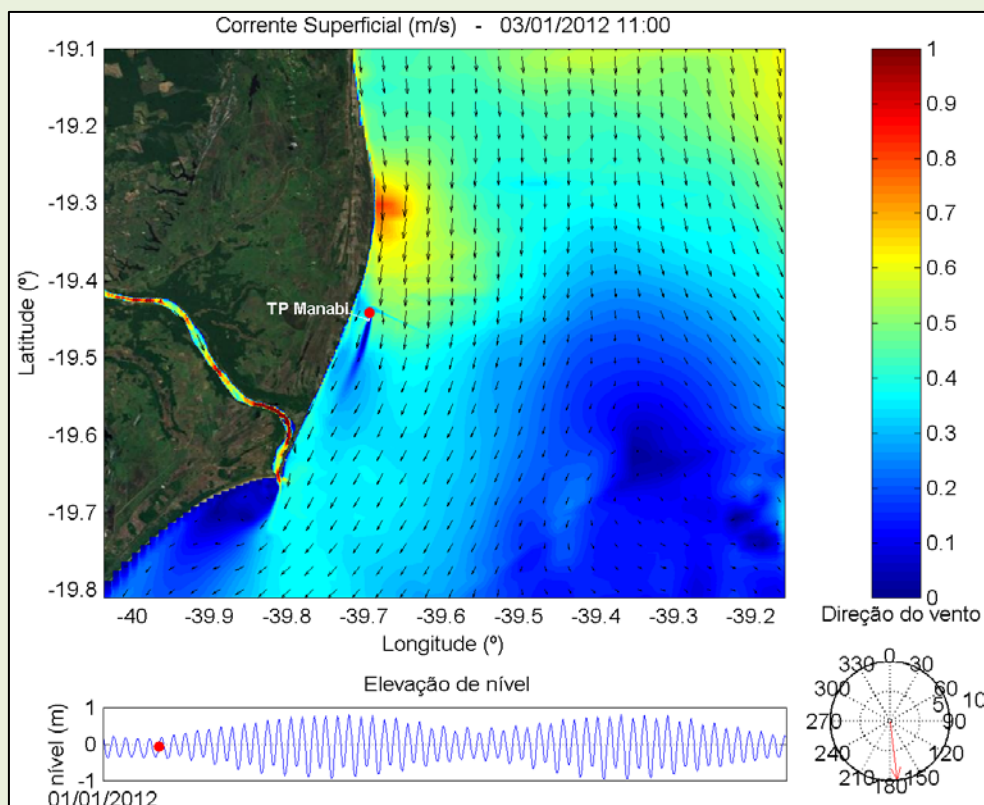


Figura 23: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição verão com vento Norte e maré enchente de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

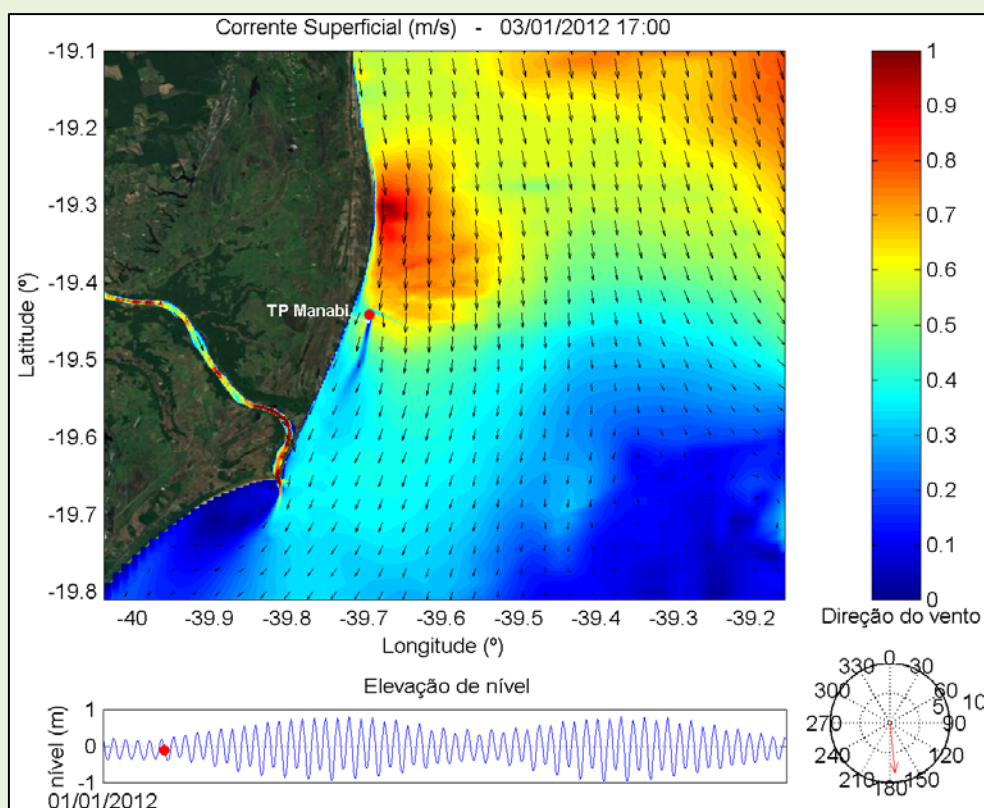


Figura 24: Campo vetorial de correntes (média ponderada entre 0 e 10m de profundidade) na região do futuro empreendimento sob condição verão com vento Norte e maré vazante de quadratura. O ponto vermelho representa o local referente à série de nível.

3.8 SIMULAÇÃO DE PLUMA DE DRAGAGEM E FEIÇÃO DE FUNDO NO BOTA-FORA

Para atender o objetivo de simular a dispersão da pluma de sedimentos em suspensão originada dos processos de ressuspensão, *overflow* e descarte de material dragado na região do TP Manabi, foram definidas as etapas e características da atividade de dragagem. A definição da dragagem levou em conta as características sedimentológicas da região e a capacidade da draga utilizada.

O material de fundo é retirado pelo terminal desagregador e bomba de sucção gerando ressuspensão junto ao fundo. Este material é descarregado na cisterna em uma mistura de água e sedimento denominada *slurry*. Quando a capacidade do compartimento se esgota a draga continua operando levando a um transbordamento da cisterna. Este procedimento é denominado *overflow* (USACE, EM-1110-2-5025, 1983). Durante o *overflow* o excesso de água é retirado do interior da cisterna juntamente com os sedimentos finos que estão em suspensão no *slurry*. Ao final do tempo de *overflow*, a embarcação se desloca até a área de bota-fora, onde o despejo do material é realizado pela abertura das comportas da cisterna no fundo da embarcação. Então, a embarcação retorna a área de dragagem para continuar as operações e o ciclo de dragagem é reiniciado. Ciclos de dragagem semelhantes são repetidos até que a profundidade de corte seja atingida.

A duração do ciclo de dragagem (que inclui a dragagem, o deslocamento até a área de descarte, o despejo dos sedimentos no bota-fora e o retorno até a área de dragagem) foi estimada em aproximadamente 240 minutos (4h), e está ilustrado na Figura 25



Figura 25 Detalhamento de um ciclo de dragagem considerado nas simulações numéricas da dispersão da pluma de sedimentos.

Para simulações de dragagem, é necessário conhecer as dimensões do canal, bacia de evolução e bota-fora, dados de sedimento a ser dragado e característica da(s) draga(s) utilizada(s).

Canal de acesso ao TP Manabi: Transversal à praia, com 22,5 m (DHN) de profundidade até a bacia de evolução, onde passa a 21 m (DHN) e, na área do berço de atracação apresentará 20 m. O canal apresenta largura de 270 m e uma extensão de aproximadamente 9000 m, totalizando um volume a ser dragado de 31.330.800 m³.

Bota-fora: Localizado a aproximadamente 25 km da praia, apresenta-se na forma circular com raio de 1,5 km, totalizando uma área de aproximadamente 7 km². As profundidades mais rasas na área são de 32 m (DHN) e as mais profundas chegam próximas dos 40 m (DHN).

Sedimento dragado: as características dos sedimentos utilizados no modelo de dragagem e bota-fora foram disponibilizadas pela Econservation e consistem em duas frações de sedimento, sendo uma delas composta de sedimentos coesivos (siltes e argilas) e outra de sedimentos não coesivos (areia). Foi calculada a mediana das medianas das amostras mais próximas ao canal e obteve-se uma porcentagem de 10% de sedimentos finos (siltes e argilas) e 90% de sedimentos não coesivos, destes, foi feita a média das medianas e obteve-se um diâmetro de 200 µm.

Dragas e operação de dragagem: As características das dragas e da operação de dragagem utilizadas nas simulações foram definidas pela Econservation estão descritas na Tabela 6.

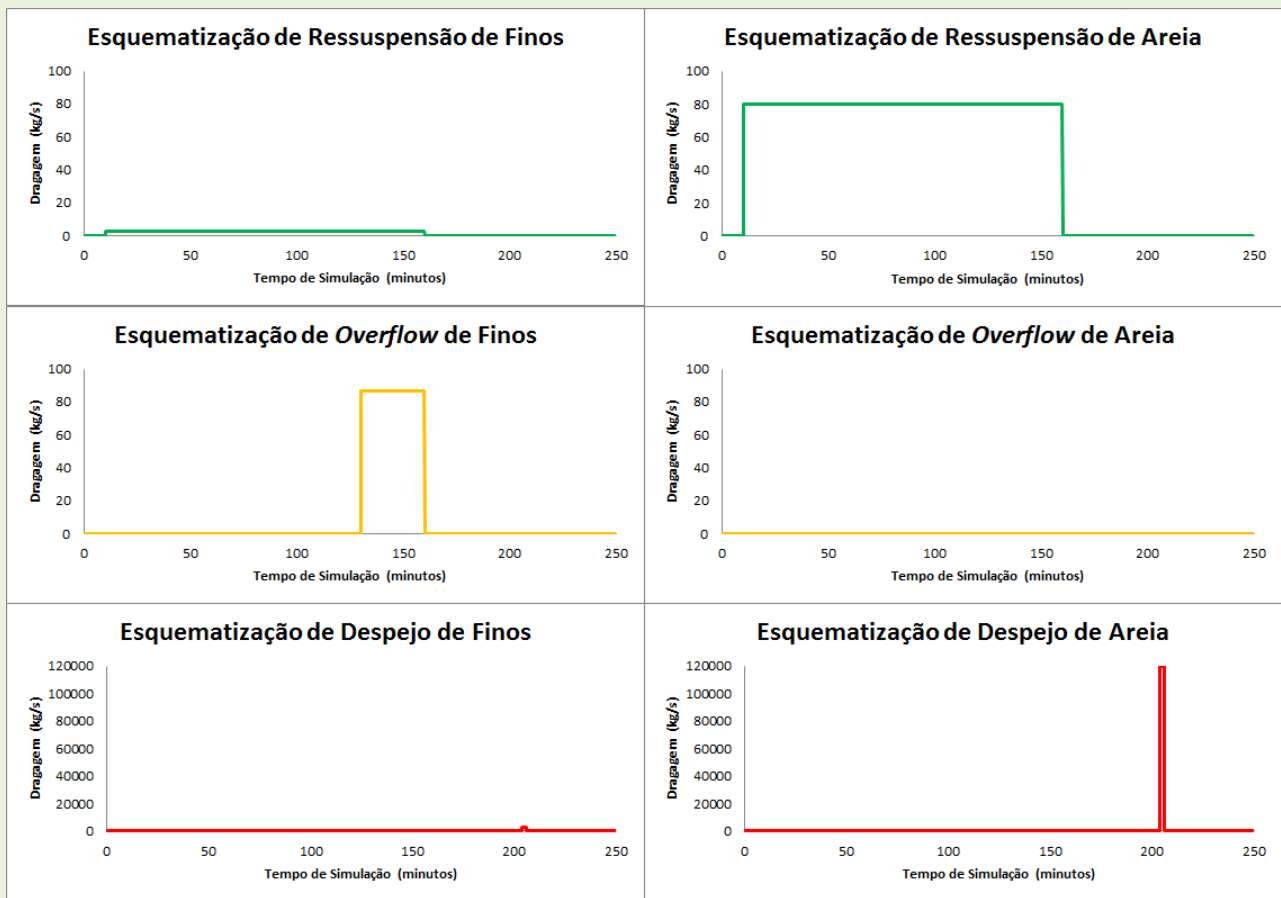
Tabela 6: Características das dragas, operação e sedimento.

Equipamento	Capacidade da cisterna (m ³)	20.000
	Porcentagem de água na cisterna antes de iniciar o <i>overflow</i> (%)	60
	Porcentagem de sedimento na cisterna antes de iniciar o <i>overflow</i> (%)	40
	Taxa de dragagem (m ³ /h)	10.000
Operação	Tempo de dragagem (min)	120
	Tempo de Dragagem + Overflow (min)	30
	Tempo de Despejo (min)	2
	Tempo de navegação entre canal bota-fora (min)	44
Sedimento	Volume dragado (m ³)	31.330.800
	Porcentagem de sedimentos coesivos - silte e argila (%)	10
	Porcentagem de sedimentos arenosos (%)	90

3.8.1 Esquematização da Dragagem e Bota-Fora

A esquematização da dragagem e bota-fora no modelo Delft3D considerou: 1) Ressuspensão do sedimento (areia e finos) no fundo: durante a dragagem e dragagem + *overflow*; 2) *Overflow*: água + sedimento fino sendo despejado na superfície; 3) Despejo: todo o conteúdo da cisterna despejado na superfície na área de bota-fora.

A Figura 26 apresenta a esquematização das séries temporais utilizadas no modelo para simular a ressuspensão, *overflow* e despejo do material dragado. Durante o período em que a cisterna da draga está enchendo, ocorre apenas a ressuspensão do material junto ao fundo, esta corresponde a 5% da taxa de dragagem. Após 120 minutos, a partir do momento em que a cisterna enche, o *overflow* é iniciado. Considera-se que toda a areia deposita e permanece no fundo da cisterna, e durante o *overflow*, apenas sedimentos finos (silte e argila) e água são despejados na superfície. Ao final de 150 minutos, a draga inicia sua viagem até o bota-fora. Chegando à área (após 44 minutos) a draga abre a cisterna e, em 2 minutos, todo o material é liberado na superfície.



Para esquematizar o ciclo de dragagem e despejo, foi calculado o tempo total necessário para dragar o volume total (31.330.800 m³). Para isso foi calculado o volume de sedimento dragado em cada ciclo a partir da proporção de sedimento dentro da cisterna ao final dos 150 minutos (tempo de dragagem e *overflow*) - logo após enchimento da cisterna, durante o *overflow*, o volume de areia na cisterna aumenta, visto que esta deposita no fundo e somente água e sedimentos finos são despejados, e por sua vez, a proporção de sedimentos finos + água reduz em relação ao volume total ao longo do processo de *overflow*. O volume calculado de sedimento dentro da cisterna ao final dos 150 minutos foi de 9687,5 m³ (sendo 9000 m³ de areia e 687,5 m³ de sedimentos finos) e de 10312,5 m³ de água.

O tempo total de dragagem é de aproximadamente 270 dias e os cálculos foram feitos de acordo com a equação abaixo:

$$T \text{ total de dragagem} = \frac{3234 (N^{\circ} \text{ viagens}) * 0.16666667 (T \text{ (dias) de um ciclo})}{2 (\text{número de dragas})}$$

Onde:

$$N^{\circ} \text{ viagens} = \frac{31.330.800 (\text{volume a ser dragado})}{9687,5 (\text{volume de sedimento por viagem})}$$

Foi também calculado o volume necessário a ser dragado em cada célula de grade no canal de acesso e bacia de evolução, bem como o número de viagens necessário para dragar todo o volume da célula. O sentido de dragagem adotado foi da região mais profunda para a região mais rasa. A simulação considerou ambas as dragas atuando simultaneamente, sendo que a segunda draga iniciou o processo de dragagem 120 minutos após o início da primeira, na região mais rasa, dragado o volume necessário em 3 células, ao final da dragagem dessas células, a segunda draga passa também a dragar da região mais profunda para a mais rasa, evitando que as duas dragas atuem ao mesmo tempo, no mesmo local. A área de bota-fora compreende 169 células de grade, sendo que o sedimento dragado foi despejado nestas células de forma aleatória durante todas as viagens, até completar o volume total de dragagem da bacia de evolução e canal de acesso ao TP Manabi.

3.8.2 Representação Gráfica dos Resultados

A escolha da escala espacial e da escala de cores dos resultados de modelos numéricos na forma de gráficos tem como objetivo apresentar os resultados ao leitor de forma que os diversos cenários simulados e eventos relacionados sejam facilmente comparados entre si, tanto em abrangência da dimensão do impacto, bem como na sua gravidade.

Desta maneira, a escala espacial foi fixada para abranger a área diretamente afetada e a extensão do impacto na área indiretamente afetada e que ao visualizar os diferentes cenários, o leitor tenha maior facilidade de compará-los.

A escala de cores é escolhida de forma a representar todo o espectro das quantidades físicas envolvidas, na forma de concentrações ou magnitudes, e também foi fixada para facilitar a comparação entre cenários e eventos ao leitor. Algumas vezes a amplitude desse espectro abrange um range muito amplo das quantidades, o que dificulta a escolha da escala de cor, primando desta forma, a ilustrar os valores mais frequentes, bem como evidenciar os limites ambientais estipulados.

3.9 EVOLUÇÃO DA FEIÇÃO DE FUNDO

A evolução da feição de fundo é apresentada a cada 15 dias na Figura 27, Figura 28, Figura 29 e Figura 30. São apresentadas variações superiores a 2 centímetros, representando menos de 0,5 % da elevação final da feição de fundo. Nota-se na Figura 27 que até 15 de março (2,5 meses de dragagem) a feição de fundo cresce até 1 m, com acomodamento do sedimento no sentido Norte-Sul. Na Figura 28, é apresentada a evolução da feição de fundo entre 1 de abril e 15 de junho. Nota-se o desenvolvimento da feição no sentido Norte-Sul em função das correntes longitudinais à costa que tendem a distribuir o sedimento nesta direção. Neste período a feição de fundo chega a 2,5 m de altura. Observando a Figura 29, de 1 de julho a 15 de setembro, nota-se a evolução da feição que chega a 3,5 m. Na Figura 30 é apresentada a última parte da simulação, entre 1 de outubro e término da simulação. Ao final da simulação, a feição de fundo gerada no bota-fora do TP Manabi é de 4,4 m com acomodamento dos sedimentos nos sentidos Norte e Sul. Os resultados mostram que, embora ocorra pequeno espalhamento do material de despejo para fora da área de bota-fora, a variação batimétrica externa à área delimitada é, em geral, inferior a 1 m. Considerando a posição do bota-fora, onde na sua porção mais rasa apresenta profundidades iniciais de 32 m (DHN), as áreas mais rasas após o final da dragagem do TP Manabi apresentarão profundidades não inferiores a 27 m em toda sua área, sem representar risco à navegação.

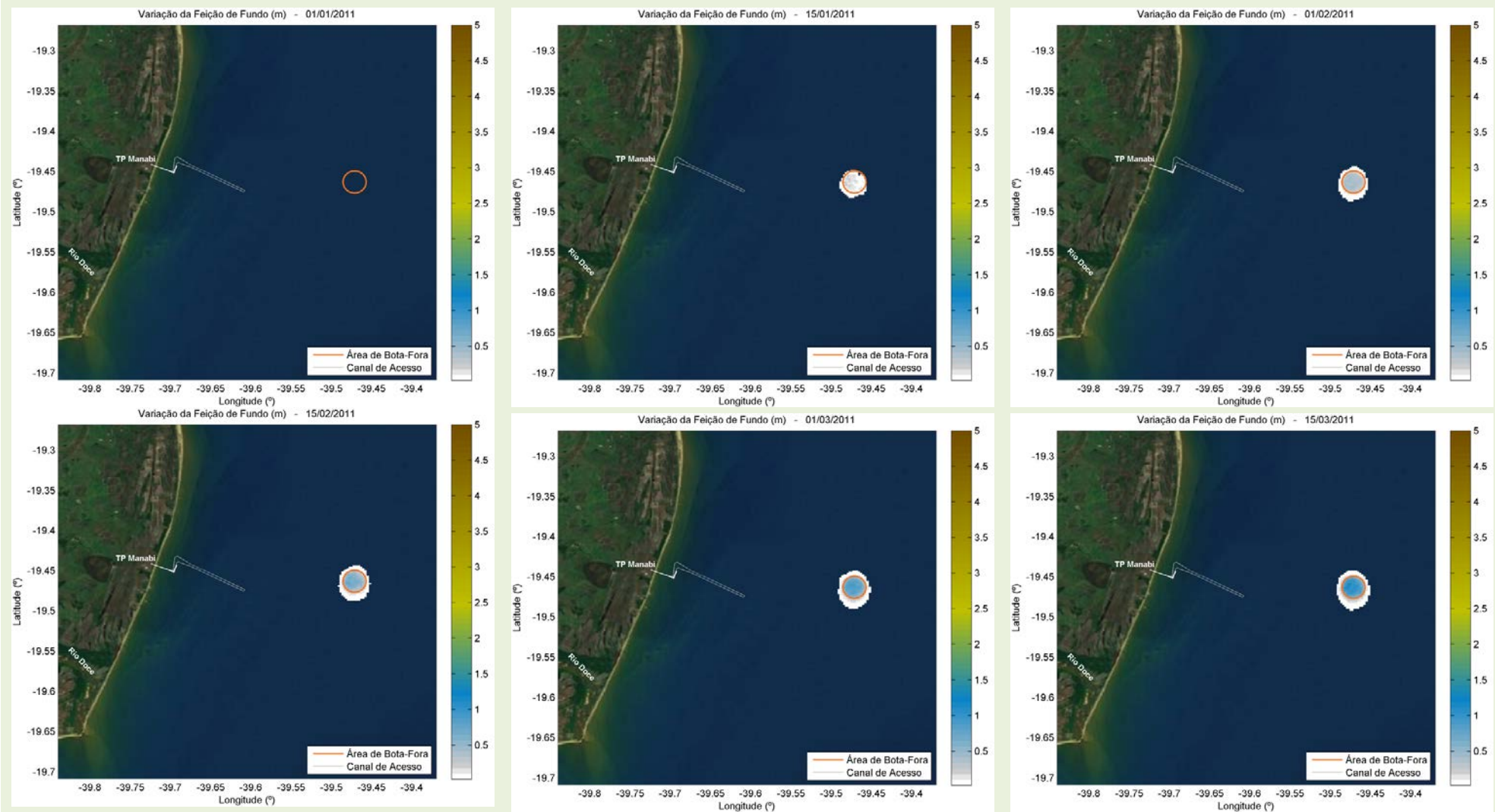


Figura 27: Evolução da feição de fundo do bota-fora do TP Manabi entre 1 de janeiro e 15 de março.

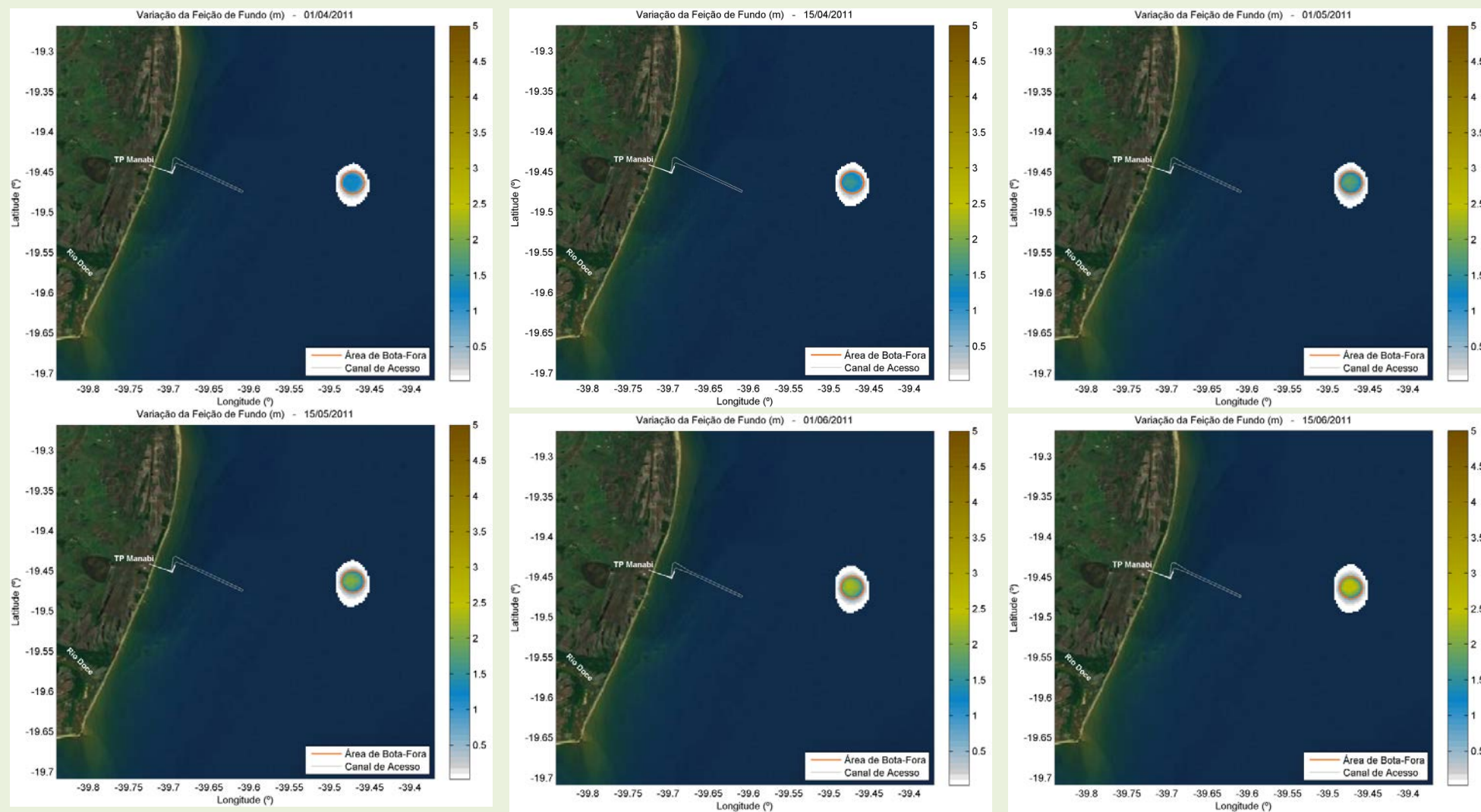


Figura 28: Evolução da feição de fundo do bota-fora do TP Manabi entre 1 de abril e 15 de junho.

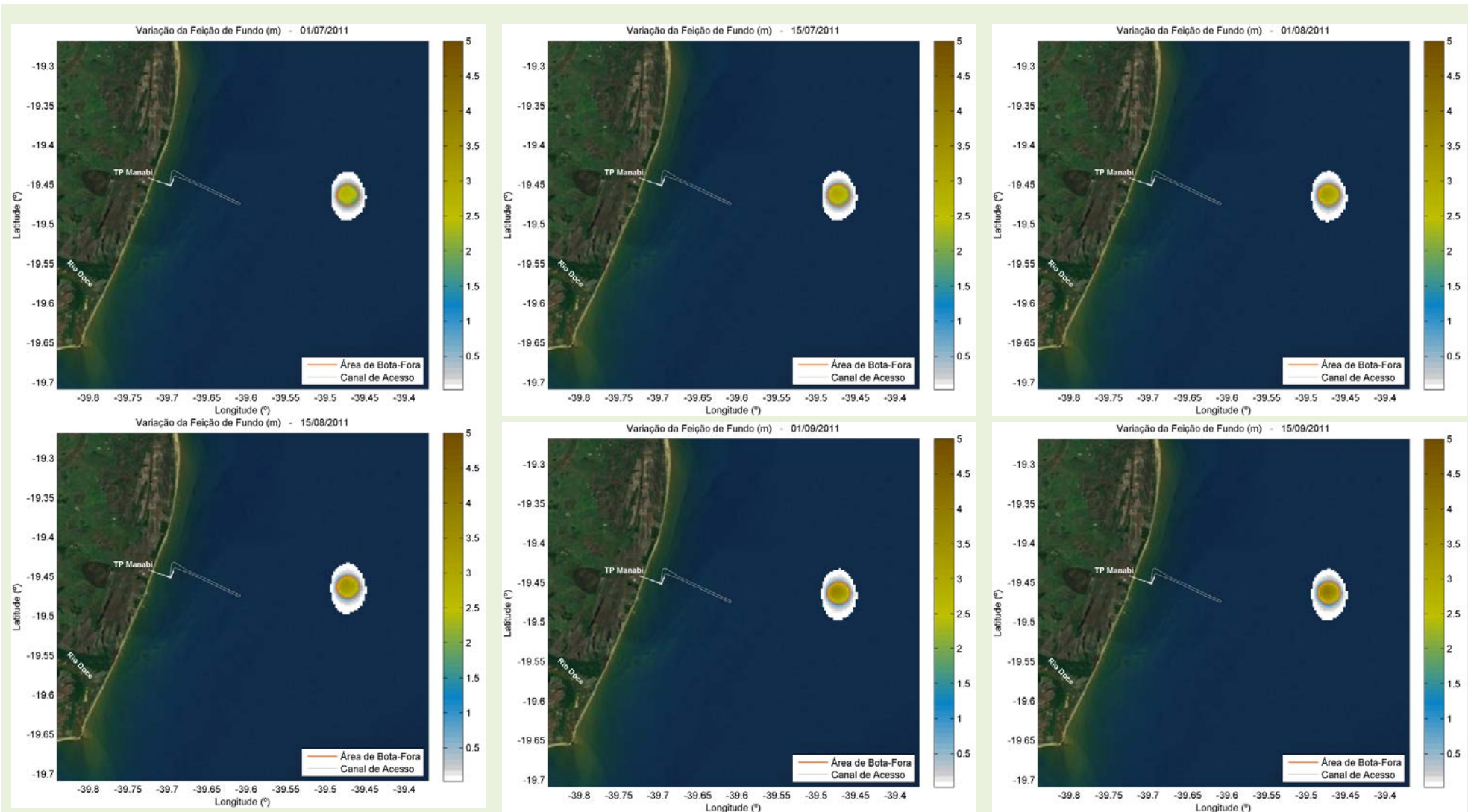


Figura 29: Evolução da feição de fundo do bota-fora do TP Manabi entre 1 de julho e 15 de setembro.

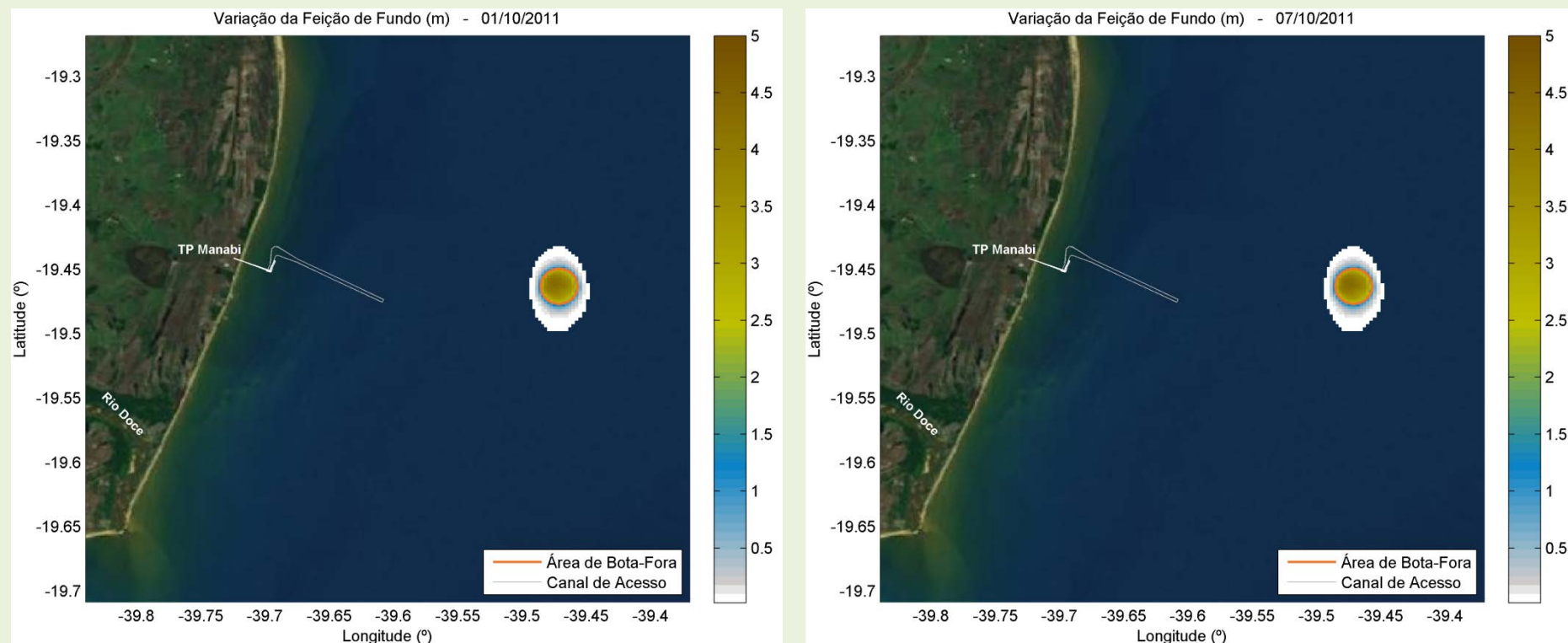


Figura 30: Evolução da feição de fundo do bota-fora do TP Manabi em 1 de outubro e ao final da simulação.

3.10 PLUMA DE DRAGAGEM

Os resultados de pluma de dragagem são apresentados para momentos representativos da simulação Figura 31 a Figura 38 - marés de enchente e vazante de sizígia e quadratura sob ventos dos quadrantes Sul e Nordeste - e figuras de frequência de ocorrência da pluma de sedimentos com concentrações acima de 0,1, 0,5, 1 e 5 mg/L (Figura 39 a Figura 44).

Entre a Figura 31 e a Figura 38 são apresentados os resultados de pluma para momentos representativos da simulação, com valores superiores a 1 mg/L. É possível perceber a importância das correntes de maré na dispersão da pluma de dragagem e bota-fora. Em momentos de sizígia (Figura 31 a Figura 34), a dispersão da pluma se dá tanto para Norte quanto para Sul, em momentos de quadratura (Figura 35 a Figura 38) a dispersão da pluma é consideravelmente menor, dispersando-se localmente, sendo mais influenciada pelo vento atuante. Percebem-se nas figuras que as maiores concentrações de sedimento em suspensão estão presentes durante momentos de sizígia, pois devido às fortes correntes (superiores a 1 m/s) geradas por marés os sedimentos se mantêm em suspensão, já em momentos de quadratura, quando as correntes são menos intensas, uma porção maior do material sedimenta na área, reduzindo a concentração de sedimentos em suspensão. Devido à grande porcentagem de areias na composição do sedimento dragado (90%), o material despejado tende a depositar rapidamente. Apenas em momentos de correntes fortes, os sedimentos permanecem por mais tempo em suspensão, e a pluma se dispersa, contudo, com baixas concentrações.

Da Figura 39 a Figura 44 são apresentadas as frequências de ocorrência de concentrações de pluma de dragagem e bota-fora para toda a coluna d'água, camada superficial e de fundo. Analisando os resultados de frequência de ocorrência de concentrações superiores a 0,1 mg/L, nota-se que o contorno de 30% de ocorrência chega à costa, entretanto, ao analisar concentrações superiores a 0,5 mg/L, percebe-se que apenas entre 10 e 20% dos casos chegaram à costa. Ao observar a frequência de ocorrência para concentrações superiores a 1 mg/L percebe-se que não há toque na costa com frequências superiores a 10%. Já concentrações superiores a 5 mg/L estão restritas à área de dragagem do canal e do bota-fora. Os resultados da camada superficial e de fundo são bastante similares aos de toda a coluna d'água, indicando uma homogeneidade da coluna d'água.

A Figura 45 apresenta as máximas concentrações da pluma de dragagem e bota-fora em todo o período de simulação. Nesta são apresentadas concentrações superiores a 5 mg/L.

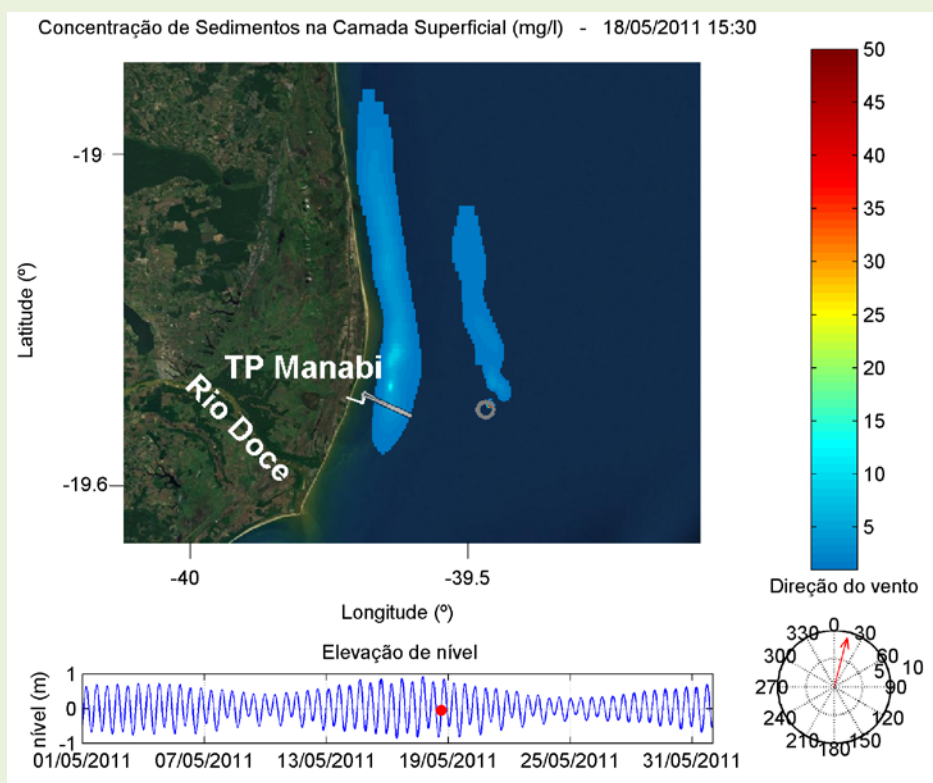


Figura 31: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré enchente de sizígia e vento Sul.

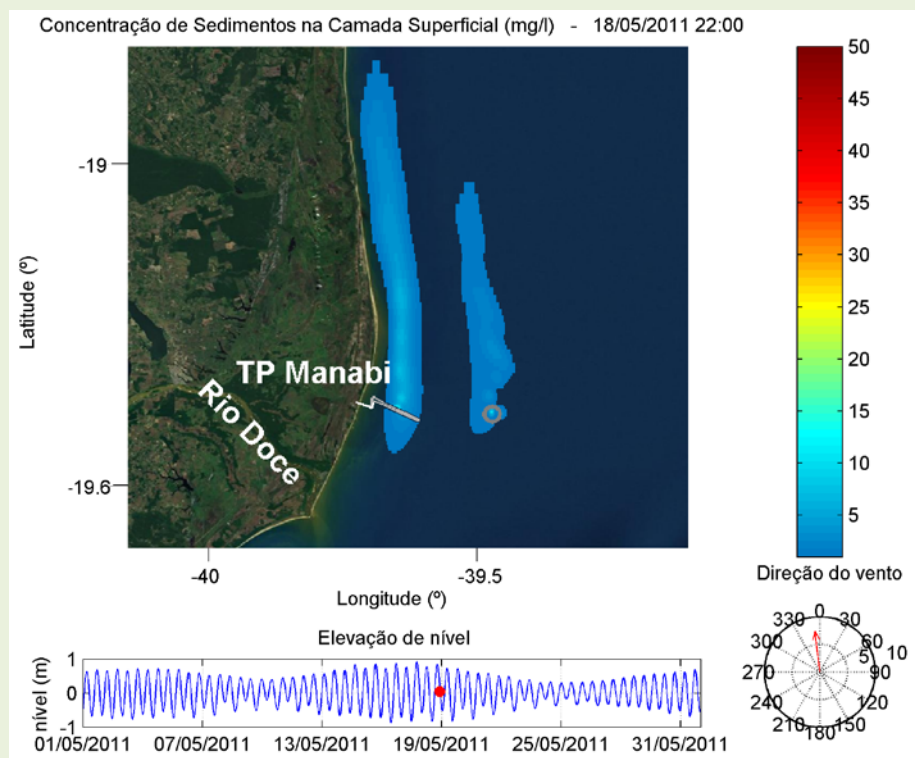


Figura 32: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré vazante de sizígia e vento Sul.

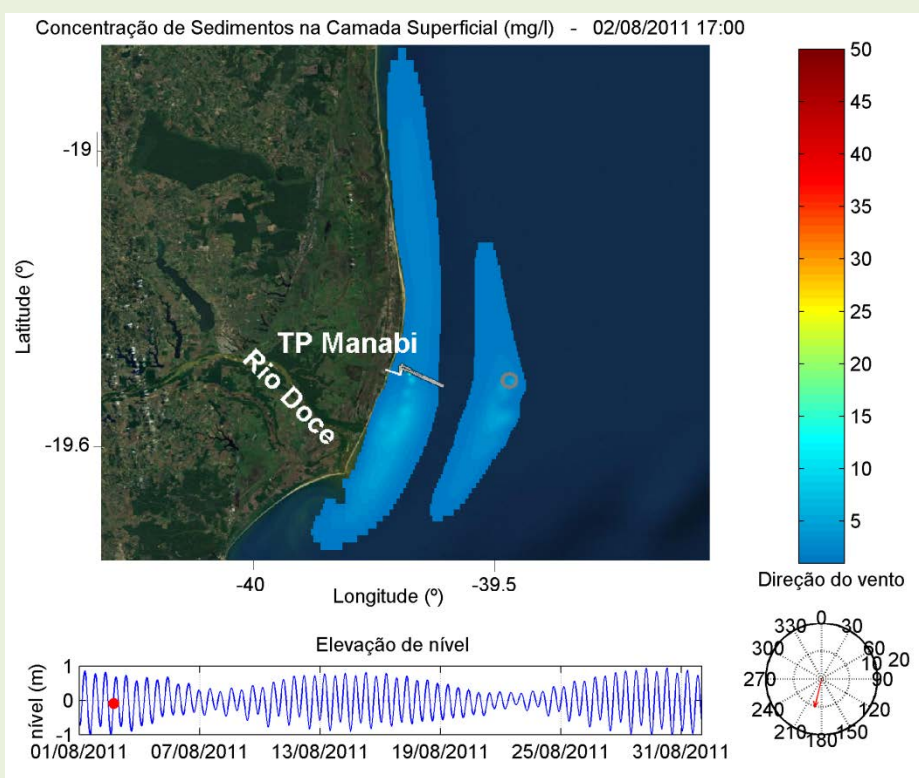


Figura 33: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré enchente de sizigia e vento Nordeste.

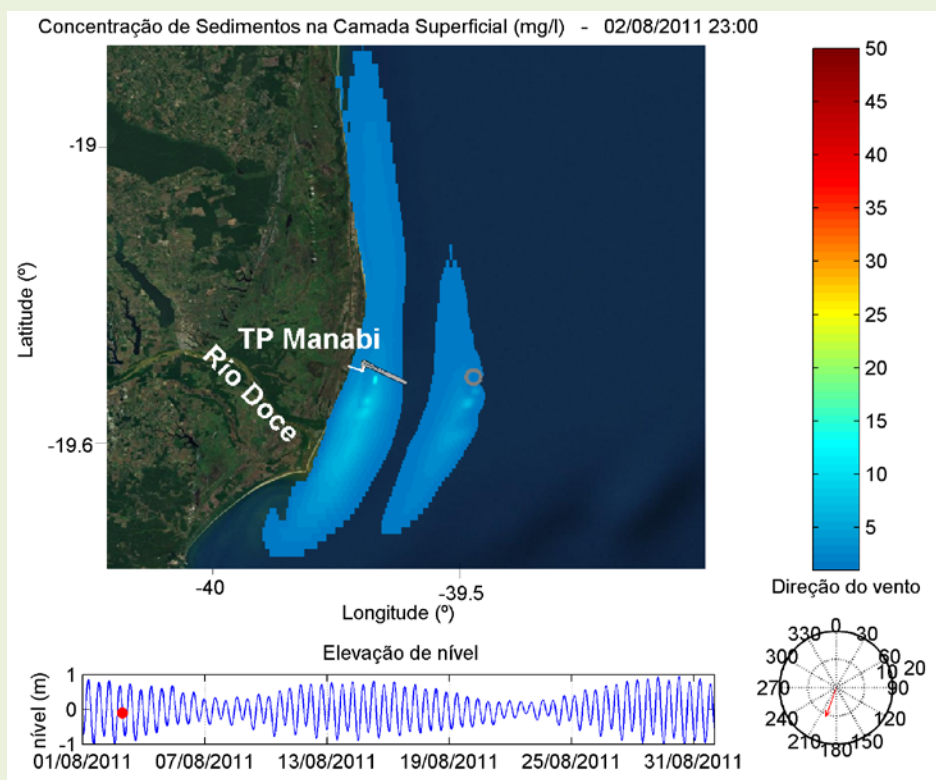


Figura 34: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré vazante de sizigia e vento Nordeste.

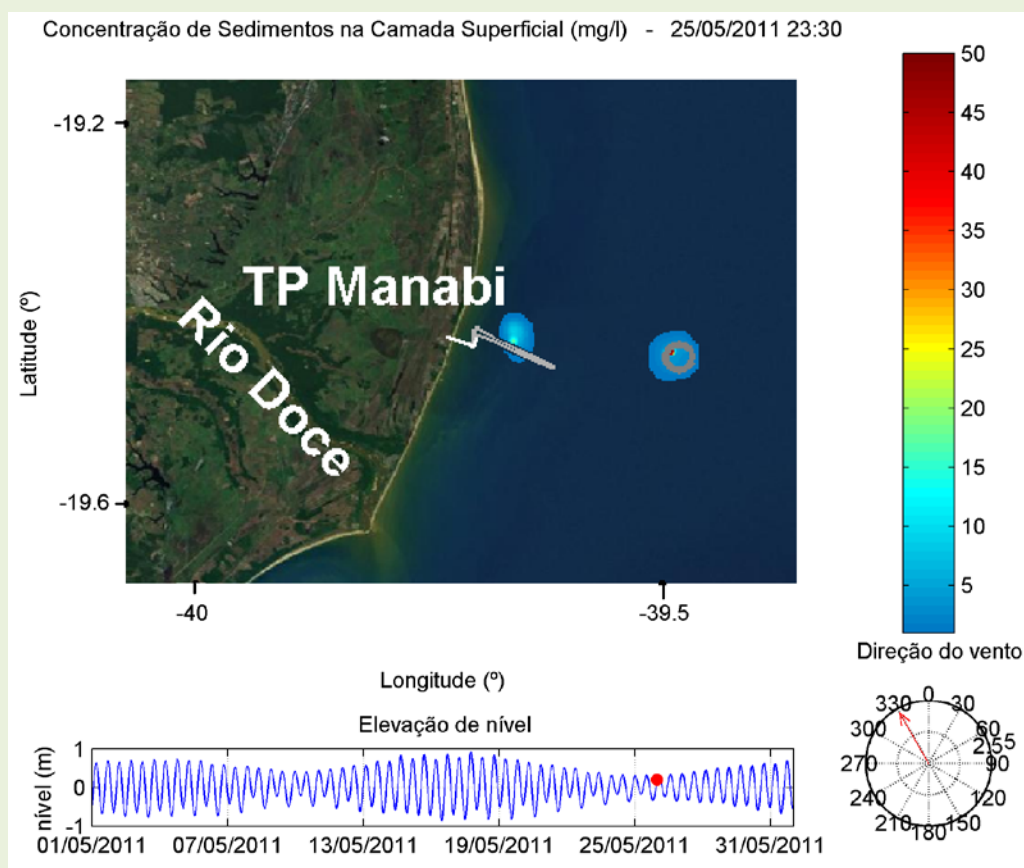


Figura 35: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré enchente de quadratura e vento Sul.

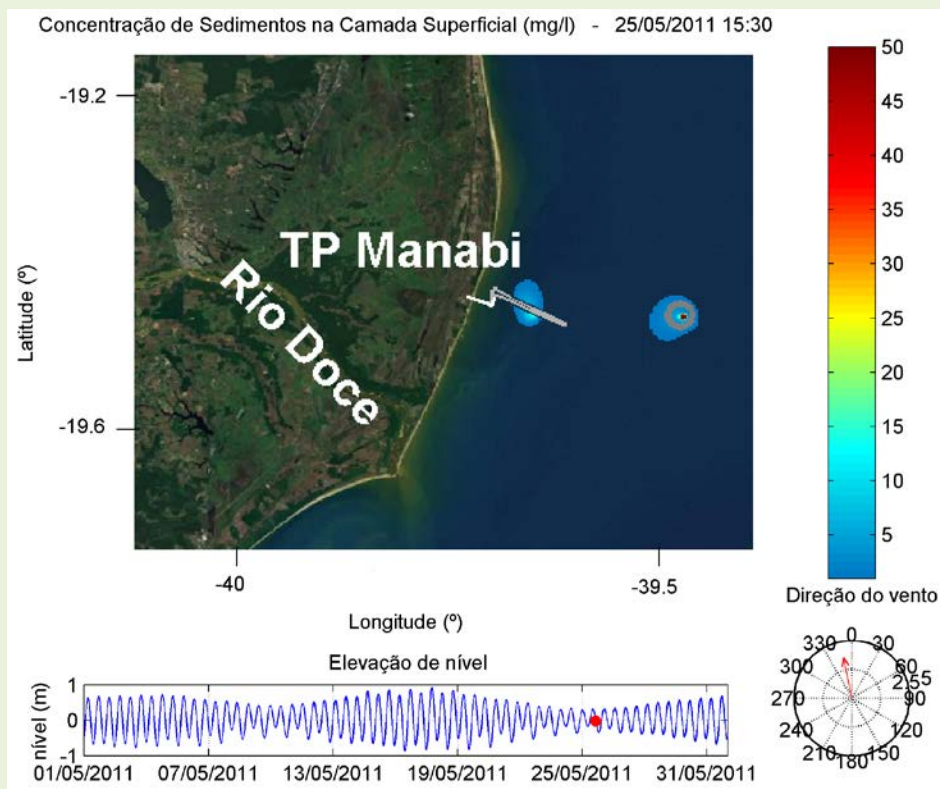


Figura 36: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré vazante de quadratura e vento Sul.

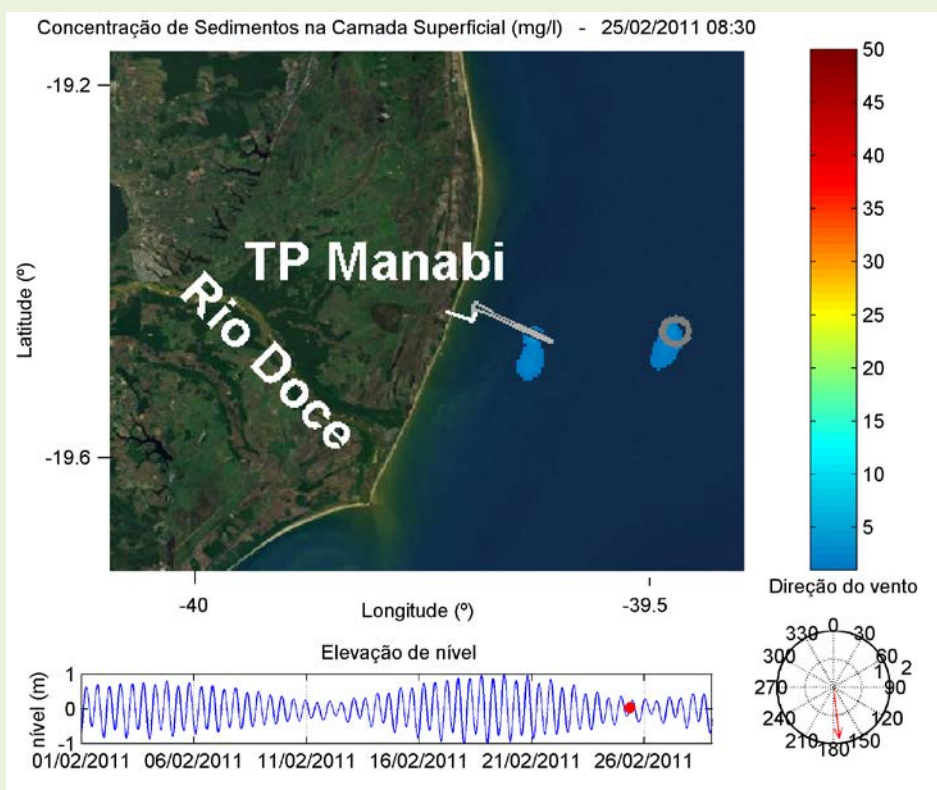


Figura 37: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré enchente de quadratura e vento Nordeste.

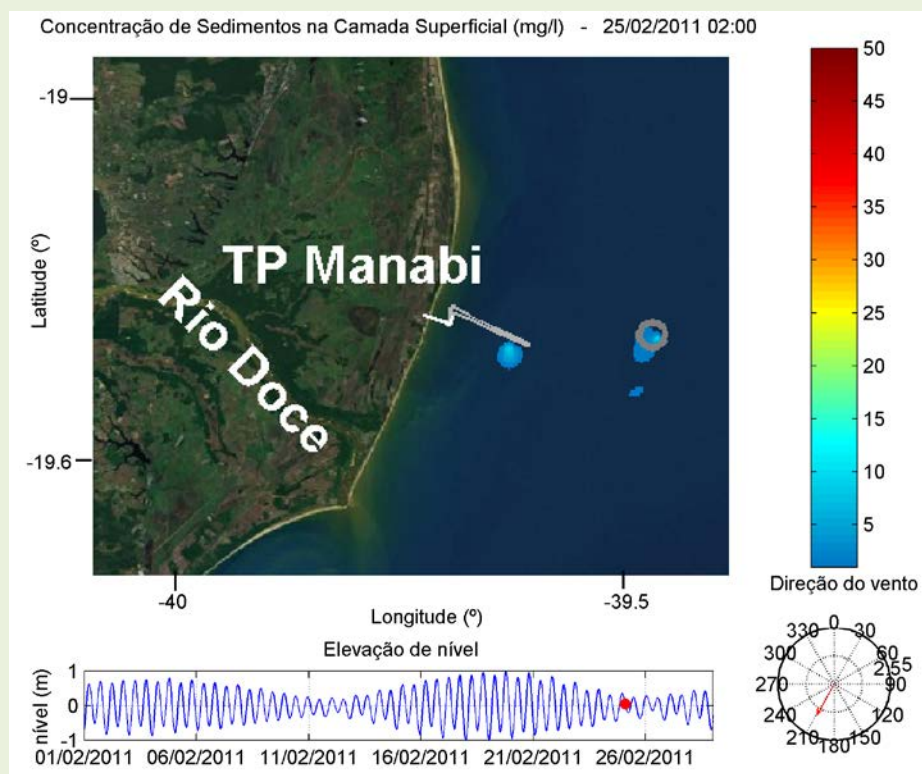
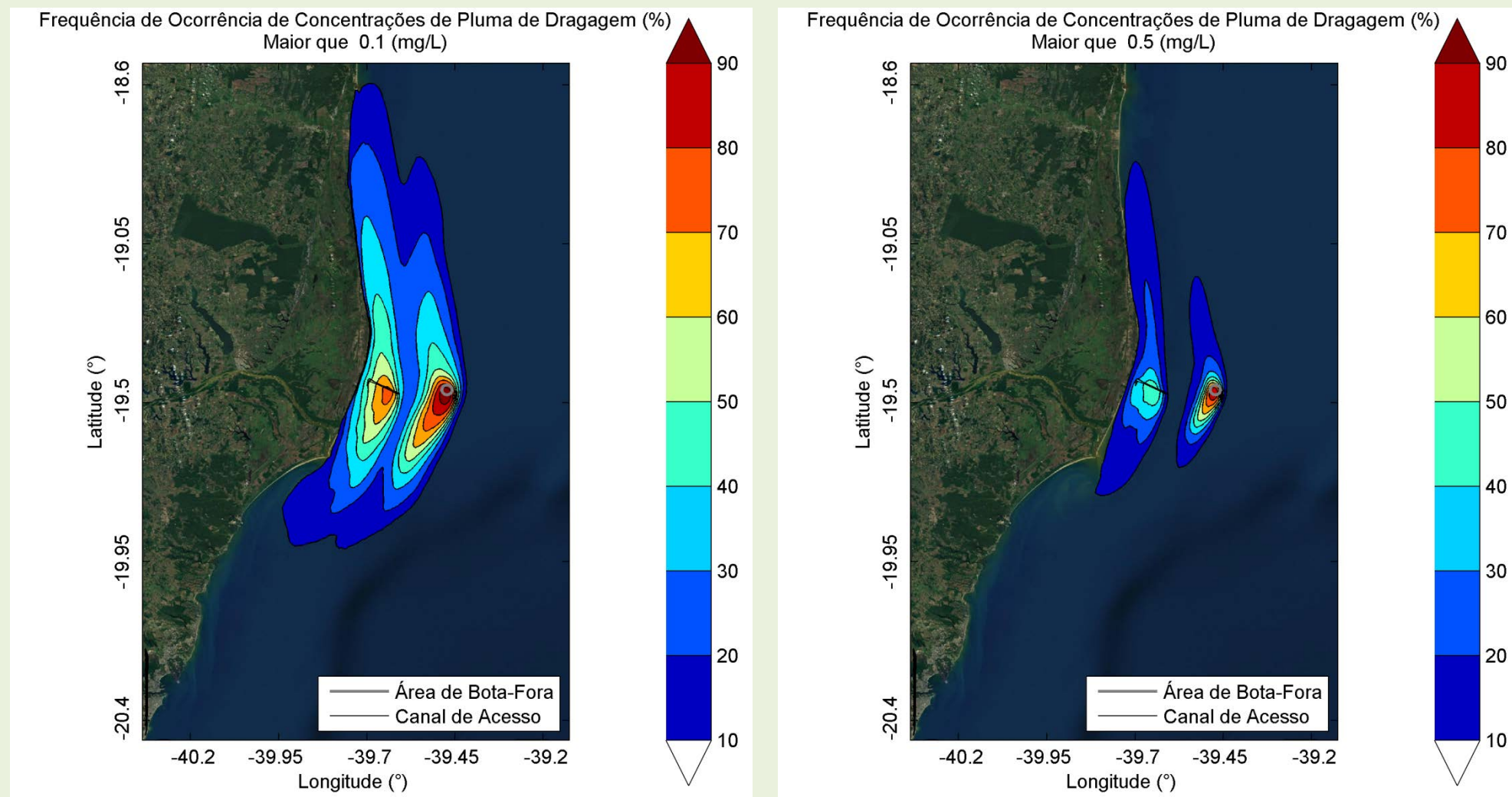


Figura 38: Concentração de sedimentos (mg/L) na camada superficial. Condição de maré vazante de quadratura e vento Nordeste.



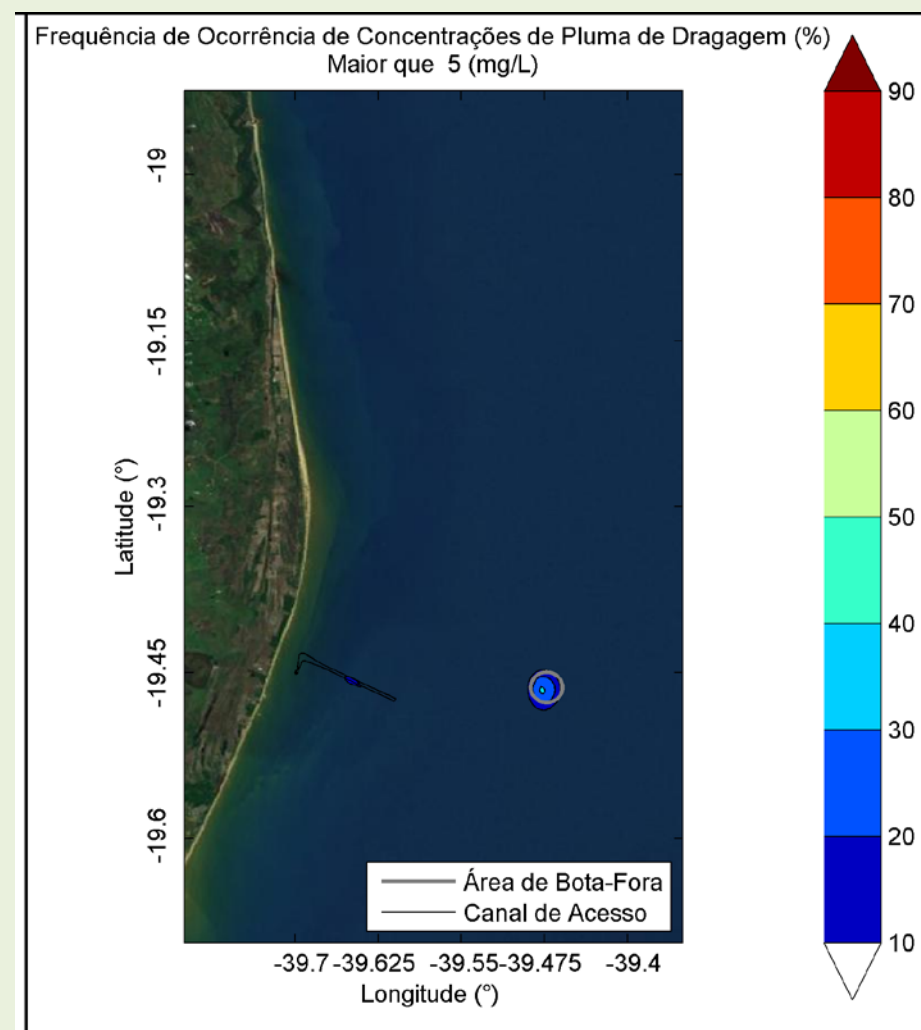
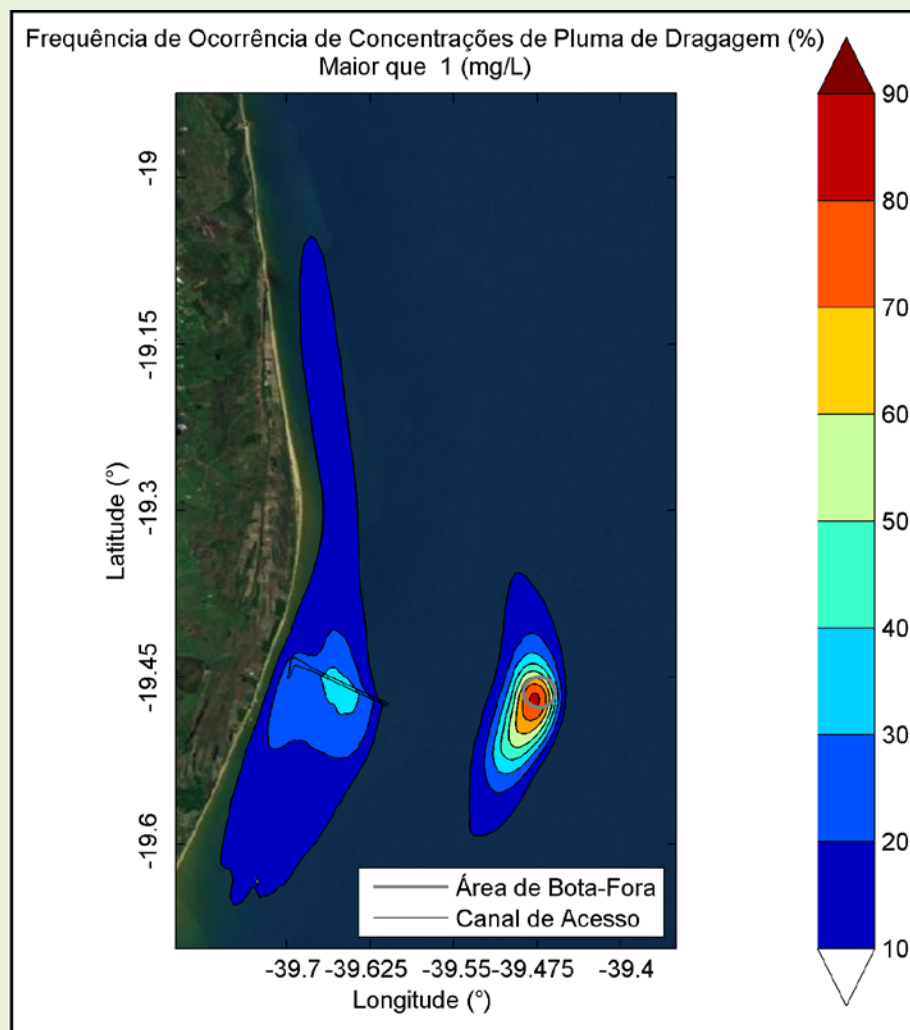


Figura 40: Frequência de ocorrência de concentrações de pluma de dragagem e bota-fora superiores a 1 mg/L (esquerda) e 5 mg/L direita, em toda a coluna d'água.

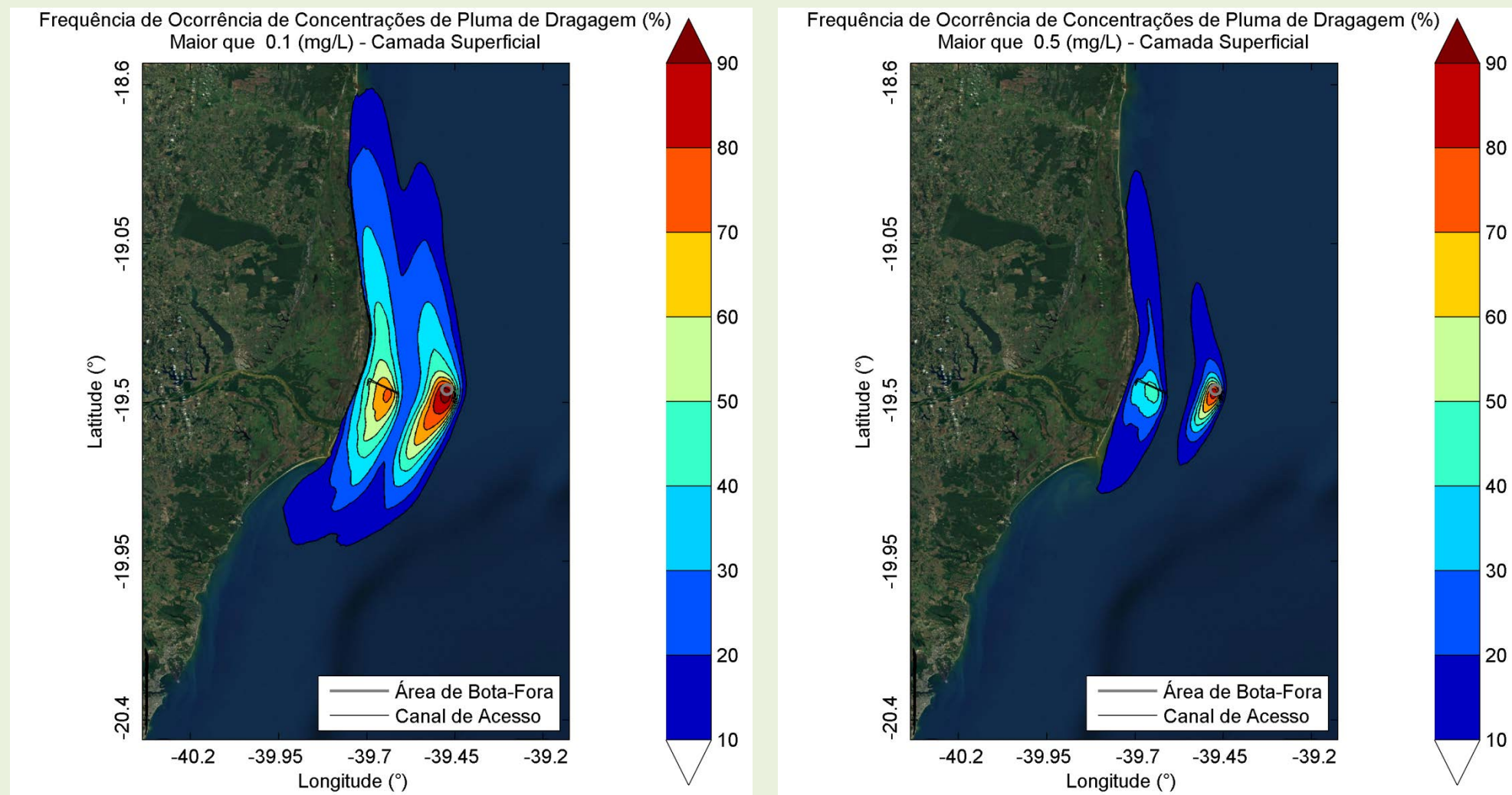


Figura 41: Frequência de ocorrência de concentrações de pluma de dragagem e bota-fora superiores a 0,1 mg/L (esquerda) e 0,5 mg/L direita, na camada superficial.

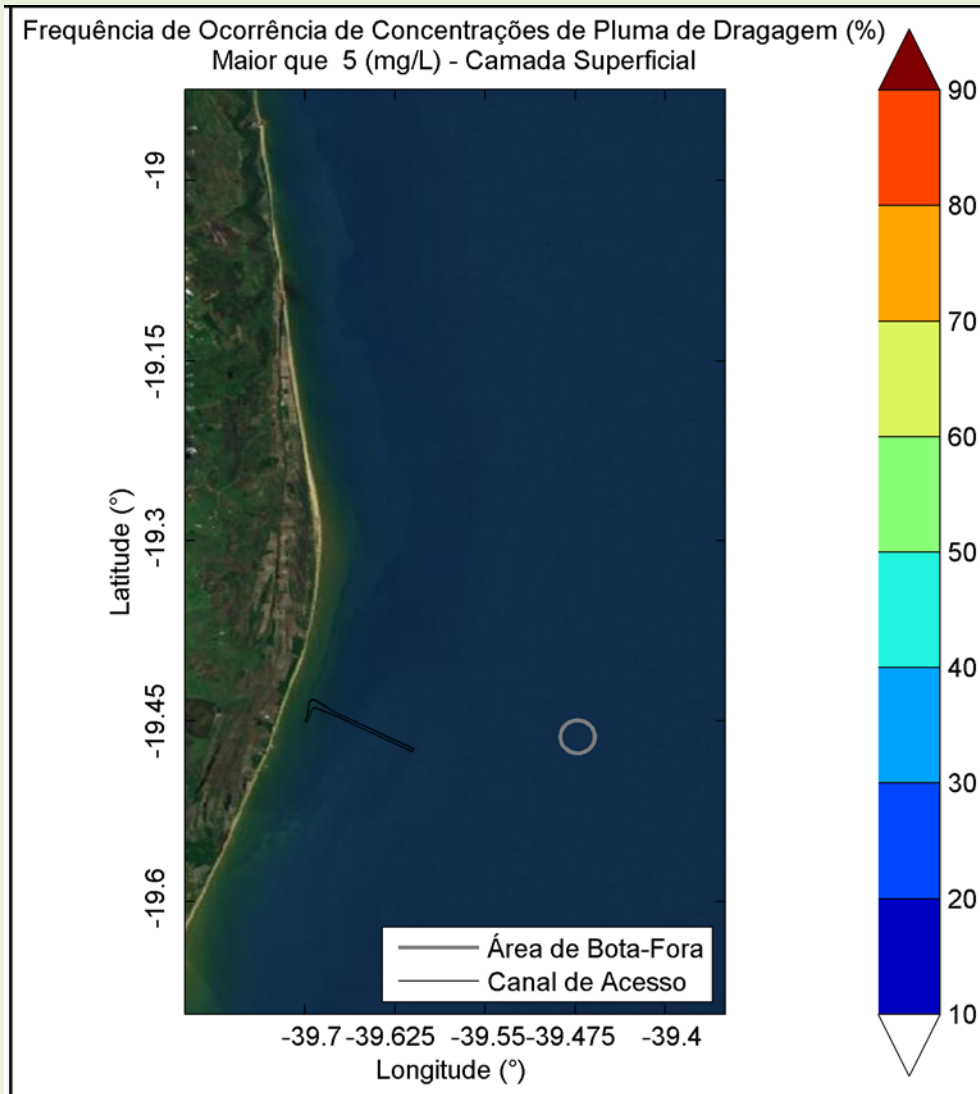
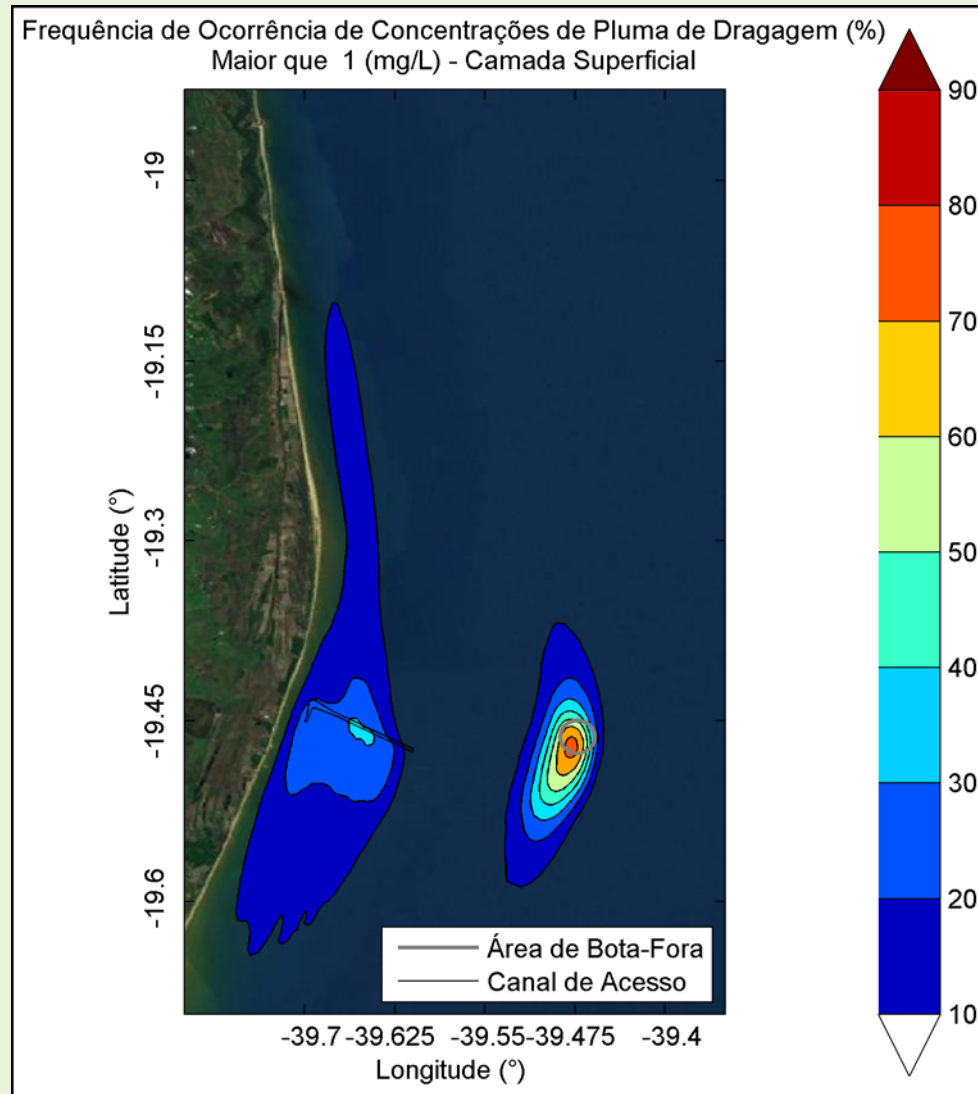


Figura 42: Frequência de ocorrência de concentrações de pluma de dragagem e bota-fora superiores a 1 mg/L (esquerda) e 5 mg/L direita, na camada superficial.

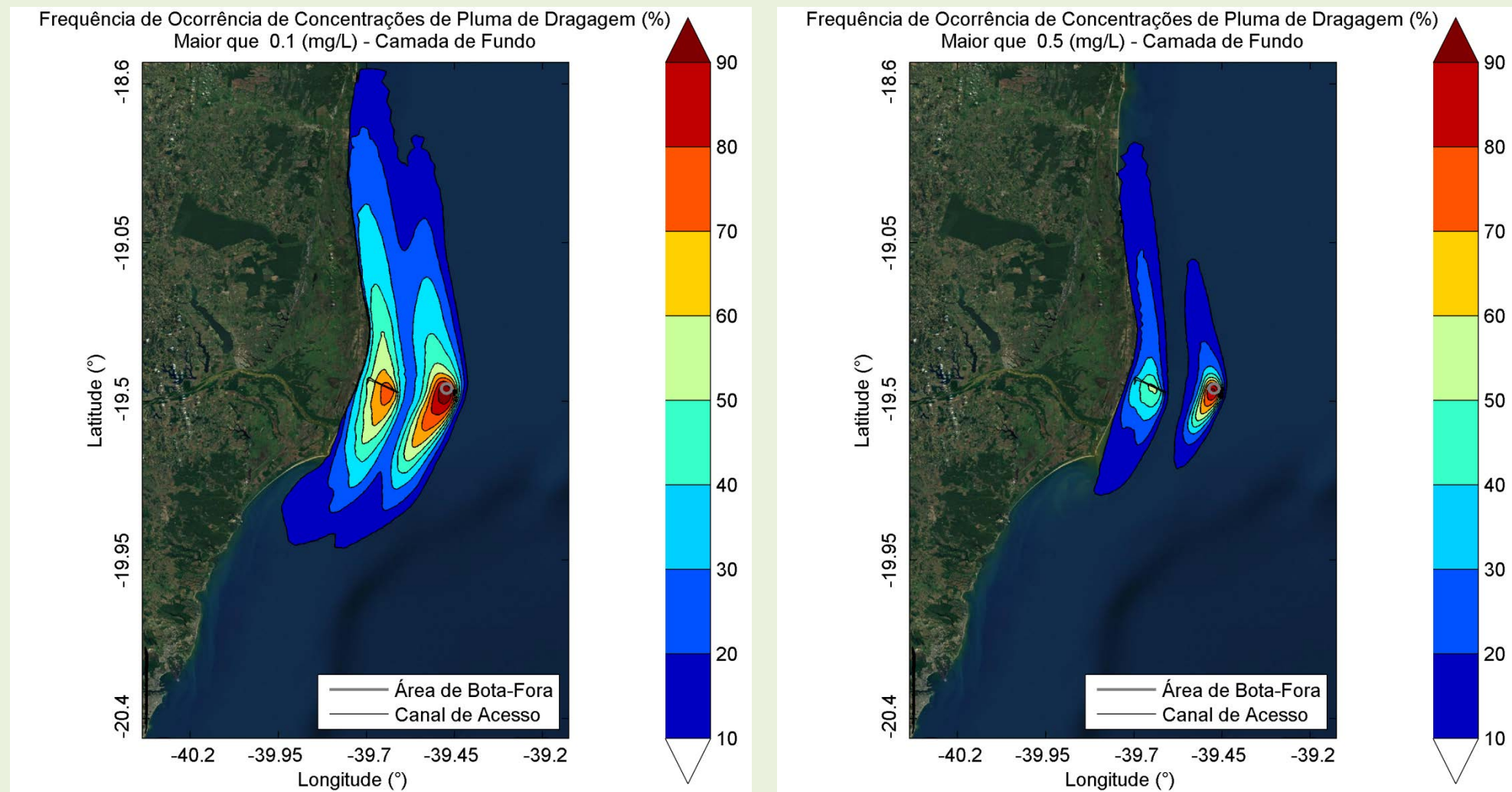


Figura 43: Frequência de ocorrência de concentrações de pluma de dragagem e bota-fora superiores a 0,1 mg/L (esquerda) e 0,5 mg/L direita, na camada de fundo.

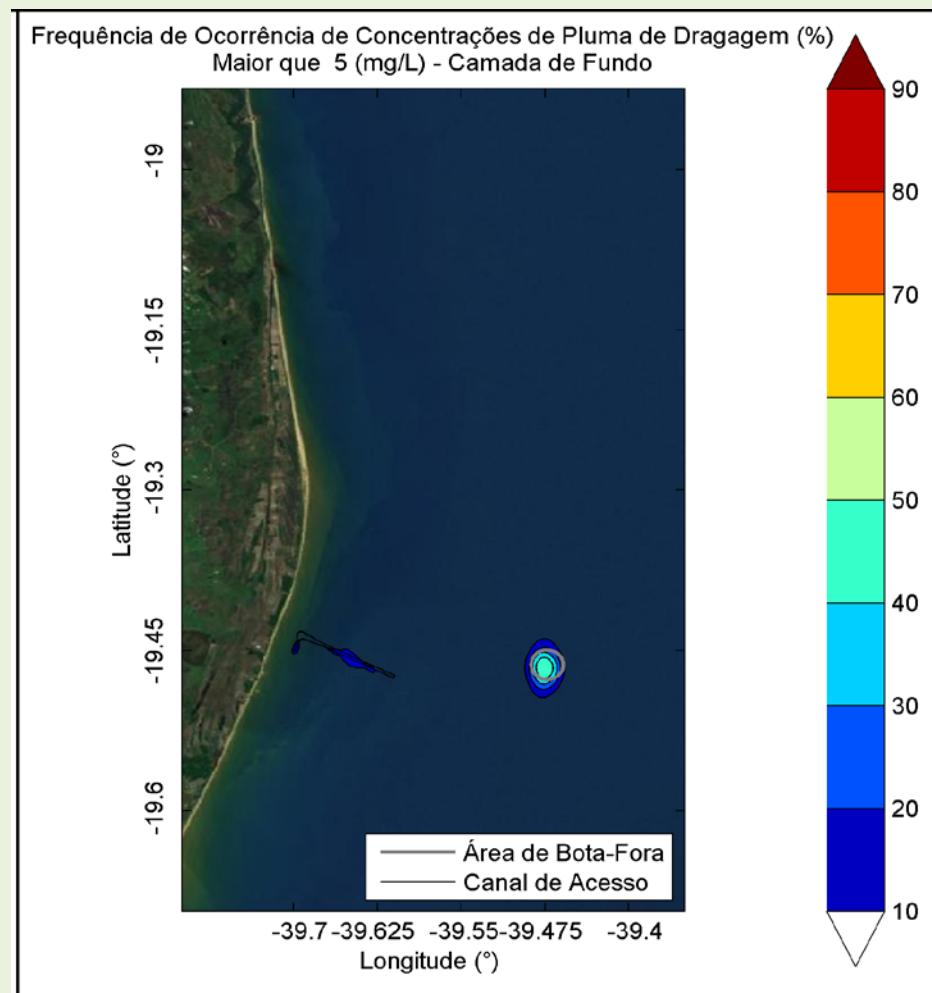
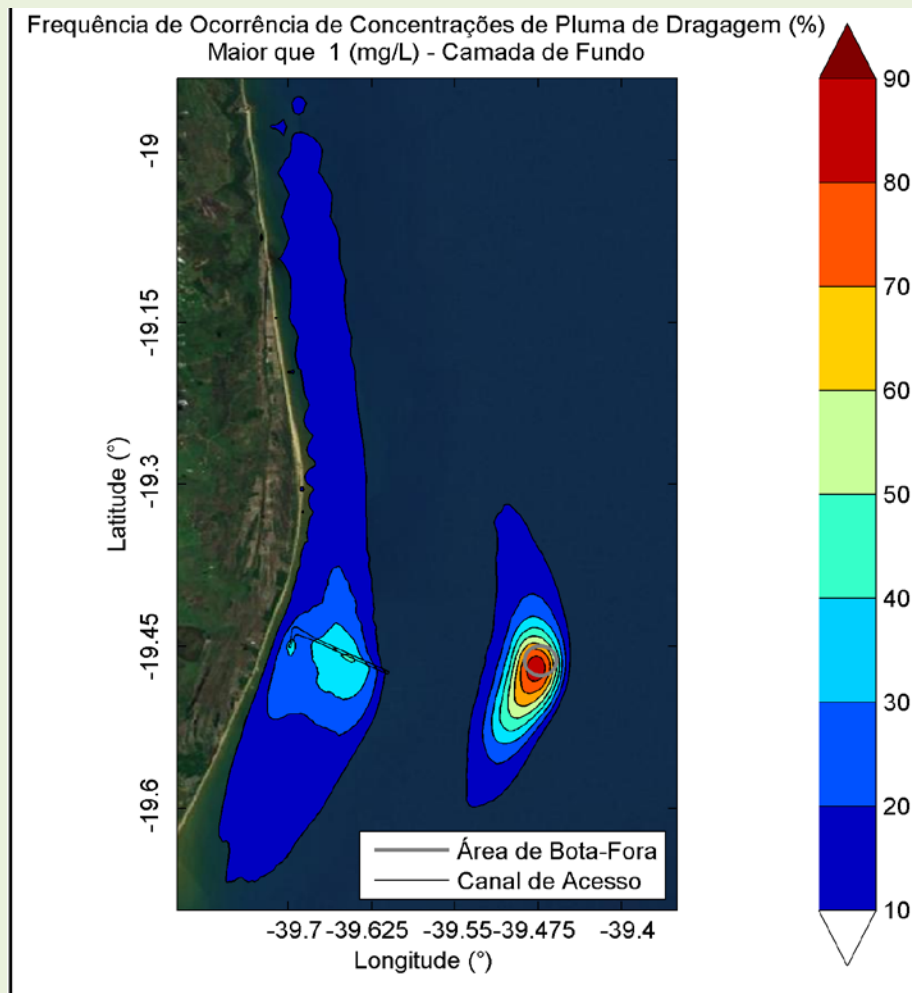


Figura 44: Frequência de ocorrência de concentrações de pluma de dragagem e bota-fora superiores a 1 mg/L (esquerda) e 5 mg/L direita, na camada de fundo.

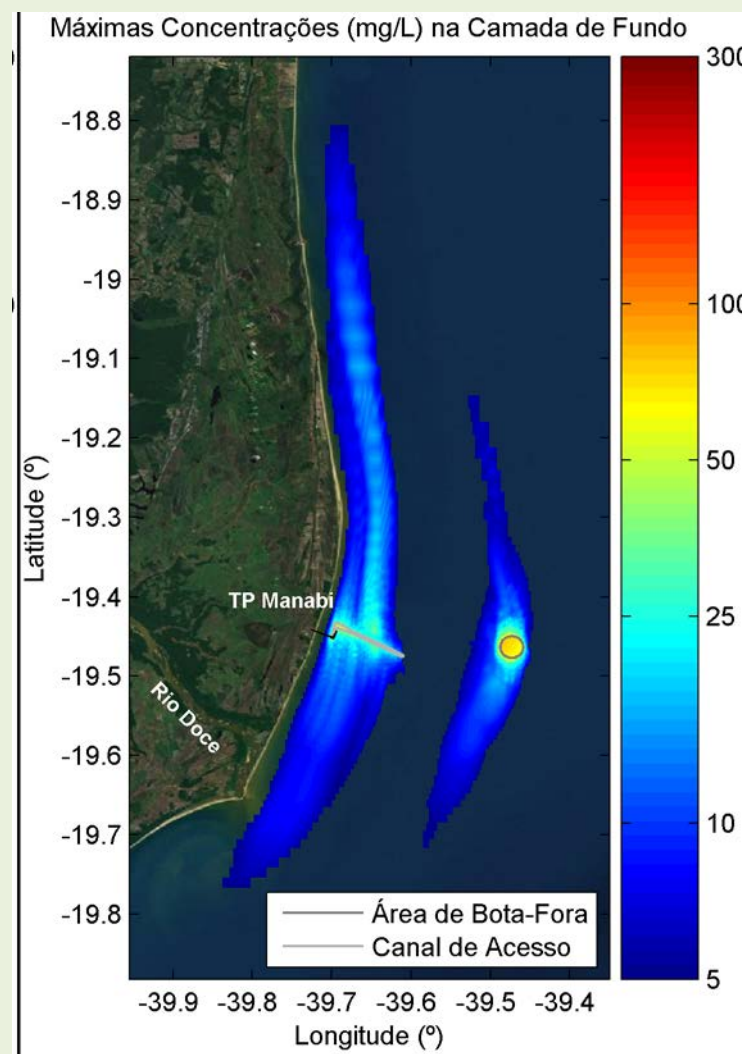
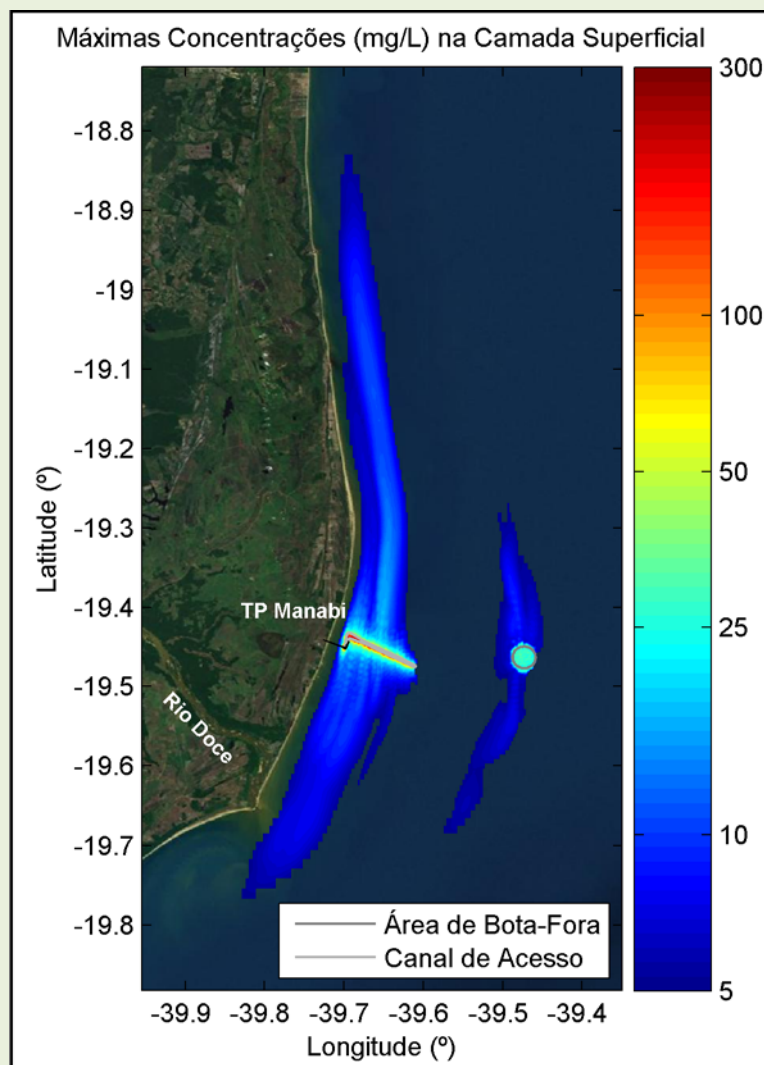


Figura 45: Máximas concentrações da pluma de dragagem e bota-fora na camada superficial (esquerda) e de fundo (direita). São apresentadas concentrações superiores a 5 mg/L.

4 Considerações Finais

A CB&I conduziu uma simulação de dispersão de pluma de dragagem e evolução da feição de fundo do Terminal Portuário da Manabi Mineração (TP Manabi) em Linhares – ES com o intuito de analisar a dispersão da pluma de sedimentos oriunda da dragagem da bacia de evolução e canal de acesso ao TP Manabi e do despejo desse material na área de bota-fora, bem como a evolução da feição de fundo ao longo de todo o período de dragagem.

A partir dos volumes calculados de dragagem, características da draga utilizada, áreas do canal e do bota-fora, foram desenvolvidas rotinas para esquematizar e simular numericamente o processo de dragagem e despejo no bota-fora. A simulação considerou duas dragas com capacidade de 20.000 m³ atuando simultaneamente, sendo o tempo total para o processo de dragagem do canal de acesso ao TP Manabi calculado de aproximadamente 11 meses. O modelo foi iniciado em 1 de janeiro de 2011 e a simulação de dragagem foi iniciada 5 dias depois, dia 6 de janeiro – tempo de aquecimento do modelo – sendo finalizado o processo dia 24 de outubro às 20 horas com mais 5 dias sem operação – tempo para sedimentação do material em suspensão.

Foi utilizado um modelo tridimensional com 5 camadas verticais tipo sigma (com espessura da superfície para o fundo de 20, 35, 20, 15 e 10% da profundidade local) e foram considerados os processos de: 1) ressuspensão de sedimentos junto ao fundo: 120 minutos de ressuspensão (5% da taxa de dragagem) de sedimentos na camada próxima ao fundo; 2) *overflow* + ressuspensão: 30 minutos de ressuspensão do material dragado na camada próxima ao fundo e *overflow* (água + sedimentos coesivos) despejados na camada superficial do modelo e; 3) despejo: 2 minutos onde todo o conteúdo da cisterna é depositado na área de bota-fora (camada superficial).

Segundo resultados da simulação da evolução da feição de fundo do bota-fora do TP Manabi, nos primeiros 2,5 meses a feição de fundo chega a 1 m com um pequeno espalhamento no sentido Norte-Sul. Após 6 meses a feição inicia a evolução no sentido Norte-Sul em função das correntes longitudinais à costa que tendem a distribuir o sedimento depositado. Neste período a feição chega a 2,5 m. entre o sétimo e nono mês a feição se desenvolve chegando a 3,5 m. No final da simulação o modelo apresenta variações batimétricas na área de bota-fora de 4,4 m com pequeno prolongamento nos sentidos Norte e Sul. Embora ocorra pequeno espalhamento do material de despejo para fora da área de bota-fora, a variação batimétrica externa à área

delimitada é pequena, em geral inferior a 1 m. Considerando a posição do bota-fora, onde na sua porção mais rasa apresenta profundidades iniciais de 32 m (DHN), as áreas mais rasas após o final da dragagem do TP Manabi apresentará profundidades não inferiores a 27 m em toda a sua área, sem representar risco à navegação.

A partir das análises dos resultados de pluma de dragagem e bota-fora, pôde-se perceber a importância das correntes geradas por marés na área de estudo. Devido às profundidades reduzidas do Banco de Abrolhos (a Norte do TP Manabi) a onda de maré é amplificada, a diferença de nível entre a área do Banco e as regiões adjacentes gera correntes longitudinais à costa para Sul durante períodos de maré vazante e para Norte durante as marés enchentes (ao Sul do Banco). Em momentos de sizígia a dispersão da pluma se dá tanto para Norte quanto para Sul, em momentos de quadratura a dispersão da pluma é consideravelmente menor, sendo mais influenciada pelo vento atuante. As maiores concentrações de sedimento em suspensão ocorrem durante a sizígia, pois devido às fortes correntes (superiores a 1 m/s) os sedimentos se mantêm em suspensão. Em momentos de quadratura, quando as correntes são menos intensas, uma porção maior do material sedimenta, reduzindo a concentração de sedimentos na água. Devido à grande porcentagem de areias na composição do sedimento dragado (90%), o material despejado tende a depositar rapidamente. Apenas em momentos de correntes fortes, os sedimentos mais finos permanecem em suspensão, e a pluma se dispersa, contudo, com baixas concentrações.

Para determinar a distribuição da pluma de dragagem no período analisado, esta foi também analisada a partir da frequência de ocorrência de concentrações de sedimento na água (coluna d'água total, superfície e fundo) superiores a 0,1, 0,5, 1 e 5 mg/L. Os resultados para toda a coluna d'água, superfície e fundo apresentaram-se bastante semelhantes, indicando uma homogeneidade vertical da coluna d'água. Concentrações a 0,1 mg/L apresentam o contorno de 30% de ocorrência chegando à costa, entretanto, ao analisar concentrações superiores a 0,5 mg/L, percebe-se que 10% dos casos chegaram à costa. Concentrações superiores a 1 mg/L não chegam à costa com frequências superiores a 10%. Já concentrações as superiores a 5 mg/L estão restritas à área de dragagem do canal e do bota-fora.

Equipe Técnica

Nome	Formação	Função	CTF - IBAMA	CREA/ AOCEANO
Alex Vieira Falkenberg	Engenheiro de Controle e Automação	Gerente de Projeto	5132601	PR-68434/D
Guilherme Vieira da Silva	Oceanógrafo	Modelagem Numérica	5216854	1497

5 Referências

- ALBINO, J. e SUGUIO, K., 2010. Sedimentation processes and beach morphodynamics active at Doce River mouth, Espírito Santo State, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências. 82(4). 1031-1044.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Diagnostico Consolidado da bacia do rio Doce. 2005.
- ARDALAN, A.A. e HASHEMI-FRAHANI, H., 2007. A Harmonic Approach to Global Ocean Tide Analysis Based on TOPEX/POSEIDON satellite. Marine Geophysical Research, 28, 235-255.
- CEPAL, 2011. Efectos del Cambio Climático em la Costa de América Latina y Caribe – Dinámicas, Tendencias y Variabilidad Climática. UNESCO, 265 p. 2011.
- ECKART, C., 1958. Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures. American Journal of Science, 256, 225-240.
- EGBERT, G. D. e EROFEEVA, S. Y., 2002. Efficient Inverse Modeling of Batotropic Ocean Tides. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19, 183-204.
- EGBERT, G.D., BENNETT, A.F., FOREMAN, M.G.G, 1994. TOPEX/POSIDON tides estimated using a global inverse model. Journal of Geophysical Research, 99 (C12), 24821-24852.
- FEMAR, 2000. Catálogo de estações maregráficas brasileiras, Folhas 157 e 159. Disponível em: <http://www.fundacaofemar.org.br>. Acessado em: 22 mar. 2012.
- LESSER, G.R.; ROELVINK. J.A.; VAN KESTER, J.A.T.M. & STELLING, G.S. 2004. Development and Validation of a Three-Dimensional Morphological Model. Coastal Engineering. Vol. 51. P. 883-915

PARTHENIADES, E., 1965. Erosion and Deposition of Cohesive Soils. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol 91, No. HY1.

PETROBRAS, 2005. Modelagem Numérica de Evolução de Perfis de Praia em Cacimbas. Relatório técnico – RL-367100-6521-931-PPR-002.

SHAW Brasil, 2012. Realização de Medições de Correntes e Ondas ao Largo do Município de Linhares – ES. Relatório Técnico. 49p.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1983. Engineering and Design - Dredging and Dredged Material Disposal. Engineer Manual 1110-2-5025.

VAN RIJN. L.C., 1993. Principles of sediment transport in Rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, Holanda

WLI Delft Hydraulics, 2007. Delft3D-RGFGRID – Generation and manipulation of curvilinear grids for FLOW and WAVE. Deltares, Holanda.